

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE
CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES EM
MATERIAIS ORTOTRÓPICOS**

Iuri Campos Sodré
Rodrigo Moraes Costa

**Rio de Janeiro
Junho de 2018**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE
CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES EM
MATERIAIS ORTOTRÓPICOS**

Iuri Campos Sodré
Rodrigo Moraes Costa

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior do
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor orientador: Paulo Pedro Kenedi

Rio de Janeiro

Junho de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por terem sido um apoio fundamental não somente na elaboração deste projeto, como também ao longo de toda a graduação. Também agradeço a meu irmão por se mostrar igualmente apoiador e ainda por disponibilizar os recursos para a finalização deste trabalho.

Além disso, agradeço a todas as amizades proporcionadas pelo CEFET/RJ que tornaram esta jornada muito mais acolhedora. Cabe também um agradecimento à própria instituição, que passou a ser minha segunda casa desde os dias de ensino técnico.

Por último, um agradecimento ao Professor Paulo Kenedi, por aceitar este projeto e dar as orientações necessárias para a realização e conclusão do mesmo.

Rodrigo Moraes

Agradeço primeiramente aos meus pais, Cláudio Luciano Sodré de Souza e Maristela Campos Sodré, assim como à minha irmã Ingrid Campos Sodré, por sempre priorizarem e incentivarem minha educação, me apoiando e dando desde o início todos os insumos necessários para a formação de uma estrutura de conhecimentos sólida e, acima de tudo, garantindo em todos os momentos que eu viesse a me tornar uma pessoa melhor.

Agradeço também ao professor orientador Paulo Kenedi, pelas horas de auxílio na elaboração deste projeto e aos amigos feitos durante a graduação, em especial ao Frederico Chedid Tomé, sem os quais essa longa caminhada teria sido muito mais difícil.

Um agradecimento em especial deve ser reservado à minha namorada, Helena Berlinski Iankileviz, que foi sempre uma figura de apoio e carinho nos momentos difíceis comuns no final da graduação. Paciente, ótima ouvinte e entusiasta do projeto, foi essencial companheira para que os resultados esperados fossem alcançados.

Iuri Sodré

RESUMO

O presente trabalho busca determinar, através da realização de ensaios mecânicos, os fatores de concentração de tensões em uma placa de material ortotrópico carregada axialmente à tração. Para tal, corpos de prova de fibra de carbono alinhadas e epoxi foram fabricadas no LADES, com a forma de placas retangulares com furos centralizados, um deles com carregamento alinhado com as fibras de carbono e outro com o carregamento perpendicular as fibras de carbono. *Strain gages* foram utilizados durante os ensaios para obter as deformações dos corpos de provas em pontos específicos e em conjunto com o modelo analítico-experimental estimar-se os fatores de concentração de tensões.

ABSTRACT

The present academic work aims to determine, through mechanical tests, the stress concentration factors of an orthotropic material plate axially loaded by traction. To do so, aligned carbon fiber test specimens were manufactured in LADES, in a rectangular shape with rounded holes, one of them with the load aligned with the carbon fibers and the other one with the load perpendicular to the carbon fibers. *Strain gages* were used throughout the tests to obtain the deformation of the test specimens in specific places and together with the analytical-experimental model to estimate the stress concentration factors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de um material compósito ([1] modificado).....	3
Figura 2 - Importância das necessidades de baixo custo e alto desempenho de compósitos em diferentes ramos da indústria. [5]	7
Figura 3 - Custos, taxa de produção e desempenhos estruturais relativos de compósitos utilizados na construção civil e na área biomédica. [5]	7
Figura 4 - Classificação hierárquica de compósitos sintéticos e naturais. ([5] modificado)	9
Figura 5 - Compósitos fibrosos. ([2] modificado).....	9
Figura 6 - Compósitos particulados. ([2] modificado)	10
Figura 7 - Compósito laminado. [2]	11
Figura 8 - Compósito bifásico. [5]	12
Figura 9 - Ciclo de cura. [5].....	14
Figura 10 - Tipos de falhas. [13]	18
Figura 11 Modos de ruptura. [13].....	19
Figura 12 - Ilustração dos modos de falha. [13].....	20
Figura 13 - Modos de falha em compósitos com descontinuidade geométrica. [13]	21
Figura 14 - Ensaio de tração. [2]	22
Figura 15 - Alongamento de uma barra tracionada no regime elástico. [5]	24
Figura 16 - Cubo submetido a cisalhamento puro no plano. [5]	25
Figura 17 - Diagramas $\sigma \times \epsilon$ para as barras A, B e C sob tração. [5].....	27
Figura 18 - Ensaio de torção e diagrama $\tau \times \gamma$ do material. [5]	27
Figura 19 - Efeitos das concentrações de tensões. [13].....	28
Figura 20 - Fator de concentração de tensões em placa de material isotrópico submetido ao esforço de tração. [13].	29
Figura 21 - Comportamento de uma lâmina isotrópica. [1]	30
Figura 22 - Comportamento de uma lâmina anisotrópica. [1]	31
Figura 23 - Comportamento de uma lâmina ortotrópica. [1].....	32
Figura 24 - Relações tensão-deformação em uma lâmina. ([1] modificado)	35
Figura 25 - Módulo de elasticidade na direção das fibras em função do V_F . [5]	35
Figura 26 - Variação do módulo de elasticidade perpendicular às fibras em função do V_F . [5]	37
Figura 27 - Esquema do posicionamento dos <i>strain gages</i>	39
Figura 28 - Fibra de carbono.	40
Figura 29 - Resina epóxi.	41
Figura 30 - Endurecedor.	42
Figura 31 - Aplicação do desmoldante.....	43
Figura 32 - Aplicação do epóxi.	43
Figura 33 - Prensa com aquecimento.....	44
Figura 34 - Configuração final da placa de fibra de carbono/epoxi.	45
Figura 35 - Placa de fibra de carbono marcada.	47
Figura 36 - Corpos de prova para ensaios a 0° após o corte com serra manual.	48
Figura 37 - Corpos de prova para ensaios a 90° após o corte com serra manual.	48
Figura 38 - Abertura do pré furo.	49
Figura 39 - Furo na dimensão final.	49
Figura 40 - Formato final do corpo de prova.	50
Figura 41 - Strain gage.	51
Figura 42 - Strain gages colados aos corpos de prova.....	51
Figura 43 - Soldagem dos contatos dos strain gages.....	51
Figura 44 - Montagem do ensaio.....	52

Figura 45 - Montagem do ensaio em detalhes.....	53
Figura 46 - Deformações no primeiro ensaio do corpo de prova a 0°.....	54
Figura 47 - Deformações no segundo ensaio do corpo de prova a 0°.....	55
Figura 48 - Deformações no terceiro ensaio do corpo de prova a 0°.....	55
Figura 49 - Deformações no primeiro ensaio do corpo de prova a 90°.....	57
Figura 50 - Deformações no segundo ensaio do corpo de prova a 90°.....	57
Figura 51 - Deformações no terceiro ensaio do corpo de prova a 90°.....	58
Figura 52 - Frações volumétricas.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de materiais compósitos ([1] modificado).....	4
Tabela 2 - Propriedades mecânicas para diferentes tipos de fibras. [6].....	6
Tabela 3 - Parâmetros utilizados.....	52
Tabela 4 - Deformações no ensaio a 0°.	56
Tabela 5 - Deformações no ensaio a 90°.	58
Tabela 6 - Comparação dos módulos de elasticidade.....	62

LISTA DE VARIÁVEIS

ε : deformação normal convencional
 L : comprimento final
 L_0 : comprimento inicial
 σ : tensão normal convencional
 τ : tensão de cisalhamento
 K : rigidez
 E : módulo de elasticidade
 ν : coeficiente de Poisson
 K_t : fator de concentração de tensão
 VF : fração volumétrica de fibras
 VM : fração volumétrica de matriz
 VV : fração volumétrica de vazios
 v_F : volume de fibras
 v_M : volume de matriz
 v_V : volume de vazios
 v_T : volume total
 M_M : fração mássica de matriz
 M_F : fração mássica de fibras
 m_M : massa de matriz
 m_F : massa de fibras
 m_T : massa total
 FF : sollicitação nas fibras
 FM : sollicitação na matriz
 σ_1 : tensão na direção longitudinal
 σ_F : tensão nas fibras
 σ_M : tensão na matriz
 E_1 : módulo de elasticidade na direção longitudinal
 E_F : módulo de elasticidade das fibras
 E_M : módulo de elasticidade da matriz
 E_2 : módulo de elasticidade na direção transversal
 G_{12} : módulo de cisalhamento
 E_{1f} : módulo de elasticidade das fibras na direção longitudinal
 E_{2f} : módulo de elasticidade das fibras na direção transversal
 E_{1m} : módulo de elasticidade da matriz na direção longitudinal
 σ_{max} : tensão máxima
 σ_{nom} : tensão nominal
 m_c : massa do compósito
 V_c : volume do compósito
 ρ_c : massa específica do compósito
 ε_0 : deformação no canal 0
 ε_1 : deformação no canal 1
 ε_3 : deformação no canal 3
 ε_4 : deformação no canal 4
 $K_t^{0^\circ}$: fator de concentração de tensões a 0°
 $K_t^{90^\circ}$: fator de concentração de tensões a 90°

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Justificativa	1
1.3. Objetivos	1
1.4. Metodologia e trabalho realizado.....	1
Capítulo 2: Revisão bibliográfica.....	3
2.1 Materiais compósitos.....	3
2.2. Histórico.....	5
2.3. Vantagens e aplicações.....	5
2.4. Características	8
2.4.1 Fibras.....	9
2.4.2 Partículas.....	10
2.4.3 Lâminas.....	11
2.4.4 Laminado.....	11
2.4.5 Homogeneidade.....	11
2.4.6 Heterogenia	12
2.5 Processos de Fabricação.....	12
2.6 Propriedades	14
2.6.1 Fibras.....	15
2.6.2 Matrizes.....	15
2.7 Mecanismos de falha.....	17
2.8.1 Ensaio de tração	22
Capítulo 3: Modelo Analítico-Experimental.....	24
3.1 Conceitos Básicos	24
3.1.1 Alongamento e distorções angulares.....	24
3.1.2 Tensões e deformações normais convencionais.....	25
3.1.3 Módulos de elasticidade (E) e de cisalhamento (G).....	26
3.1.4 Coeficiente de Poisson	27
3.2 Fator de Concentração de Tensões.....	28
3.3.1 Isotropia.....	30
3.3.2 Anisotropia.....	30
3.3.3 Ortotropia.....	31
3.4.1 Volume.....	32

3.4.2 Carga longitudinal	34
3.4.3. Carga transversal	36
Capítulo 4: Materiais e Métodos	40
4.1 Materiais.....	40
4.2 Fabricação do Compósito.....	42
4.3 Fração Volumétrica de Vazios	45
4.4 Corpos de Prova	46
4.5 Ensaios	50
Capítulo 5: Resultados	54
5.1 Estimativa do fator de concentração de tensões para placas compósitas com furo.....	54
5.2 Fator de concentração de tensões para materiais isotrópicos	59
5.3 Possíveis influências no fator de concentração de tensões.....	59
Capítulo 6: Conclusão	63
6.1 Sugestões para projetos subsequentes	63
Capítulo 7: Referências Bibliográficas	64
ANEXO I: Propriedades de Compósitos Unidirecionais	66
ANEXO II: Propriedades da Fibra de Carbono UC300.....	67
ANEXO III: Propriedades da Resina e do Endurecedor	69
ANEXO IV: Nomenclatura de strain gages	70

Capítulo 1: Introdução

1.1. Motivação

O estudo de materiais compósitos se faz relevante atualmente devido às diversas aplicações na engenharia mecânica, como por exemplo, na indústria aeronáutica. Materiais compósitos oferecem vantagens como alta resistência, alta rigidez e boa adaptabilidade às aplicações desejadas.

Uma vez que o uso de materiais compósitos têm participação cada vez maior nas aplicações dos projetos de engenharia mecânica, o tema foi escolhido para melhor preparar os autores para o exercício da engenharia mecânica na indústria atual.

1.2. Justificativa

O presente tema trata da obtenção experimental do fator de concentrações K_t de furos em placas de material ortotrópico através de ensaios de tração.

1.3. Objetivos

Este trabalho busca, por meio da realização de ensaios de tração em placas de material ortotrópico, obter deformações, experimentalmente, por meio da utilização de *strain gages* colados em pontos específicos dos corpos de prova, que em conjunto com um modelo analítico-experimental, servem para estimar o fator de concentração de tensões K_t para dois tipos de situação: fibras de carbono alinhadas com o carregamento e fibras de carbono perpendiculares ao carregamento.

1.4. Metodologia e trabalho realizado

A metodologia do presente trabalho baseia-se na realização de revisão bibliográfica, através do acesso a livros-texto, publicações, artigos e trabalhos de conclusão de curso.

Fabricação dos os corpos de prova (c.p.s) para serem submetidos aos ensaios deste projeto. Instrumentação dos c.p.s com *strain gages* e ensaios dos c.p.s a tração, em duas condições distintas: com as fibras de carbono alinhadas ao carregamento e com as fibras de carbono perpendiculares ao carregamento. Em sequência, os resultados experimentais foram analisados e em conjunto com o modelo analítico-experimental, foram estimados os fatores de concentração de tensões em tração.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica

Neste capítulo é feita uma breve introdução das terminologias utilizadas na área de dos materiais compósitos.

2.1 Materiais compósitos

Um material compósito é aquele que, em escala macroscópica, é um sistema constituído por duas ou mais fases. Em nível microscópico, tais fases possuem interfaces diferentes. O maior objetivo desta combinação de fases é atingir propriedades mecânicas melhores do que as que os materiais constituintes possuem separadamente.

Esta classe de material é disposta de maneira em que uma fase descontínua, chamada reforço, esteja inserida em um meio contínuo, chamado matriz. A primeira possui maior rigidez. Há, por vezes, a necessidade de uma terceira fase entre o reforço e a matriz, chamada de interfase. Isto ocorre devido a possíveis interações químicas entre as duas primeiras fases. A Figura 1 ilustra as fases de um material compósito.

O reforço é a fase que garante a estabilidade estrutural de um material compósito. Os

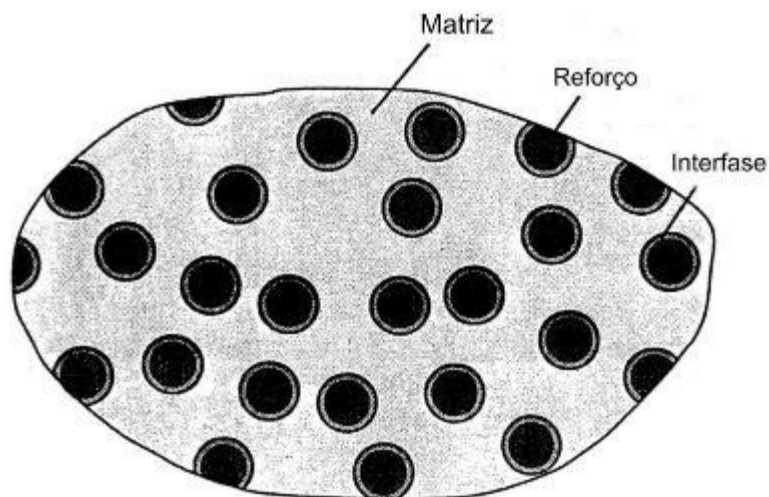


Figura 1 - Fases de um material compósito ([1] modificado).

constituintes mais utilizados são boro, vidro, carbono e Kevlar. Outros tipos, como alumina, alumínio, carboneto de silício, nitreto de silício e titânio também são empregados. O reforço é comumente encontrado na forma de fibras que possuem uma geometria contínua e alongada, com diâmetros reduzidos (3-200 μm).

A função da matriz é suportar, proteger e separar as fibras. Ela permite que as tensões aplicadas sejam redistribuídas ao longo das fibras. Além disso, possuem menor densidade e menor resistência quando também comparadas às fibras. As matrizes mais comuns são compostas de carbono, cerâmica, vidro, metal e polímeros. A Tabela 1 exemplifica diferentes tipos de materiais compósitos.

Tabela 1 - Tipos de materiais compósitos ([1] modificado).

Tipo de compósito	Fibra	Matriz
Polímero	Vidro Carbono Kevlar Boro	Epóxi Poli-imida Poliéster Termoplásticos
Metal	Boro Carbono Carboneto de silício Alumina	Alumínio Magnésio Titânio Cobre
Cerâmica	Carboneto de silício Alumina Nitreto de silício	Carboneto de silício Alumina Vidro-cerâmico Nitreto de silício
Carbono	Carbono	Carbono

2.2. Histórico

O emprego de materiais compósitos é observado desde a antiguidade, havendo registros de uso de compensados, papel machê e tijolos de argila com reforços de palha no antigo Egito. Da mesma forma, as antigas civilizações Inca e Maia utilizavam fibras de plantas para fortalecer seus tijolos. Espadas e armaduras eram banhadas em metais para aumentar sua resistência nos tempos medievais. Um exemplo é a espada samurai, que era produzida por sucessivas dobras, sendo remodelada para formar um compósito multicamadas. Os esquimós utilizam musgo para fortalecer o gelo na formação dos iglus. Da mesma maneira, não é incomum encontrar crina de cavalo melhorando o desempenho de placas de gesso. A indústria automotiva introduziu o uso de compósitos em larga escala com o Chevrolet Corvette [2]. Todos esses são exemplos de materiais compósitos artificiais. O bambu e os ossos são bons exemplos de compósitos encontrados na natureza. O tecido muscular é um laminado fibroso multidirecional. Existem muitos outros exemplos de materiais compósitos naturais e artificiais.

Mais recentemente, o desenvolvimento na área de compósitos permitiu aplicações em diversas áreas, desde a indústria aeronáutica até produtos biomédicos.

2.3. Vantagens e aplicações

Compósitos apresentam uma ampla gama de características aplicáveis a diversas demandas de design e solicitação, uma vez que oferecem variadas opções de resposta às solicitações, como pode se ver pela imensa variação no módulo de elasticidade e na resistência à tração entre os materiais na Tabela 2. A tabela fornece uma faixa de valores para cada fibra, pois as propriedades do material podem variar de acordo com o processo de fabricação utilizado.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas para diferentes tipos de fibras. [6]

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Algodão	16 – 21	1,5 – 1,6	287 – 597	5,5 – 12,6	7 – 8
Juta	200	1,3	393 – 773	26,5	1,5 – 1,8
Linho	---	1,5	345 – 1035	27,6	2,7 – 3,2
Cânhamo	---	---	690	---	1,6
Rami	---	1,5	400 – 938	61,4 – 128	3,6 – 3,8
Sisal	50 - 300	1,45	511 – 635	9,4 – 22	3 - 7
Coco	100 - 450	1,15 – 1,45	131 - 175	4 – 13	15 - 40
Vidro – E	8 - 14	2,5	2000 - 3500	70	1,8 – 3,2
Vidro – S	10	2,5	4590	86	5,7
Kevlar-49	12	1,48	2800 – 3792	131	2,2 – 2,8
Carbono	7 - 10	1,6 – 1,9	4000	230 – 240	1,4 – 1,8

Os compósitos são atrativos para diversos tipos de utilização. Como a direção da fibra pode ser alterada ao longo da espessura do laminado, a resposta de um componente pode ser adaptada para atender a requisitos específicos. Projetar um componente com coeficiente de expansão térmica nulo pode ser importante para aplicações espaciais onde um lado da estrutura pode ser exposto à temperaturas extremamente altas enquanto o outro lado experimenta temperaturas muito mais baixas.

Compósitos tendem a apresentar melhores propriedades mecânicas, mas apresentam um elevado ônus financeiro. Tanto as matérias-primas quanto os processos de fabricação são mais custosos que materiais convencionais e quanto maior é a demanda de desempenho estrutural, maior deverá ser o gasto esperado, conforme ilustrado na Figura 2.

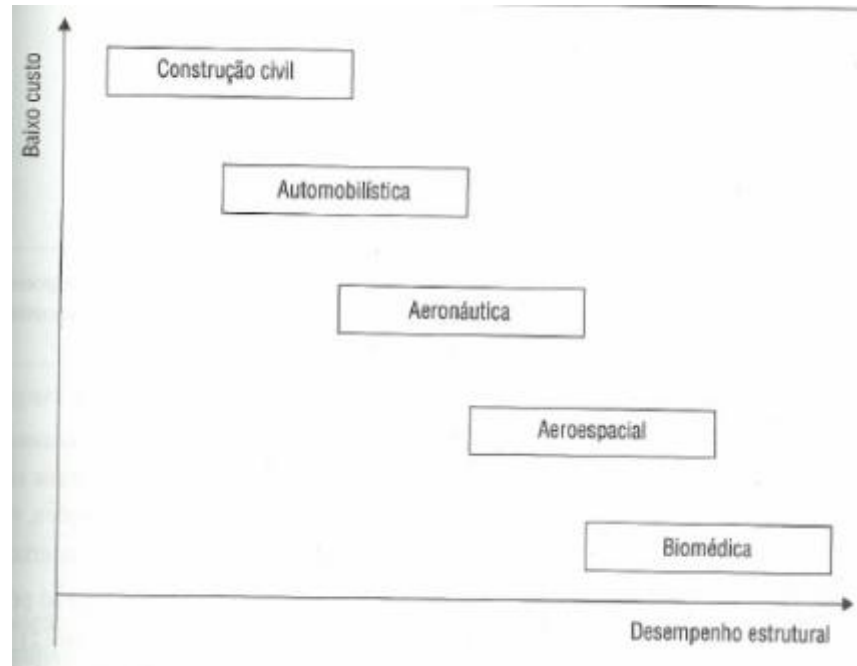


Figura 2 - Importância das necessidades de baixo custo e alto desempenho de compósitos em diferentes ramos da indústria. [5]

Além disso, um segundo fator também tem considerável influência nos custos de utilização de um compósito: a demora na produção. A produção de materiais para os setores aeronáutico e aeroespacial é mais lenta e permite o uso de polímeros termorrígidos, enquanto os setores automobilístico e de construção civil demanda maior velocidade na produção e grandes volumes, como mostra a Figura 3.

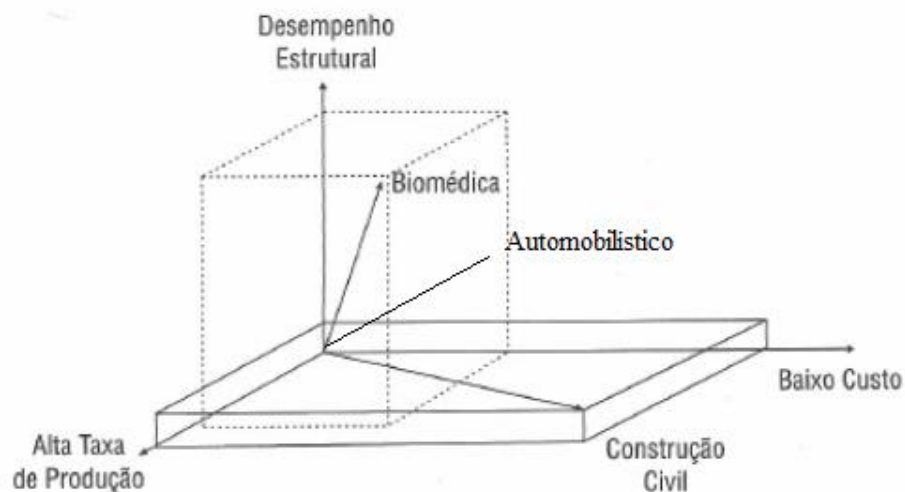


Figura 3 - Custos, taxa de produção e desempenhos estruturais relativos de compósitos utilizados na construção civil e na área biomédica. [5]

Atualmente, diversos estudos são realizados com o objetivo de encontrar novas aplicações de materiais compósitos em áreas já estabelecidas, como a indústria aeronáutica e a de construção civil. A busca por materiais mais resistentes e com um custo de fabricação menor quando comparados a materiais tradicionais são fatores que motivam a realização de tais estudos.

Macedo *et al.* (2011) buscou encontrar, de forma mais econômica e menos agressiva ao meio ambiente, um material compósito à base de gesso e isopor que possuísse características térmicas suficientes para serem utilizados como tijolos na construção de moradias populares. A motivação por trás deste estudo foi o grande déficit nas condições habitacionais de várias regiões do Brasil. Com desenvolvimentos nesse campo, é possível baratear o custo dos materiais e ao mesmo tempo oferecer melhores condições sociais.

A área ambiental também foi positivamente afetada por desenvolvimentos na área de compósitos. Hao Wang *et al.* (2015) realizaram trabalhos com compósitos verdes, visto a necessidade de um maior emprego de materiais reutilizáveis e biodegradáveis. Materiais naturais como fibras de cânhamo, linho e sisal foram estudados buscando substituir o emprego de recursos não renováveis.

Na indústria aeronáutica, a tendência atual é a substituição de materiais como alumínio por compósitos poliméricos reforçados. Mangalgiri (1999) aponta as principais vantagens do uso de compósitos como o peso reduzido, resistência à fadiga e corrosão, versatilidade na fabricação de peças e a capacidade de manter a estabilidade em operação.

2.4. Características

As características de um material compósito variam de acordo com as propriedades de seus constituintes, como também de sua geometria e de sua distribuição de fases. A proporção do reforço é um dos parâmetros mais importantes, influenciando diretamente na uniformidade e homogeneidade do material e, conseqüentemente, em suas propriedades mecânicas. Mudanças na geometria afetam a anisotropia do material.

Quanto maior a quantidade de reforço, mais resistente será o compósito. Entretanto, um aumento muito grande do mesmo pode levar a problemas com a matriz, que não será suficiente para mantê-lo em posição. Não obstante, diversos fatores podem influenciar na composição correta, tais como os esforços esperados, ou ainda o processo de fabricação.

Os materiais compósitos costumam ser classificados de acordo com o tipo de reforço utilizado. Em um contexto bem amplo, os compósitos podem ser divididos em sintéticos, principal enfoque deste projeto, e naturais. Em ambas as categorias, os reforços podem consistir-se de fibras ou partículas. Considerando-se as diferentes classes relacionadas com as várias opções de matriz, pode-se estratificar a classificação, conforme visto na Figura 4.

2.4.1 Fibras

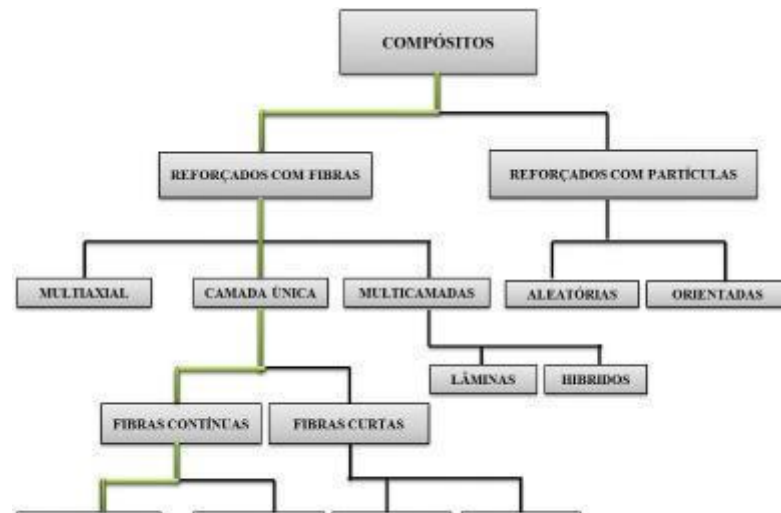


Figura 4 - Classificação hierárquica de compósitos sintéticos e naturais. ([5] modificado)

Um compósito fibroso pode consistir tanto de fibras contínuas como de fibras curtas (picadas) suspensas em uma matriz. Ambos os tipos de fibra podem ser identificados pelo ponto de vista geométrico: fibras contínuas possuem uma relação comprimento/diâmetro muito elevada. Elas são geralmente mais fortes e rígidas que o material particulado. Já as fibras picadas são fibras pequenas e espessas, ou seja, com baixa relação comprimento/diâmetro.

Compósitos reforçados com fibras descontínuas ou picadas podem ser produzidos de forma que o reforço tenha orientação tanto aleatória como orientada. Sistemas compostos

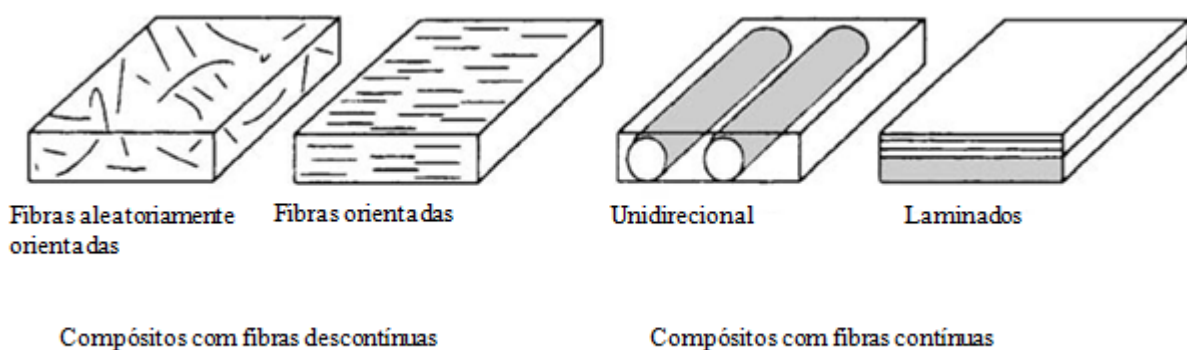


Figura 5 - Compósitos fibrosos. ([2] modificado)

por reforços de fibras descontínuas são considerados compósitos de camada única. As descontinuidades podem gerar uma resposta anisotrópica às solicitações impostas ao material, mas em muitos casos as fibras aleatoriamente orientadas produzem compostos quase-isotrópicos. Por outro lado, compósitos com fibras contínuas podem ser tanto de camada única como multicamadas. Os compósitos reforçados com fibras contínuas que apresentam camada única podem ser unidirecionais ou bidirecionais, enquanto os multicamadas são geralmente denominados laminados. A resposta de um compósito de fibras contínuas é geralmente ortotrópica. Ambos os tipos de compósitos fibrosos são ilustrados na Figura 5.

2.4 2 Partículas

Um compósito particulado é composto por partículas de qualquer forma, tamanho ou configuração suspensas em uma matriz. Concreto é um exemplo comum de um compósito de reforço particulado. Há duas subclasses de partículas: flocos e preenchidos.

Um reforço em flocos é em geral composto por flocos com elevada razão área superficial/espessura, suspensos em uma matriz. Já um compósito preenchido é composto por um esqueleto contínuo que atua como matriz, preenchido por um segundo material. A resposta de um material particulado pode ser anisotrópica ou ortotrópica. A Figura 6 ilustra isto.

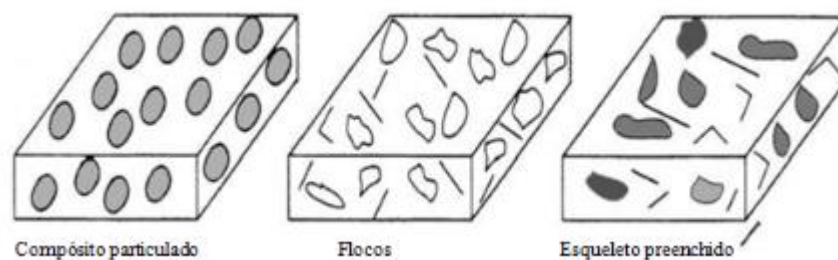


Figura 6 - Compósitos particulados. ([2] modificado)

2.4.3 Lâminas

Uma lâmina é um arranjo plano (ou às vezes curvo) de fibras uni ou bidirecionais suspenso em uma matriz. É usual considerar uma lâmina como um material ortotrópico e sua espessura depende do material do qual é feita.

O estudo das lâminas considera apenas uma camada de fibras contida na espessura da lâmina. Este é apenas um modelo e não uma representação verdadeira do arranjo de fibras.

2.4.4 Laminado

Um laminado é um agrupado de lâminas, conforme ilustrado na Figura 7, orientado de uma maneira específica para apresentar os resultados desejados. Dependendo da aplicação desejada, as lâminas em um laminado podem ser iguais ou podem ser de materiais diferentes com espessuras diferentes, como por exemplo, uma camada de carbono seguida de uma camada de vidro. Neste caso, são denominados de compósitos híbridos.

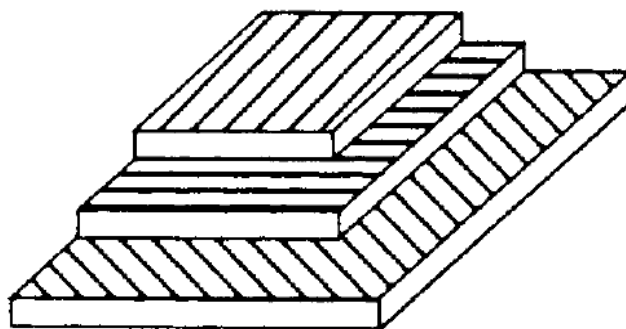


Figura 7 - Compósito laminado. [2]

2.4.5 Homogeneidade

Característica de um compósito que apresenta as mesmas propriedades em toda sua extensão. A magnitude da homogeneidade do material pode variar de acordo com a escala e proporção dos componentes e dependendo do volume a ser analisado. Se pouca variação existir entre pontos quando avaliados em escala macroscópica, o material é dito como semi-homogêneo.

2.4.6 Heterogenia

Característica de um compósito cujas propriedades variam quando analisadas em diferentes pontos do corpo. Assim como no caso da homogeneidade, varia de acordo com a escala e proporção dos componentes e dependendo do volume a ser analisado. Conforme a escala diminui um mesmo material pode ser classificado como homogêneo, semi-homogêneo ou heterogêneo.

Na Figura 8 observa-se um compósito bifásico. Embora este possa ser considerado homogêneo e anisotrópico numa escala macroscópica (sua composição é simétrica e organizada da mesma forma em diversos pontos, mas suas propriedades variam de acordo com a orientação), em escala microscópica este seria definido como heterogêneo e isotrópico, uma vez que possui propriedades diferentes se avaliado nos volumes característicos denotados por (a) e (b) na Figura 8

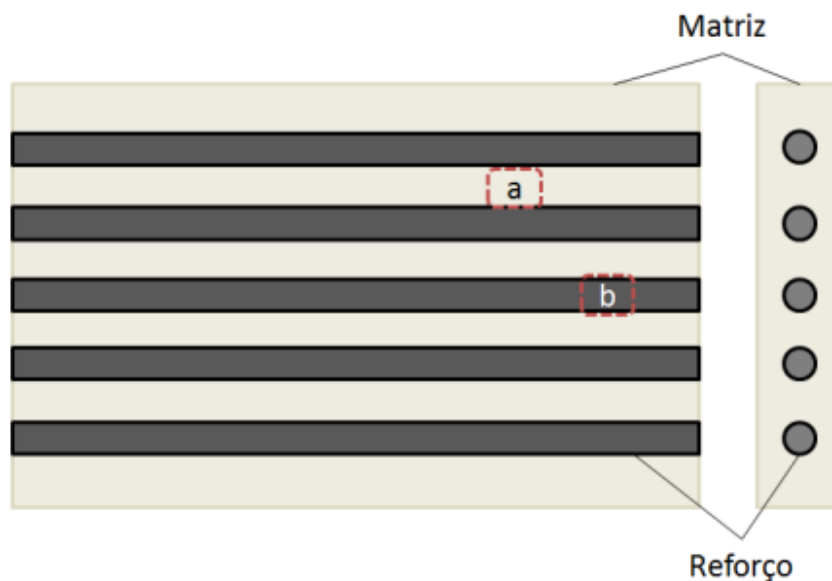


Figura 8 - Compósito bifásico. [5]

2.5 Processos de Fabricação

O processo de fabricação utilizado é de extrema importância para a indústria, uma vez que corresponde a 50 - 60% do custo total de um compósito [2]. Existem diversos processos de fabricação de compósitos e as diferenças entre eles se devem aos processos de transformação físico-química a que são sujeitas a matriz na fase de moldagem. Em compósitos termorrígidos, por exemplo, as matrizes passam por um processo físico-químico de cura, enquanto as matrizes termoplásticas passam por estágios em que são submetidas ao

amolecimento e fusão, iniciais, para conformação na cavidade do molde e posterior solidificação.

De acordo com Richardson [3], há sete processos principais para formação de compósitos de matrizes poliméricas: moldagem, fundição, termoconformação, expansão, revestimento e radiação. Dentro desses processos existem diversas técnicas e subprocessos que podem ser utilizados.

Vinson e Sierakowski [4], mostram algumas técnicas primárias para fabricação de matrizes metálicas e não-metálicas, assim como compósitos de fibras curtas.

A placa de compósito que deu origem aos corpos-de-prova foi produzida por meio da técnica de moldagem em prensa, que é caracterizada pela compactação do semi-manufaturado com elevadas cargas. Esse processo se inicia com a disposição e empilhamento do reforço, na forma de mantas bidirecionais e/ou tecidos unidirecionais, em orientações pré-determinadas, sobre o molde. Inicialmente deve-se tratar a superfície do molde por meio da aplicação de um produto desmoldante, para remoção da peça após o processo de cura. A cada camada de reforço sobreposta é efetuada a impregnação com a mistura resina-endurecedor. A espessura do componente moldado é obtida pelo número de camadas sobrepostas.

A moldagem de compósitos em prensa apresenta limitações quanto ao tamanho do componente produzido, sendo este limitado ao tamanho do molde que a prensa comporta.

Após a pré-impregnação das lâminas, deve-se empilhá-las sobre o molde da prensa. A orientação das fibras é definida previamente no projeto do componente. A prensa é basicamente uma estufa pressurizada, onde são realizadas as operações de cura do pré-impregnado, como visto na Figura 9.

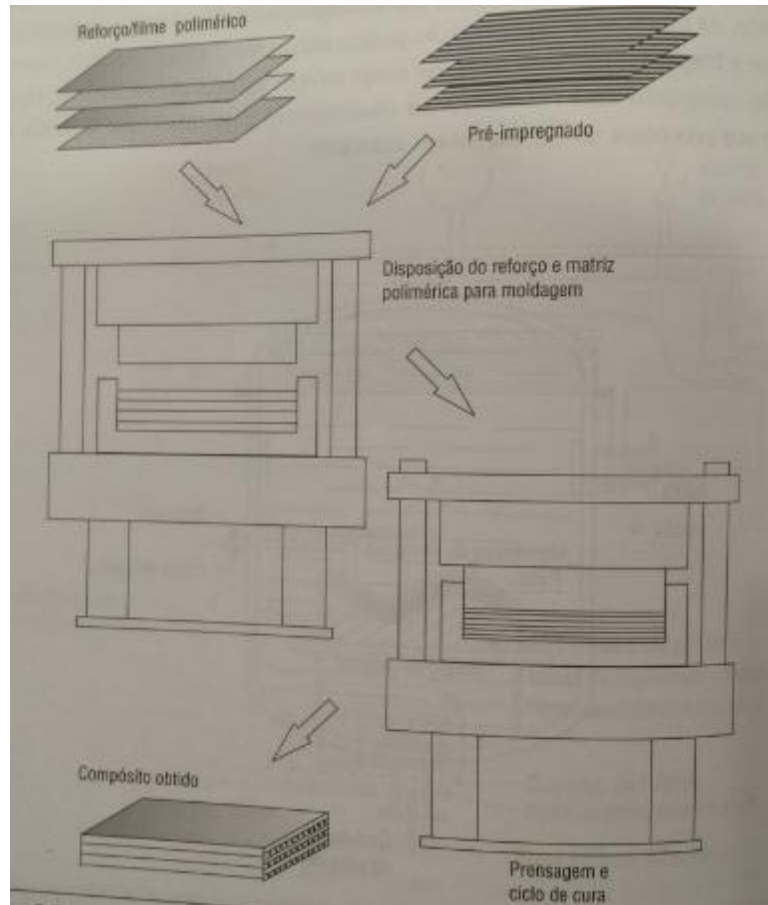


Figura 9 – Ciclo de cura. [5]

A cura pode ocorrer à temperatura ambiente ou em estufa, dependendo do tipo de resina utilizada ou da necessidade pós-cura. O processo de moldagem manual dá origem a compósitos sem grandes compromissos estruturais e que apresentam fração volumétrica de reforço menor que 40%. Nestes compósitos são observadas frações volumétricas de vazios de cerca de 15%.

2.6 Propriedades

Os compósitos poliméricos apresentam, em sua maioria, comportamento linear e elástico até atingirem sua tensão de falha. Sendo assim, o conhecimento de suas propriedades elásticas é essencial, pois através delas pode-se relacionar as tensões mecânicas e as deformações que ocorrem em um material. Uma das principais vantagens da micromecânica, a qual basicamente é uma técnica de homogeneização, é possibilitar o cálculo das propriedades elásticas de um compósito a partir das propriedades elásticas de seus constituintes, desde que as frações volumétricas dos mesmos sejam conhecidas.

2.6.1 Fibras

Há uma grande variedade de fibras disponíveis para serem utilizadas no reforço. As características almejadas são uma alta resistência e alta rigidez, bem como uma baixa densidade. O tipo de fibra mais adequado será definido de acordo com o emprego desejado. A Tabela mostra algumas propriedades para diferentes tipos de fibras.

Tabela 3 - Propriedades de fibras. ([1] modificado)

Tipo	Fabricante	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm ³)
Fibra de vidro E	Corning	3450	72,5	2,54
Fibra de vidro S	Corning	4480	85,6	2,49
Fibra de carbono AS4	Hercules	3730	235	1,81
Fibra de carbono HTS	Hercules	2830	248	1,82
Kevlar	DuPont	3800	131	1,45
Carboneto de silício Nicalon	Nippon Carbon	2070	172	2,60
Alumina FP-2	DuPont	1725	380	3,80

2.6.2 Matrizes

Há quatro tipos de matrizes conhecidas: polimérica (que pode ser curada à baixas ou altas temperaturas), metal (usadas em operações até 800°C), cerâmica e carbono (usadas para temperaturas acima de 1000°C).

A matriz mais comum é a polimérica, que pode ser termorrígida (ou termoendurecíveis) ou termoplástica, diferenciada pela forma como as cadeias macromoleculares se dispõem.

No caso dos polímeros termoplásticos, as cadeias moleculares são feitas por meio de ligações de Van der Waals ou por pontes de Hidrogênio, que se rompem durante o aquecimento, resultando na fusão do material. Após o resfriamento, as ligações entre as moléculas são refeitas, de modo que as ligações covalentes entre os monômeros que formam as moléculas não se desfazem. Com isso, pode-se concluir que os termoplásticos são mais facilmente reciclados ou remodelados na presença de aquecimento. Além disso, os termoplásticos não precisam passar por processo de cura, embora não apresentem boa estabilidade térmica e dimensional. Outro ponto ao qual se deve atentar é o fato de que, após muitos ciclos de aquecimento seguido de resfriamento, o termoplástico se deteriora, perdendo assim algumas de suas propriedades, como a alta resistência ao impacto [1].

Alguns exemplos de polímeros termoplásticos são o polietileno, o polipropileno, o polimetil-metacrilato (acrílico) e o policloreto de vinil (PVC).

Por outro lado, as matrizes termorrígidas apresentam elevada estabilidade térmica e, por tal motivo, são muito mais utilizadas. Tal estabilidade se dá por conta das ligações covalentes, responsáveis por ligações cruzadas entre as moléculas, que proporcionam uma rigidez muito maior à estrutura. Ao serem aquecidos, esses polímeros assumem uma estrutura tridimensional e reticulada, tornando-se insolúveis e infusíveis.

As matrizes termorrígidas podem ser resinas poliéster, epóxi, fenólicas, poliimidadas ou bismaleimidadas.

As resinas epóxi, tipo de matriz escolhido para o compósito fabricado, são compostas por ao menos dois grupos epóxi terminais por molécula. Tais resinas apresentam alto desempenho e são utilizadas em diversos setores da indústria, como na indústria eletroeletrônica e na de embalagens, assim como em equipamentos para a indústria química e laminados elétricos. Os maiores produtores de epóxi no mundo são a Shell, a Dow Química e a Huntsman [1].

Durante o processamento das resinas, usualmente são usados agentes de cura. Existe uma enorme gama de agentes que podem ser utilizados de acordo com o ciclo de processamento, uma vez que o tipo de agente escolhido determina o tipo de reação de cura que ocorre e influencia a cinética de cura e o ciclo de processamento (variação da viscosidade ao longo do tempo de cura).

A utilização de modificador para aperfeiçoar as resinas termorrígidas pode ser com o intuito de facilitar o processamento ou de alterar suas propriedades, tendo em vista aplicações específicas. De forma geral, adicionar diluentes é um procedimento comum

quando são utilizadas resinas de alta viscosidade (>5 Pa.s) ou mesmo resinas sólidas para processo de impregnação de fibras de reforço.

2.7 Mecanismos de falha

Até aqui, o comportamento elástico dos compósitos foi discutido sob um ponto de vista macroscópico. Ao analisar fenômenos de falha e a resistência de uma lâmina, é importante entender inicialmente os mecanismos e processos de falha dentro dos componentes do compósito e seu efeito no comportamento macroscópico final. Por esse motivo, a micromecânica das falhas é analisada nesse tópico.

Com o intuito de reduzir a complexidade das equações na análise micromecânica de um compósito, é comum adotar algumas simplificações. A matriz é considerada homogênea, isotrópica e de comportamento linear e elástico. Já as fibras, além de homogêneas, lineares elásticas e isotrópicas, são tratadas também como perfeitamente alinhadas e igualmente espaçadas entre si. Estas simplificações possibilitam, por exemplo, a utilização da Lei de Hooke nas relações tensão-deformação entre fibras e matriz [5].

Do ponto de vista macroscópico, as lâminas do compósito são consideradas homogêneas, lineares e elásticas, ortotrópicas, e inicialmente livres de tensões residuais.

Sabe-se também que os compósitos se deformam sob variações de temperatura e ao absorverem ou liberarem umidade. Assim, após um processo de cura a quente como o utilizado no presente projeto, sempre aparecerão tensões induzidas por tais variações, também conhecidas como tensões higrotérmicas. Tais efeitos também serão desprezados na análise, assim como a contração da matriz durante a polimerização (cerca de 2% para o epóxi).

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.

Os mecanismos de falha variam com o tipo de carga e estão intimamente ligados às propriedades dos constituintes. Os processos são discutidos a seguir para diferentes tipos de carregamento. Para efeito de análise, foram definidos como direção 1 o eixo coordenado paralelo às fibras, e como direção 2 o eixo coordenado perpendicular às fibras. Uma vez que as fibras são mais resistentes que a matriz, a lâmina possui módulo de elasticidade maior na direção 1 ($E_1 > E_2$). Quando o esforço atua na direção paralela às fibras, entende-se que o funcionamento do conjunto fibra-matriz atua de forma análoga a um sistema de molas em paralelo. Já em um eventual carregamento na direção 2, o conjunto atua como um sistema de molas em série, onde a contribuição das fibras na rigidez do sistema é mínima.

Os tipos de falhas estão diretamente relacionados com a orientação das fibras e a direção de aplicação do carregamento e podem ser de três tipos: interlaminar, intralaminar e translaminar, como mostrado na Figura 10.

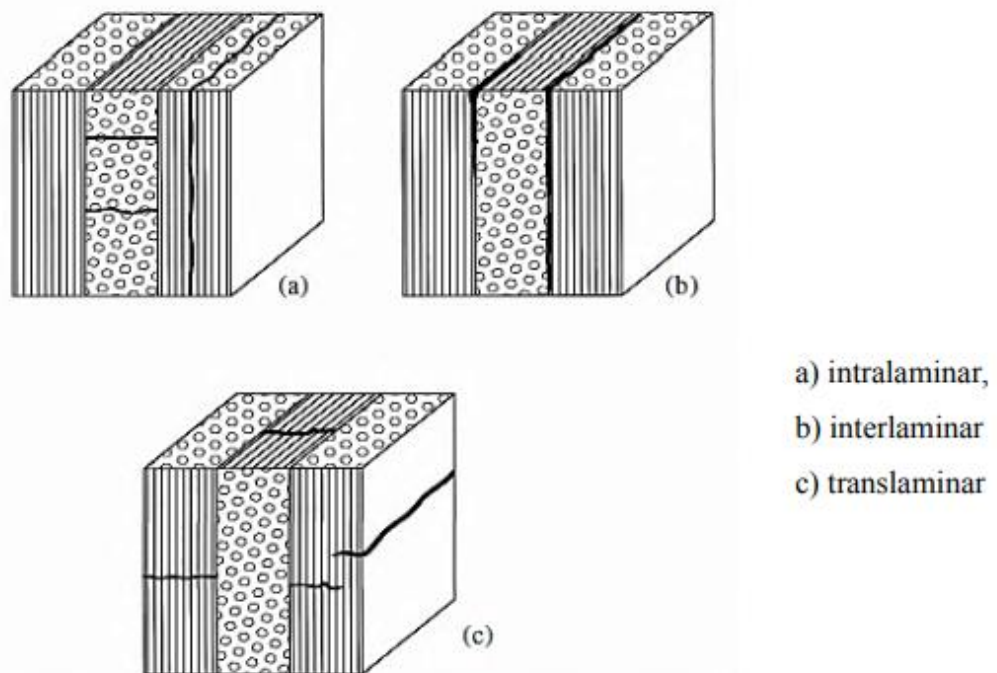


Figura 10 - Tipos de falhas. [13]

É usual que um compósito danificado apresente um ou mais desses modos de falha e, por isso, é de extrema importância entender por meio de quais modos o material falha e em que sequência [5]. A superfície de fratura é a principal fonte de referência para se determinar a causa da falha, uma vez que nela está detalhadamente registrada a história dos danos ou, ao menos, de parte deles, 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 ilustrados na Figura 11 e pode ocorrer das seguintes formas: tração (modo I), cisalhamento (modo II) ou rasgamento (modo III).

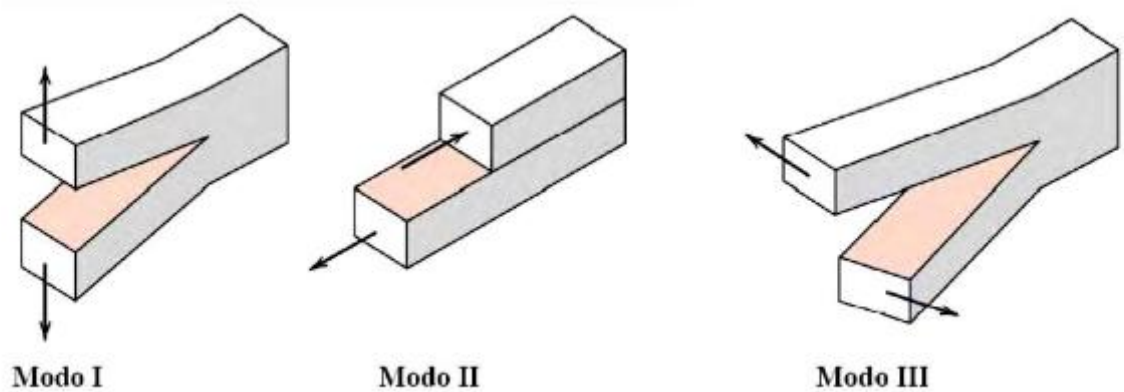


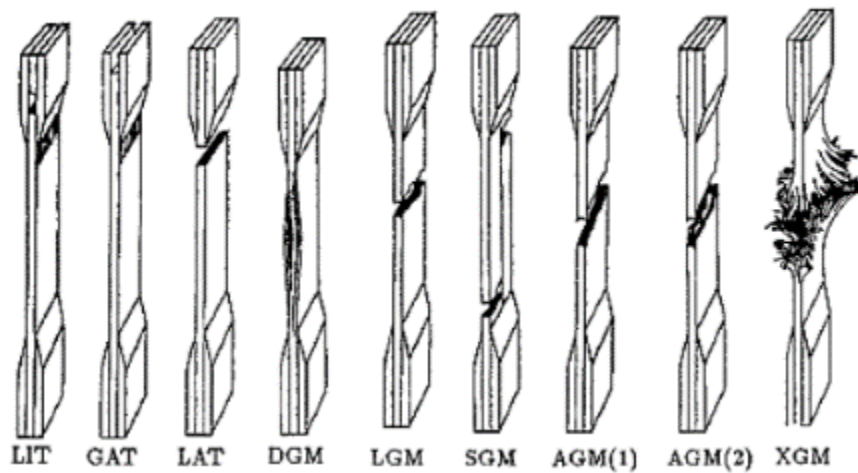
Figura 11 Modos de ruptura. [13].

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 [5].

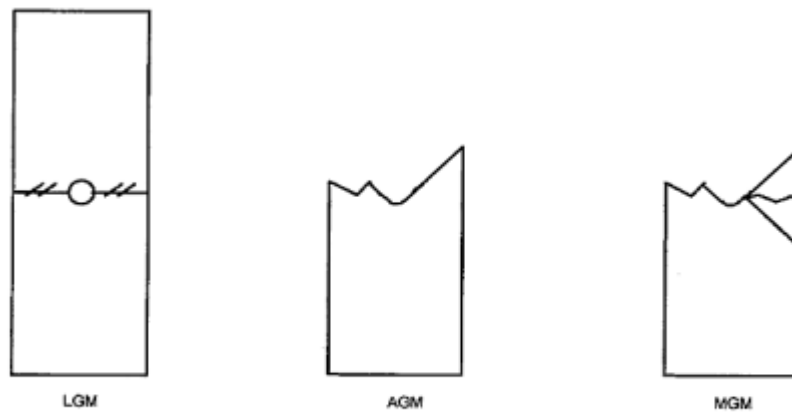
Segundo a norma ASTM D 5766-11, a fratura final em laminados com presença de descontinuidades geométricas (entalhes e furos) sempre deverá ocorrer na seção da área com presença dessas descontinuidades. Na Tabela e na Figura 12 têm-se a codificação do modo de falha para o ensaio de tração uniaxial segundo a norma ASTM D 3039-14, ou seja, para laminados com ou sem a presença de descontinuidades geométricas.

Tabela 4 - Codificação dos modos de falha. [13]

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 12** - Ilustração dos modos de falha. [13].

Para laminados compósitos com descontinuidade geométrica, a norma ASTM D5766 – 11 define três modos de falhas aceitáveis, conforme detalhado na Tabela 5 e ilustrado na Figura 13.



Fonte ASTM D5766 – 2011

Figura 13 - Modos de falha em compósitos com descontinuidade geométrica. [13]

Tabela 5 - Codificação dos modos de falha em compósitos com descontinuidade geométrica. [13] .

DENOMINAÇÃO	FALHA
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 exibe múltiplos modos de falha em várias camadas. Várias trincas e delaminações presentes.

2.8 Ensaios mecânicos em lâminas

A determinação experimental das propriedades físicas e mecânicas de um material compósito difere dos demais materiais devido às características ortotrópicas.

Diferentes métodos para ensaios são encontrados na literatura, como ensaios de tensão, compressão, cisalhamento e flexão. Neste trabalho será discutido apenas o ensaio de tração.

2.8.1 Ensaio de tração

Para ensaios de tração em materiais ortotrópicos, utiliza-se a norma ASTM D3039. Esta define o ensaio como a aplicação de uma carga em uma única direção sobre um corpo de prova de espessura fina. É possível definir, a partir da falha do material, propriedades como a força necessária para a ruptura, o deslocamento ocorrido até a ruptura, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Além disso, a utilização de *strain gages* permite avaliar a deformação de pontos determinados durante o ensaio. Um esquema deste tipo de ensaio é ilustrado na Figura 14.

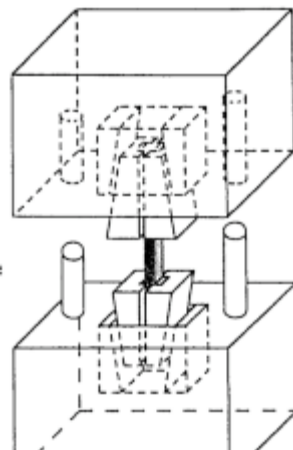


Figura 14 - Ensaio de tração. [2]

Os corpos de prova para ensaios de tração em materiais compósitos necessitam ser fabricados de modo que a força aplicada sobre as fibras possa atuar em diferentes orientações, como 0° e 90° . Com isso, é possível obter cada uma das propriedades referentes à orientação escolhida.

As dimensões apropriadas do corpo de prova variam conforme a orientação das fibras. A Tabela 6 dispõe as dimensões mínimas para cada orientação. Além disso, é necessário que o corpo de prova tenha um comprimento suficientemente longo para que os c.p.s não escorreguem das garras.

Tabela 6 - Dimensões mínimas de um corpo de prova. ([11] modificado)

Orientação das fibras	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)
0°	15	250	1,0
90°	25	175	2,0

Capítulo 3: Modelo Analítico-Experimental

Neste capítulo serão apresentados tanto os conceitos básicos de mecânica dos sólidos quanto o modelo analítico-experimental utilizado para transformar deformações obtidas experimentalmente em tensões para posterior cálculo do fator de concentração de tensões em tração.

3.1 Conceitos Básicos

Alguns conceitos básicos [5] são introduzidos neste item, e definições de variáveis de mecânica dos sólidos são apresentadas a seguir:

3.1.1 Alongamento e distorções angulares

Sendo L_0 o comprimento inicial de uma barra com seção circular de diâmetro inicial d_0 , conforme mostrado na Figura 15. Ao ser submetida a esforços trativos F na direção normal abaixo de seu limite de escoamento, a barra sofrerá um aumento de comprimento longitudinal, $\delta = (L - L_0)$, e uma contração transversal, $\delta_T = (d_0 - d)$ tal que L e d são os comprimento e diâmetro após a aplicação da força. Como os esforços não ultrapassaram o limite de escoamento do material, se os mesmos forem aliviados, a barra retorna às dimensões iniciais.

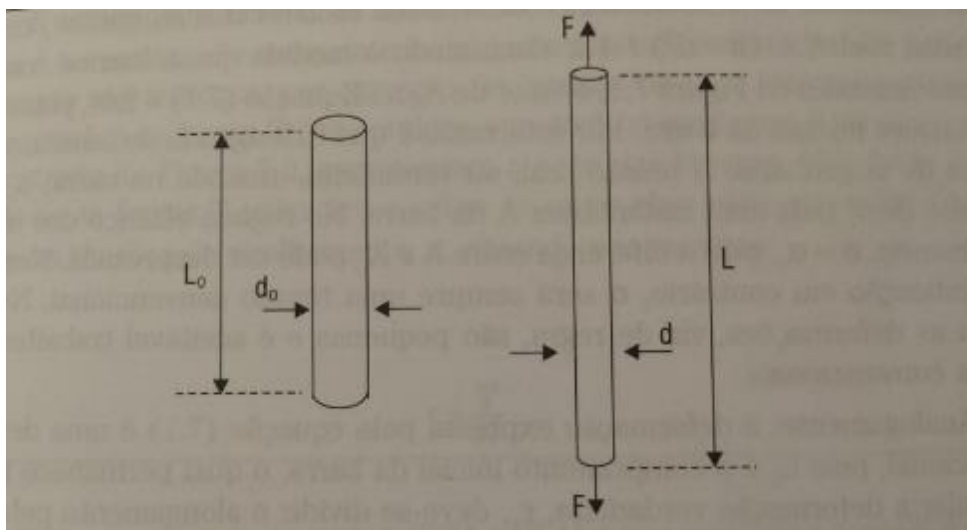


Figura 15 – Alongamento de uma barra tracionada no regime elástico. [5]

Ao se analisar o aumento de comprimento longitudinal, ou alongamento, em relação ao comprimento inicial da barra, é comum utilizar uma grandeza adimensional conhecida como deformação normal convencional, ε , conforme indicado pela Equação 1:

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (1)$$

Há também outro tipo relevante de sollicitação mecânica: os esforços cortantes ou de cisalhamento, aplicados paralela ou tangencialmente à superfície analisada. Um cubo de material isotrópico sob efeito de forças cisalhantes denominadas T tangenciais às suas faces, como visto na Figura 16, não terá as medidas das suas arestas alteradas, sendo assim a distorção o único efeito das forças T, ou seja, os ângulos retos de seus vértices serão modificados em pares. Estas distorções são conhecidas como distorções angulares (γ) ou deformações de cisalhamento, medidas em radianos.

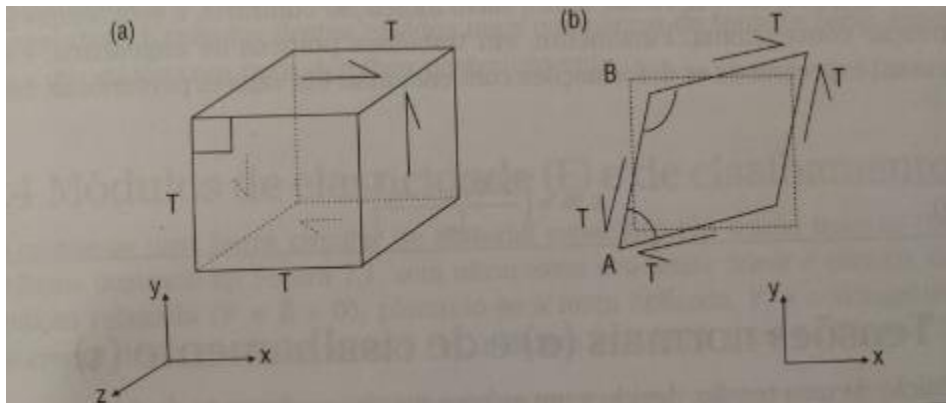


Figura 16 – Cubo submetido a cisalhamento puro no plano. [5]

3.1.2 Tensões e deformações normais convencionais

A área inicial da seção transversal mostrada na Figura 15 é $A_0 = (\pi \cdot d_0^2)/4$. A tensão normal convencional σ é

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

A tensão normal convencional é assim chamada por ser uma convenção, ou seja, algo idealizado e tratado como real, embora nem sempre o seja, uma vez que durante a aplicação da força, a área da seção transversal diminui, fazendo com que um valor mais real seja encontrado ao se utilizar a área instantânea ao invés da área inicial. Para o regime de

escoamento, no entanto, as deformações são muito pequenas, sendo assim aceitável desprezar a diferença entre A e A_0 .

Analogamente, é comum fazer tal aproximação para a deformação normal convencional, usualmente expressa em valores percentuais:

$$\varepsilon\% = 100 \cdot \frac{L-L_0}{L_0} \quad (3)$$

Para esforços cisalhantes, a única diferença é a direção de aplicação da força, que neste caso é aplicada paralelamente à área A . Assim, a tensão de cisalhamento τ pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (4)$$

3.1.3 Módulos de elasticidade (E) e de cisalhamento (G)

Para uma barra tracionada, como mostrado na Figura 15, a rigidez K é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade do material e à área da seção transversal da barra, e inversamente proporcional ao seu comprimento, ou seja:

$$K = \frac{E \cdot A_0}{L_0} \quad (5)$$

Como na maioria das aplicações práticas os materiais atuam em regime elástico, conhecer o módulo de elasticidade é de extrema importância, uma vez que este quantifica a rigidez de um material, e é um parâmetro imprescindível quando se quer calcular as deformações e pode também ser obtido a partir da inclinação do diagrama $\sigma \times \varepsilon$, como visto na Figura 17. A equação que modela este comportamento é chamada de Lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

Quanto maior seu valor, maior é o esforço necessário para deformar o material, tendo o diamante, extremamente rígido, um módulo de 1000 GPa, por exemplo [5].

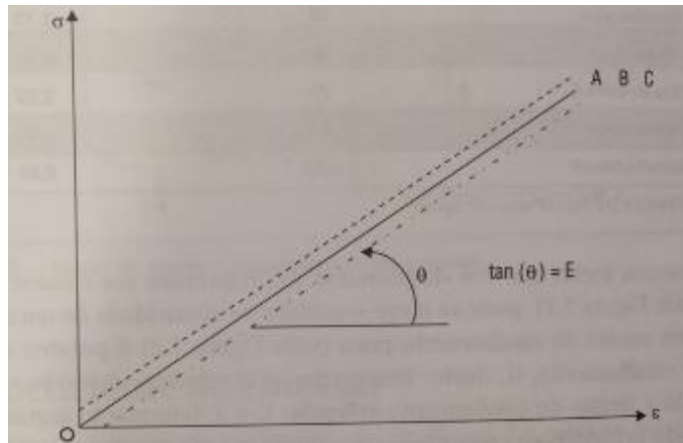


Figura 17 – Diagramas σ x ϵ para as barras A, B e C sob tração. [5]

Assim como o diagrama σ x ϵ referente ao ensaio de tração uniaxial permite obter o módulo de elasticidade E , um ensaio de cisalhamento puro permite encontrar o módulo de cisalhamento G , por meio de um diagrama da tensão de cisalhamento aplicada, τ , e a deformação angular, γ . Um modo prático de se obter tais valores é por meio do ensaio de torção pura em cilindros de parede fina, como mostra a Figura 18.

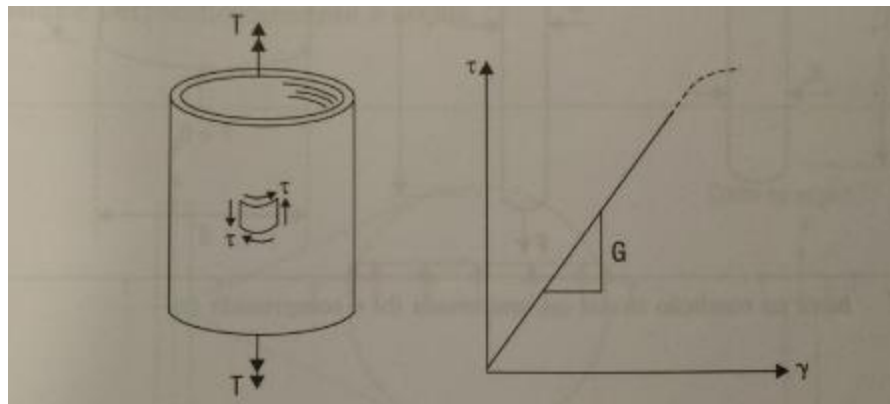


Figura 18 – Ensaio de torção e diagrama τ x γ do material. [5]

3.1.4 Coeficiente de Poisson

Diversos materiais costumam conservar parcialmente seus volumes iniciais durante um processo de deformação elástica, seja ele trativo ou compressivo. Dessa forma, ao alongar uma barra, seu diâmetro é reduzido, assim como ao comprimir uma barra, seu diâmetro tende a aumentar. Tal efeito é fenômeno como “efeito Poisson”.

Sob cargas uniaxiais, a deformação associada à variação do diâmetro $\delta \cdot t = d - d_0$, ou seja, $\epsilon_T = (\delta \cdot t)/d_0$, é chamada de deformação transversal, e possui sinal oposto à

deformação normal. Dessa forma, o coeficiente de Poisson (razão entre as deformações transversal e normal), apresentará sempre sinal negativo, conforme a equação:

$$\nu = - \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (7)$$

3.2 Fator de Concentração de Tensões

O comportamento de compósitos laminados com concentradores de tensões é de grande importância devido à redução da resistência e a redução da vida útil proveniente do crescimento do dano em torno dessas concentrações. Distribuição de tensões no entorno de furos e entalhes podem ser estudadas por meio de análises lineares elásticas, seja pelo método dos elementos finitos ou empiricamente.

Métodos experimentais utilizando *strain gages* e revestimentos fotoelásticos têm se provado úteis no estudo da deformação e falha em compósitos laminados com furos circulares e entalhes de vários tamanhos. A abordagem utilizada consiste em carregar lâminas de corpos de prova compósitos com entalhes ou furos sob tensão uniaxial.

A Figura 19 ilustra os efeitos da concentração de tensões em tração em uma placa de material isotrópico.

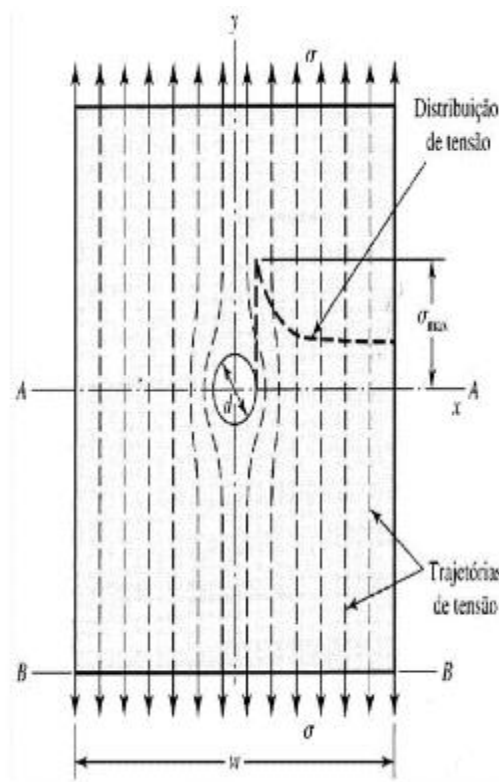


Figura 19 - Efeitos das concentrações de tensões. [13]

Para materiais isotrópicos, o fator concentração de tensões K_t depende apenas da geometria da peça e tipo de carregamento e é definido por meio da equação à seguir:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \quad (8)$$

Onde σ_{max} é a tensão máxima na borda do entalhe e σ_0 é a tensão nominal. Os efeitos de um furo central no K_t para um material isotrópico são mostrados na Figura 20. Ao observar o gráfico, percebe-se que para corpos-de-prova de mesma largura, o aumento na proporção entre o diâmetro do furo e a largura da placa provoca um decréscimo do K_t .

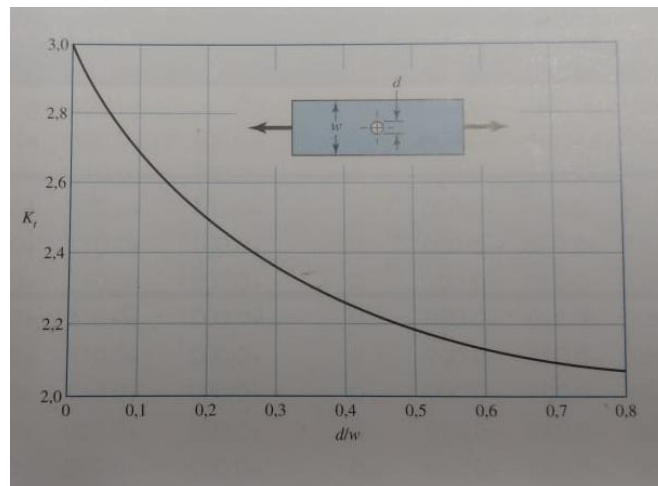


Figura 20 – Fator de concentração de tensões em placa de material isotrópico submetido ao esforço de tração. [13].

Tendo como base o diagrama da Figura 20, o fator de concentração de tensões K_t para materiais isotrópicos em tração é encontrado por meio da equação

$$K_t = 3,00 - 3,13 \cdot \left(\frac{2r}{D}\right) + 3,66 \cdot \left(\frac{2r}{D}\right)^2 - 1,53 \cdot \left(\frac{2r}{D}\right)^3 \quad [13]$$

3.3 Propriedades Direcionais dos Materiais

3.3.1 Isotropia

Característica de um material compósito cujas propriedades físicas são as mesmas em qualquer direção analisada. O comportamento de uma lâmina compósita isotrópica sujeita a esforços axiais e cortantes, assim como as equações que o descrevem, são mostradas na Figura 21.

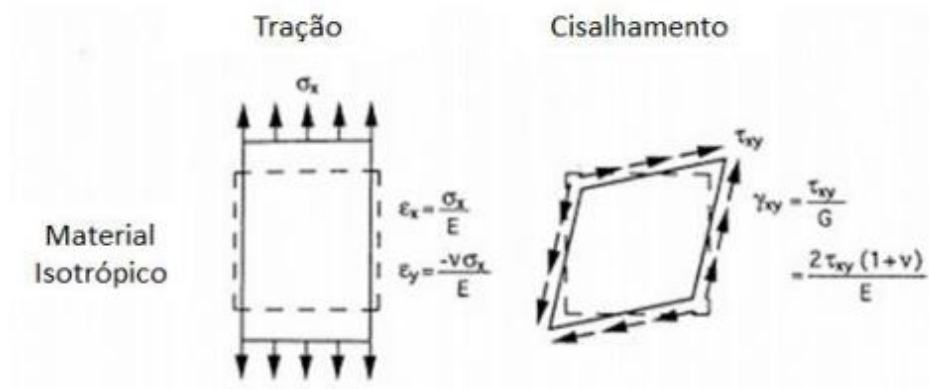


Figura 21- Comportamento de uma lâmina isotrópica. [1]

Onde:

$\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$: Deformações axiais, transversais e cisalhantes, respectivamente

σ_x : Tensão axial normal

ν : Coeficiente de Poisson

τ_{xy} : Tensão cisalhante

G: Módulo de cisalhamento

E: Módulo de elasticidade

3.3.2 Anisotropia

Característica de materiais compósitos cujas propriedades físicas variam com a direção ou eixos de referência. Se as propriedades permanecem constantes e simétricas em relação a um plano, este pode ser chamado de plano de simetria do material.

Materiais podem possuir diversos planos de simetria, sendo que um material com infinitos planos de simetria é definido como perfeitamente isotrópico, enquanto um material com zero planos de simetria é dito anisotrópico ou alotrópico.

O comportamento de uma lâmina compósita anisotrópica sujeita a esforços axiais e cortantes, assim como as equações que o descrevem, são mostradas na Figura 22.

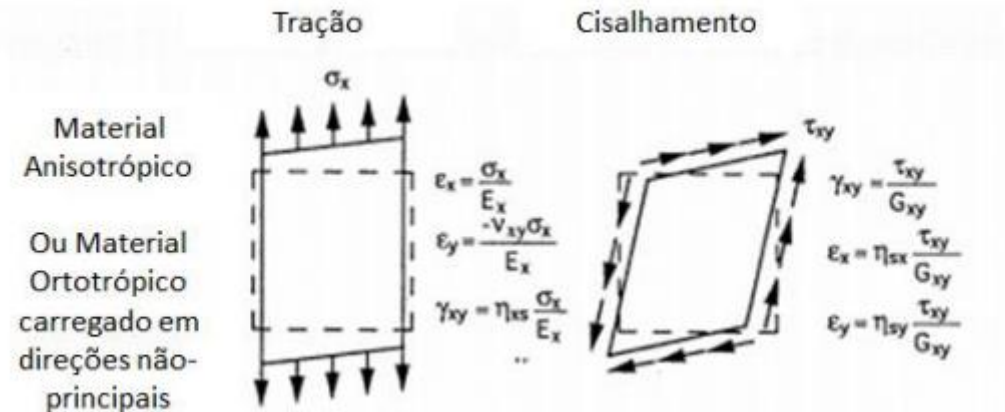


Figura 22 - Comportamento de uma lâmina anisotrópica. [1]

Onde:

ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} : Deformações axiais, transversais e cisalhantes, respectivamente

σ_x : Tensão axial normal

E_x : Módulo axial na direção x

ν_{xy} : Coeficiente de Poisson associado ao carregamento na direção x, e a tensão na direção y

τ_{xy} : Tensão cisalhante

G_{xy} : Módulo de cisalhamento referente aos planos x e y

E_x : Módulo de elasticidade na direção x

η_{xs} : Módulo de cisalhamento combinado

3.3.3 Ortotropia

Característica de materiais compósitos que possuem pelo menos três planos de simetria mutuamente perpendiculares, com suas interseções sendo chamadas de eixos principais. Materiais ortotrópicos possuem propriedades especiais, e sua análise matemática possui um grande número de simplificações matemáticas que os tornam interessantes enquanto objetos de estudo. Trata-se de um caso especial de anisotropia.

O comportamento de uma lâmina compósita ortotrópica sujeita a esforços axiais e cortantes, assim como as equações que o descrevem, são mostradas na Figura 23.

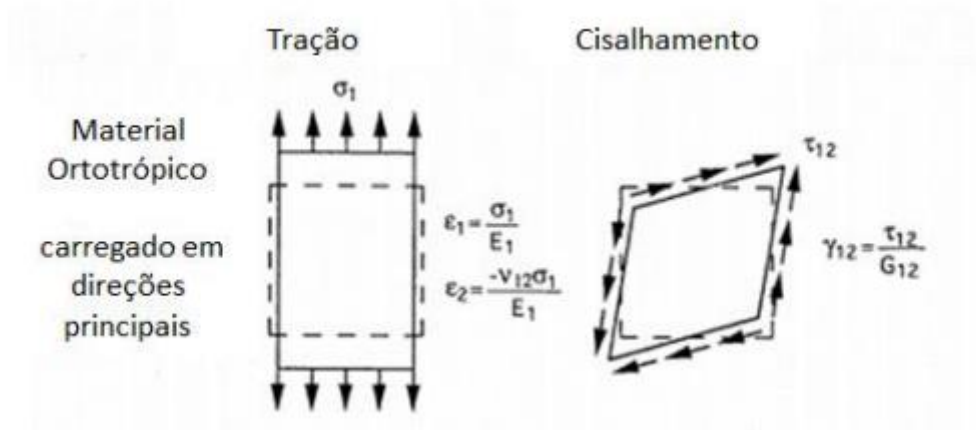


Figura 23 - Comportamento de uma lâmina ortotrópica. [1]

Onde:

ϵ_1 , ϵ_2 , γ_2 : Deformações axiais, transversais e cisalhantes, respectivamente

σ_1 : Tensão axial normal

E_1 : Módulo de elasticidade na direção 1

ν_{12} : Coeficiente de Poisson

G_{12} : Módulo de cisalhamento

As características dos materiais compósitos também podem ser avaliadas de acordo com sua escala, adotando-se um ponto de vista macro ou micromecânico. O primeiro considera o material homogêneo, ainda que anisotrópico, utilizando propriedades médias. Na avaliação micromecânica, as interações em um nível microscópico são estudadas, tais como falhas na matriz, nas fibras ou na interfase. Neste nível, as características locais são de suma importância, impossibilitando a utilização de propriedades médias [5].

3.4 Conceitos de Placas Compósitas

3.4.1 Volume

Em um compósito, o volume do material V_T é dado pela soma do volume de fibras V_F e volume matriz V_M com o volume de vazios V_V , isto é, o espaço ocupado por bolhas de ar e gases resultantes do processo de cura.

$$V_T = V_F + V_M + V_V \quad (9)$$

Sendo assim, as razões volumétricas dos constituintes são dadas por:

$$V_F = \frac{V_F}{V_T} \quad (10)$$

$$V_M = \frac{V_M}{V_T} \quad (11)$$

$$V_V = \frac{V_V}{V_T} \quad (12)$$

Através de medidas feitas no laboratório, obtém-se as massas dos constituintes e, a seguir, estima-se as frações em massa destes. A seguir, utiliza-se a massa específica dos elementos utilizados para obter o volume dos mesmos.

Com o intuito de simplificar as análises, se o compósito for considerado de boa qualidade, permite supor que a fração de vazios é desprezível e, com isso, assumir que a massa total do compósito (m_T) é a soma da massa de fibra (m_F) e matriz (m_M). Sendo assim, as frações mássicas das fibras (M_F) e da matriz (M_M) são:

$$M_F = \frac{m_F}{m_T} \quad (13)$$

$$M_M = \frac{m_M}{m_T} \quad (14)$$

Considera-se a matriz homogênea e isotrópica, com comportamento mecânico linear e elástico. Já as fibras, além de homogêneas, lineares elásticas e isotrópicas, são consideradas paralelas umas às outras e igualmente espaçadas entre si, de modo que a Lei de Hooke possa ser aplicada.

Para estimativas rápidas, é comum desprezar a fração volumétrica de vazios, por ser normalmente baixa. Logo,

$$V_F + V_M = 1 \quad (15)$$

3.4.2 Carga longitudinal

Quando uma carga é aplicada longitudinalmente em um compósito, isto é, na direção paralela às fibras, tem-se que uma parte da carga (FF) irá solicitar mecanicamente as fibras, enquanto o restante solicitará a matriz (FM). Ou seja,

$$F = FF + FM \quad (16)$$

Decompondo as forças nos produtos tensão-área da seção, tem-se que:

$$\sigma_1 \cdot A = \sigma_F \cdot AF + \sigma_M \cdot AM \quad (17)$$

Onde:

σ_1 é a tensão na direção longitudinal;

σ_F é a tensão que atua nas fibras;

σ_M é a tensão que atua na matriz;

A é a área total da seção transversal da lâmina;

AF é a área referente às fibras;

AM é a área referente à matriz;

Como os comprimentos das fibras, da matriz e da lâmina são iguais, pode-se considerar AF/A e AM/A, quando multiplicadas pelo comprimento no numerador e no denominador, iguais às frações em volume de fibra (V_F) e de matriz (V_M), respectivamente. Logo,

$$\sigma_1 = \sigma_F \cdot V_F + \sigma_M \cdot V_M \quad (18)$$

Segundo a Lei de Hooke, a tensão em uma direção é dada pelo produto do módulo de elasticidade e da deformação nessa mesma direção. Substituindo e assumindo que as deformações da lâmina, das fibras e da matriz são as mesmas, chega-se enfim à Regra das Misturas:

$$E_1 = E_F \cdot V_F + E_M \cdot V_M \quad (19)$$

ou ainda,

$$E_1 = E_F \cdot V_F + E_M \cdot (1 - V_F) \quad (20)$$

Ao analisar a Equação 20, nota-se que o módulo de elasticidade longitudinal cresce linearmente na medida em que o volume de fibras aumenta e, com isso, a falha sob carga longitudinal está diretamente ligada à quantidade de fibra no compósito, como pode ser visto no gráfico da Figura 24.

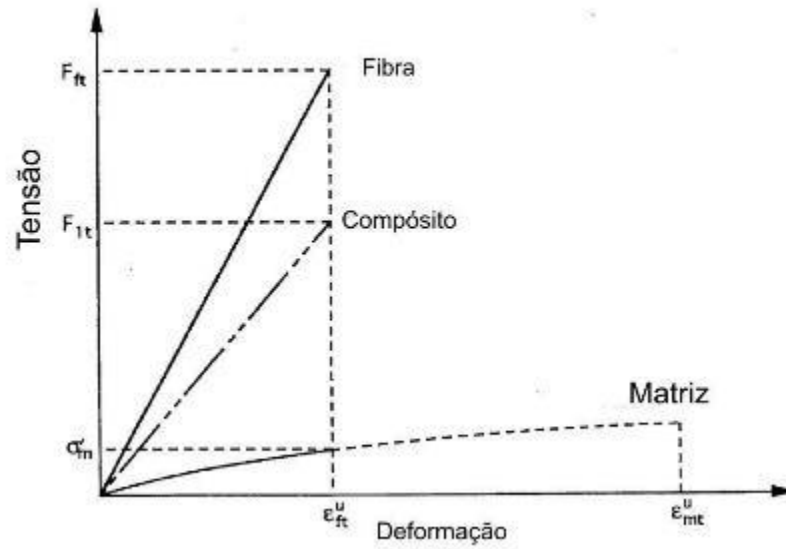


Figura 24 - Relações tensão-deformação em uma lâmina. ([1] modificado)

Plotando-se E_l em função de V_F , encontra-se o diagrama presente na Figura 25. Para compósitos desenvolvidos por meio de impregnação manual e cura em bolsa de vácuo, costuma-se obter $V_F \sim 50\%$ e, para pré-impregnados, bem como empregando-se bolsa de vácuo e autoclave durante a cura, $V_F \sim 70\%$.

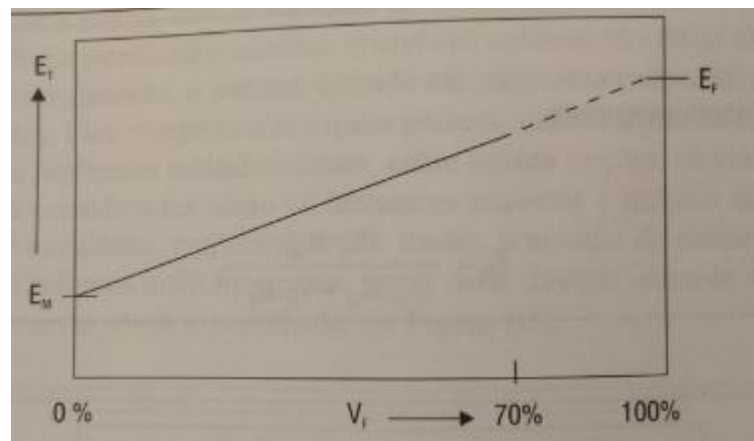


Figura 25 - Módulo de elasticidade na direção das fibras em função do V_F . [5]

3.4.3. Carga transversal

Uma vez que a carga é aplicada na direção 2 do compósito, ou seja, normal às fibras, o conjunto atua como molas em série. Nessa situação, o alongamento da lâmina δ_2 será a soma dos alongamentos das fibras (δ_F) e da matriz (δ_M). Como o alongamento é o produto da deformação perpendicular pelo comprimento inicial ($\Delta L = \varepsilon \cdot L$), então:

$$\varepsilon_2 = \frac{\delta_F}{L_2} \cdot \varepsilon_{2F} + \frac{\delta_M}{L_2} \cdot \varepsilon_{2M} \quad (21)$$

Onde,

δ_F é o comprimento parcial referente às fibras;

δ_M é o comprimento parcial referente à matriz;

L_2 é o comprimento total da lâmina;

e ε_2 , ε_{2F} e ε_{2M} são as respectivas deformações.

Uma vez que a área da seção transversal não varia na lâmina, (δ_F / L_2) e (δ_M / L_2) são, respectivamente, iguais às frações em volume de fibra e de matriz, pode-se reescrever a equação 21,

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_F}{E_F} + \frac{V_M}{E_M} \quad (22)$$

Neste caso, o módulo de elasticidade na direção 2 aumenta de forma não-linear com o aumento do volume relativo de fibras e, para frações volumétricas até cerca de 50%, tal aumento é significativamente reduzido, podendo ser desprezado em alguns casos. Quando se deseja um valor aproximado de E_2 , é comum utilizar a aproximação $E_2 \sim E_M$. A Figura 26 destaca tal afirmação.

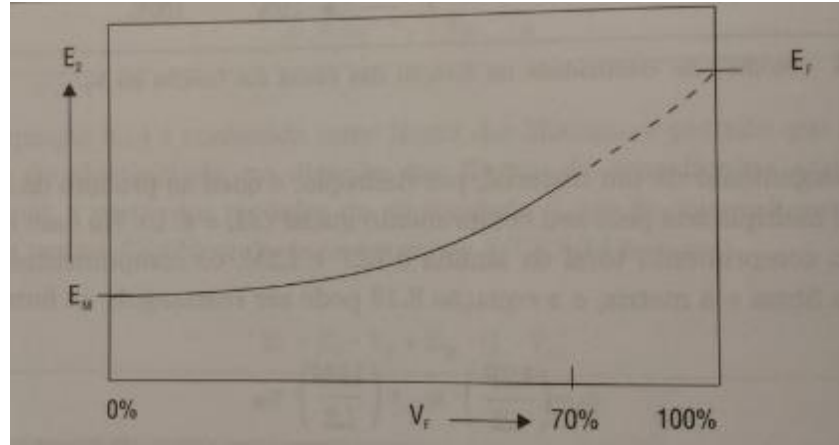


Figura 26 - Variação do módulo de elasticidade perpendicular às fibras em função do VF. [5]

Analogamente, pode-se utilizar a equação anterior para encontrar o módulo de cisalhamento:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_F}{G_F} + \frac{V_M}{G_M} \quad (23)$$

Uma lâmina com reforço unidirecional apresenta também dois coeficientes de Poisson. O maior deles, ν_{12} , ocorre quando a tensão normal é aplicada na direção 1 das fibras, e o menor, ν_{21} , quando a mesma é perpendicular às fibras. A variação do maior coeficiente de Poisson de uma lâmina, ν_{12} , com a fração volumétrica de fibras, V_F , é linear, ou seja:

$$\nu_{12} = V_F \cdot \nu_F + V_M \cdot \nu_M \quad (24)$$

Para encontrar o menor coeficiente, ν_{21} , deve-se utilizar a seguinte equação:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{\nu_{21}} \quad (25)$$

3.5 Modelo Analítico-experimental

A seguir será deduzido um modelo analítico-experimental [5] para o cálculo dos fatores de concentração de tensão avaliados experimentalmente.

$$\sigma_1 = Q_{11} \cdot \varepsilon_A + Q_{12} \cdot \varepsilon_B \quad (26)$$

As matrizes Q_{11} e Q_{12} são definidas por:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-(\nu_{12} \cdot \nu_{21})} = \frac{E_1}{1-(\nu_{12} \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot \nu_{12})} = \frac{E_1}{1-(\nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1})} \quad (27)$$

$$Q_{12} = \frac{v_{12} \cdot E_2}{1 - (v_{12} \cdot v_{21})} = \frac{v_{12} \cdot E_2}{1 - (v_{12} \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot v_{12})} = \frac{v_{12} \cdot E_2}{1 - (v_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1})} \quad (28)$$

Tem-se que a relação entre os coeficientes de Poisson e os módulos de elasticidade em ambas as direções é:

$$\frac{v_{12}}{E_1} = \frac{v_{21}}{E_2} \quad (29)$$

Ou ainda,

$$v_{21} = \frac{E_2}{E_1} \cdot v_{12} \quad (30)$$

Então,

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{1 - (v_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1})} \cdot \varepsilon_A + \frac{v_{12} \cdot E_2}{1 - (v_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1})} \cdot \varepsilon_B \quad (31)$$

Como,

$$E_1 = V_f \cdot E_{1f} + V_m \cdot E_{1m} \quad (32)$$

$$E_2 = \frac{E_{2f} \cdot E'_m}{V_f \cdot E'_m + V_m \cdot E_{2f}} \quad (33)$$

Onde

$$E'_m = \frac{E_{1m}}{1 - v_{12m}^2} \quad (34)$$

e

$$v_{12} = V_f \cdot v_{12f} + V_m \cdot v_{12m} \quad (35)$$

Onde

$$E_{1f} = 135 \text{ GPa} \quad (36)$$

$$E_{2f} = 10 \text{ GPa} \quad (37)$$

$$E_{1m} = 43 \text{ GPa} \quad (38)$$

$$v_{12f} = 0,30 \quad (39)$$

$$v_{12m} = 0,27 \quad (40)$$

$$V_m = 0,3 \quad (41)$$

$$V_f = 0,7 \quad (42)$$

$$E_1 = 0,7 \cdot 135 + 0,3 \cdot 43 = 107,4 \text{ GPa} \quad (43)$$

$$E_2 = \frac{10 \cdot 46,38}{0,7 \cdot 46,38 + 0,3 \cdot 10} = 13,08 \text{ GPa} \quad (44)$$

$$E'_m = \frac{43}{1 - 0,27^2} = 46,38 \text{ GPa} \quad (45)$$

Então,

$$\sigma_{max} = \frac{E_1}{1 - (v_{12}^2 \frac{E_2}{E_1})} \cdot |\varepsilon_0| + \frac{v_{12} \cdot E_2}{1 - (v_{12}^2 \frac{E_2}{E_1})} \cdot |\varepsilon_3| \quad (46)$$

$$\sigma_{nom} = \frac{E_1}{1 - (v_{12}^2 \frac{E_2}{E_1})} \cdot |\varepsilon_1| + \frac{v_{12} \cdot E_2}{1 - (v_{12}^2 \frac{E_2}{E_1})} \cdot |\varepsilon_4| \quad (47)$$

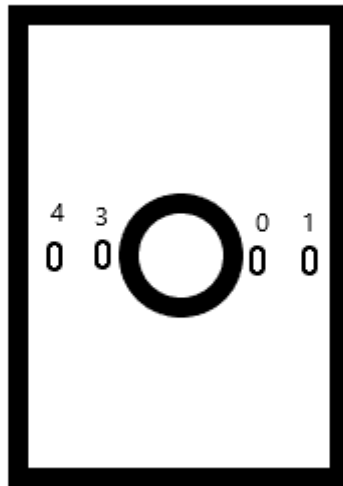


Figura 27 – Esquema do posicionamento dos *strain gages*.

[Fonte: Elaborada pelo autor]

Capítulo 4: Materiais e Métodos

Neste capítulo aborda-se os materiais utilizados na realização deste trabalho, a fabricação das placas para corte dos corpos de prova e também os ensaios realizados para a obtenção dos resultados.

4.1 Materiais

Para a fabricação do compósito a ser utilizado nos ensaios deste trabalho, o reforço escolhido foi a fibra de carbono, encontrado na forma de tecido no modelo UC 300 fabricado pela Barracuda, disponível no LADES do CEFET/RJ, que pode ser observada na Figura 28. Esta fibra é unidirecional a 0 grau, possui uma resistência de 400 GPa, e peso de 300 g/m². As fibras de carbono podem ser classificadas de acordo com o tipo de precursor, com a resistência, com o módulo de elasticidade, ou ainda, quanto à temperatura de tratamento térmico final.



Figura 28 - Fibra de carbono.

Trata-se de um tecido unidirecional com filamentos de alta resistência (240 GPa) com 48.000 filamentos e trama com costura transversal, o que proporciona rápida impregnação das fibras. Devido à construção alinhada na direção principal (0°), o tecido proporciona baixa porosidade e impregnação homogênea, aumentando o teor de fibras no

laminado. Essas características contribuem para uma alta resistência estrutural e um bom acabamento superficial [12].

A matriz utilizada para a placa foi do tipo epóxi. O produto também foi fabricado pela Barracuda, e consiste de uma resina modelo AR 260, misturada a um endurecedor AH 260 na proporção 100:26, ambos ilustrados na Figura 29 e na Figura 30. A escolha do endurecedor AH-260 foi motivada por este ser o ideal para trabalhar com um epóxi de baixa viscosidade como o AR-260, uma vez que tal sistema, se curado durante 6h a 80°C, apresenta alta resistência mecânica e módulo de elasticidade.



Figura 29 - Resina epóxi.



Figura 30 - Endurecedor.

Os volumes empregados na fabricação seguiram a proporção de 70% de matriz e 30% de fibras. Considerando as massas de cada componente na mesma proporção, foram empregados 95,45 g de fibra de carbono e 222,72 g de matriz.

4.2 Fabricação do Compósito

A fabricação da placa foi realizada no LADES com o auxílio do professor orientador e da equipe técnica que trabalha no laboratório, utilizando os materiais e os equipamentos disponíveis no laboratório como uma prensa com aquecimento.

Antes da preparação das placas, foi realizada uma limpeza na prensa a ser utilizada, pois esta apresentava resíduos de utilizações anteriores. Para isso, as placas de alumínio que fazem parte do equipamento foram retiradas e à elas foi aplicado um desmoldante com a finalidade de retirar o material impregnado. Este é um processo nocivo à saúde, e foi realizado dentro de uma capela, mostrada na Figura 31, com o equipamento de proteção individual adequado.



Figura 31 - Aplicação do desmoldante.

Após a limpeza, a etapa seguinte foi cortar o tecido de fibra de carbono nas dimensões 28 x 34 cm. Essas medidas são as adequadas para que a fibra de carbono fique inteiramente dentro da prensa.

Depois disto, a resina foi misturada com o endurecedor para formar a matriz para



Figura 32- Aplicação do epóxi.

aplicação entre as camadas de fibra de carbono. Seguindo a proporção 100:26 recomendada pelo fabricante, foram utilizados 176,76g de resina e 45,95g de endurecedor. Ambos foram misturados até alcançar uma consistência homogênea, e então aplicados sobre a camada de fibra de carbono, mostrado na Figura 32. A relação epóxi/endurecedor influencia na transição vítrea após a cura, assim como no módulo de elasticidade e na resistência mecânica. A resistência à tração de sistemas epóxi curados variam de 40 a 90 MPa e o módulo de elasticidade varia de 2,5 a 6,0 GPa, com a deformação de ruptura variando na faixa de 1 a 6%. [12]

Este processo foi repetido para a segunda e para a terceira camadas de fibra de carbono, resultando no formato final da placa.

Em sequência, a placa foi inserida em uma prensa hidráulica com aquecimento modelo SL-12/20. A temperatura e a pressão utilizadas para a cura da matriz, seguindo a recomendação do fabricante, foram respectivamente 80°C e 271,17 kgf/cm². A Figura 33 mostra a prensa ajustada nas configurações utilizadas na fabricação.



Figura 33 – Prensa com aquecimento.

A placa permaneceu durante 6 horas no interior da prensa para concluir o processo de cura da matriz e chegar às propriedades desejadas. Ao final foi removida e resultou como ilustrado na Figura 34.



Figura 34 - Configuração final da placa de fibra de carbono/epoxi.

4.3 Fração Volumétrica de Vazios

É comum desprezar-se a fração volumétrica de vazios durante a estimativa das frações volumétricas de fibras e de matriz. Entretanto, com o intuito de controlar a qualidade do compósito de forma mais precisa e precaver-se de eventuais falhas no processo de fabricação da placa, pode-se obter a fração de vazios, V_v . Neste caso, uma das opções para calculá-la consiste em medir a densidade de algumas amostras do compósito (com aproximadamente 1cm^3 , ou mais) com precisão de, no mínimo, milésimos de grama (mg) por centímetro cúbico e, a partir do resultado, obter a fração volumétrica de vazios. Tal procedimento foi realizado de acordo com as normas da ASTM (American Society for Testing and Materials): D 792-66, D 2734-70, D 3171-76 E D 3553-76.

Foram utilizadas 5 amostras do compósito com volume de 1 cm^3 cada e faces regulares e lisas. O primeiro passo foi pesar as amostras, registrar os valores encontrados e calcular a massa média do compósito (m_c): $m_1 = 2,01\text{ g}$, $m_2 = 1,98\text{ g}$, $m_3 = 1,99\text{ g}$, $m_4 = 2,01$, $m_5 = 2,01\text{ g}$ e $m_c = 2,00\text{ g}$

Após o cálculo da massa média, pesou-se um béquer com 100 ml de água destilada com precisão de mg e anotou-se o valor total (recipiente mais água). A seguir, obteve-se sua temperatura T , de modo que se pode consultar o peso específico ρ em uma tabela $\rho \times T$.

Outra alternativa seria fazer as medidas necessárias e calcular ρ a partir do quociente peso/volume da água. O ρ encontrado foi de 1,00 g/cm³.

Com o recipiente ainda sobre a balança, imerge-se totalmente a amostra (sustentada por um fio de nylon de massa desprezível) na água, e mede-se o empuxo (a força reativa adicional devida ao volume de água deslocado, V_C , que é o próprio volume do compósito).

Dividindo-se o empuxo encontrado pelo peso específico da água, tem-se o volume da primeira amostra de compósito $V_{C1}=1,30$ cm³.

Os processos de imersão, pesagem e cálculo de empuxo e volume da amostra foram repetidos para as amostras restantes e a média do volume foi calculada em 1,28 cm³. A partir dos valores médios de m_C e V_C (massa e volume totais do compósito), calcula-se a densidade (ou massa específica, ρ) do material através da seguinte equação:

$$\rho_C = \frac{m_C}{V_C} = \frac{2,00}{1,28} = 1,56 \text{ g/cm}^3 \quad (48)$$

O valor encontrado é considerado pela norma como suficientemente preciso para ser utilizado no cálculo da fração volumétrica de vazios do compósito, V_V , conforme detalhado a seguir.

$$V_V = 1 - \rho_C \cdot \left[\left(\frac{M_F}{\rho_F} \right) + \left(\frac{M_M}{\rho_M} \right) \right] \quad (49)$$

$$V_V = 1 - 1,56 \cdot \left[\left(\frac{0,3}{2,95} \right) + \left(\frac{0,7}{1,296} \right) \right] \quad (50)$$

Ou seja, a fração volumétrica de vazios do compósito é de 0,06%.

4.4 Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram retirados da placa de fibra de carbono mostrada no item anterior. As dimensões da placa permitiram a retirada de quatro corpos de prova, sendo dois deles com as fibras orientadas a 0° e outros dois com as fibras orientadas a 90°. Além disso, dois corpos de prova adicionais, com fibras orientadas nessas duas direções, respectivamente, também foram retirados para uma futura caracterização das propriedades mecânicas do material. A Figura 35 mostra as marcações feitas na placa de fibra de carbono para guiar o corte dos corpos de prova. As bordas da placa foram descartadas, pois aparentavam apresentar menor qualidade superficial em relação ao centro da mesma.

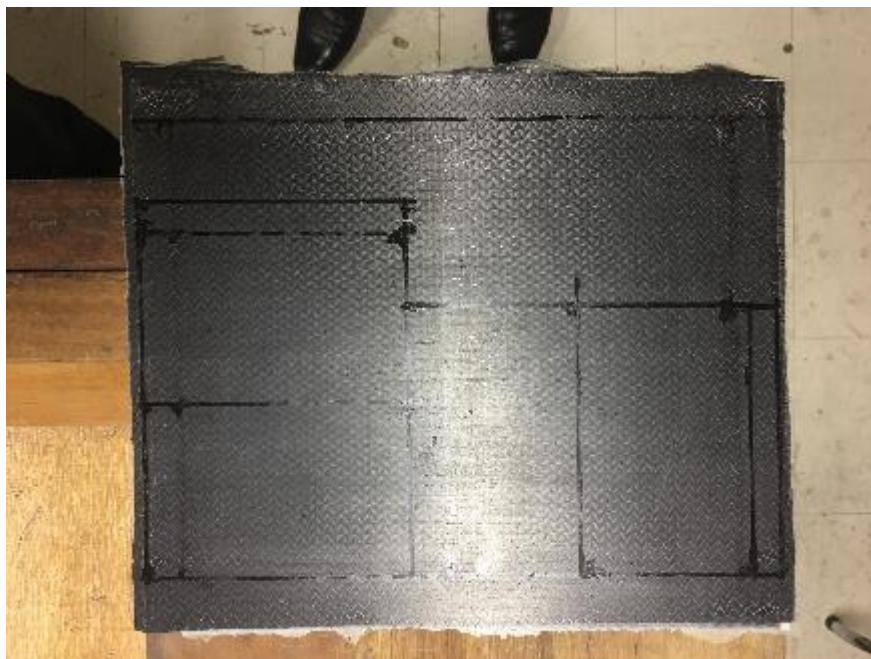


Figura 35 - Placa de fibra de carbono marcada.

A geometria escolhida para quatro dos corpos de prova foi a retangular, com dimensões nominais de 90 x 140 mm, com um furo central de 25,4 mm de diâmetro, cuja borda será utilizada para medir o fator de concentração de tensões K_t . Esta geometria já foi empregada em trabalhos de conclusão de curso anteriores [11] e se mostrou a ideal para a realização de ensaios desse tipo, por possuir dimensões suficientes para a medição, além de evitar o escorregamento nas garras da máquina de ensaio de tração.

Uma serra manual foi utilizada para cortar os corpos de prova na geometria definida. Após o corte, as bordas foram lixadas para ficarem com um melhor acabamento. O resultado parcial pode ser observado nas Figura 36 e 37, cada uma representando uma orientação diferente. Nessa etapa, ainda foi feita uma marcação no centro dos corpos de prova para indicar onde deve ser feito o furo.

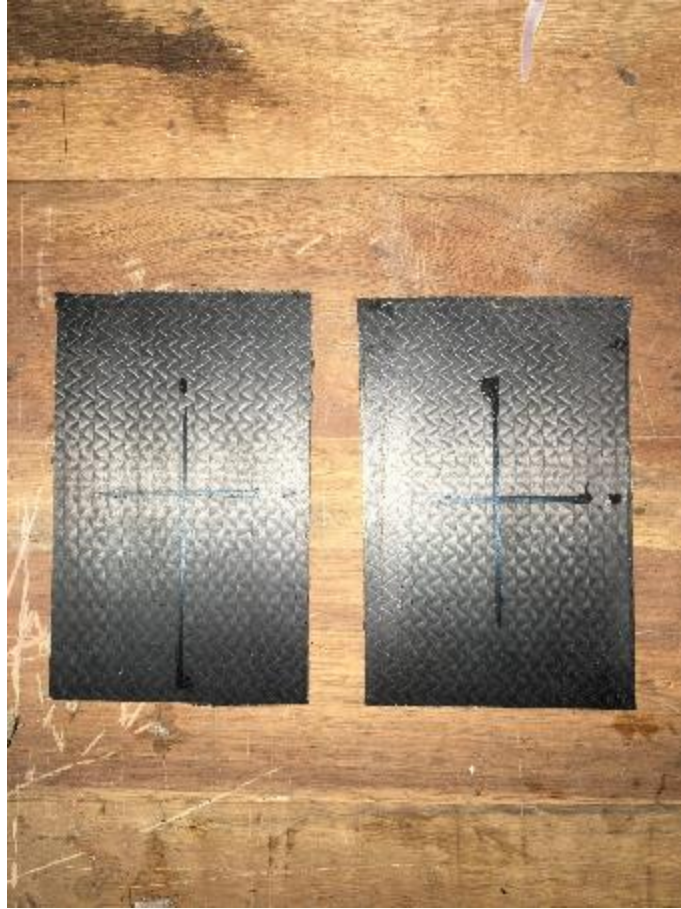


Figura 36 - Corpos de prova para ensaios a 0° após o corte com serra manual.

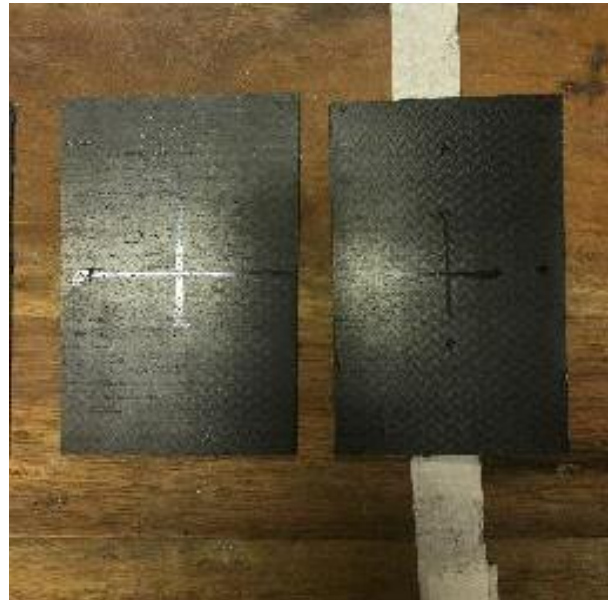


Figura 37 - Corpos de prova para ensaios a 90° após o corte com serra manual.

Os furos foram realizados através de uma serra copo disponível no laboratório do projeto de extensão Venturi do CEFET/RJ. Primeiramente, foi feita a abertura de um pré-furo com uma broca na posição previamente marcada, como mostrado na Figura 38. Em

seqüência, o furo foi feito com a serra copo na dimensão estabelecida, mostrado na Figura 39.



Figura 38 - Abertura do pré furo.



Figura 39 - Furo na dimensão final.

O formato final do corpo de prova que será utilizado está ilustrado na Figura 40, após os cortes com a serra manual e a serra copo. Os outros três corpos de prova ficaram com aspecto semelhantes.

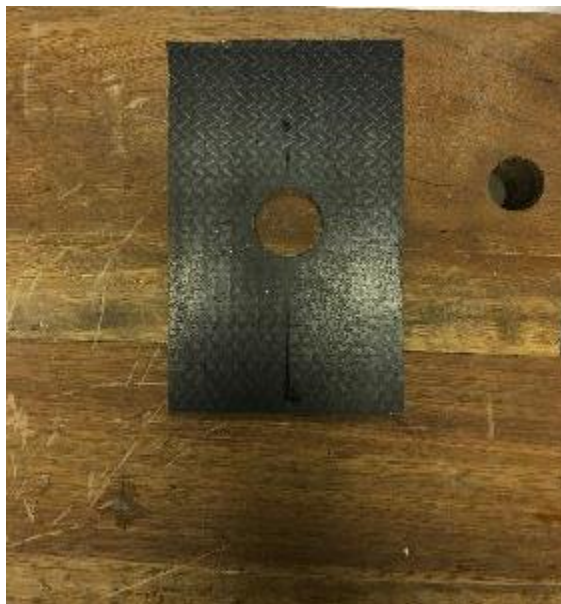


Figura 40 - Formato final do corpo de prova.

4.5 Ensaios

Dois dos corpos de prova apresentados no item anterior foram submetidos a ensaios de tração para a determinação do fator de concentração de tensões. Estes ensaios foram realizados no LADES com a supervisão do professor orientador e da equipe técnica que trabalha no laboratório.

Antes de serem ensaiados, cinco *strain gages* como os da Figura 41 foram colados sobre cada um dos corpos de prova para medir as deformações dos ensaios experimentais, e assim obter os parâmetros necessários para encontrar o K_t . Foram utilizados *strain gages* do tipo PA-06-060AB-120-L com Fator de Sensibilidade igual a 2,02 e fornecidos por Excel Sensores. Tal nomenclatura pode ser mais bem entendida no Anexo 4.

Dois *strain gages* foram colocados próximos ao furo, dois *strain gages* foram colocados distantes do furo, e um quinto também na extremidade do furo para medir a deformação no sentido perpendicular ao das fibras em questão, como visto na Figura 42.



Figura 41 – *Strain gage*.

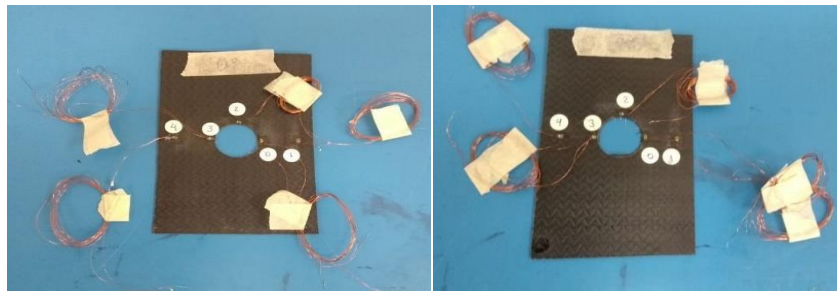


Figura 42 – *Strain gages* colados aos corpos de prova

A etapa seguinte consistiu soldar os *strain gages* aos cabos para conectá-los a um sistema de aquisição de dados. Este processo está ilustrado na Figura 43.

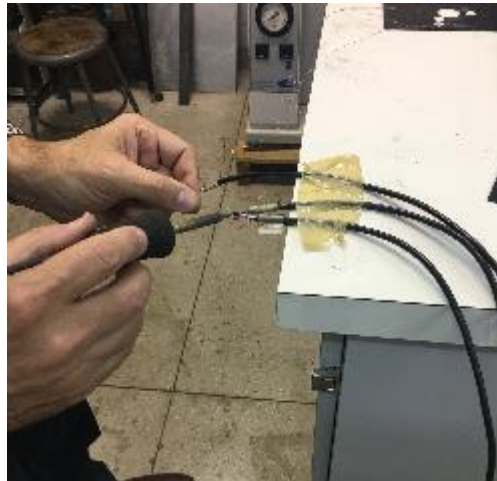


Figura 43 - Soldagem dos contatos dos *strain gages*.

Após as preparações descritas anteriormente, os ensaios de tração nos corpos de prova foram efetivamente realizados. Tais ensaios foram realizados na máquina modelo Instron 5966, disponível no LADES. Os parâmetros utilizados na máquina durante o ensaio

de cada corpo de prova estão listados na Tabela 3. A diferença entre as cargas utilizadas se deu pelo fato do material possuir diferentes propriedades em diferentes orientações, desta maneira permitindo um valor maior na disposição a 0° do que na disposição a 90° .

Tabela 3 - Parâmetros utilizados.

	0°	90°
Velocidade (mm/min)	0,5	0,5
Carga máxima (N)	600	200

Com os *strain gages* devidamente conectados ao sistema de aquisição de dados e os corpos de prova fixados na máquina, estes foram tracionados até atingirem a carga estabelecida, em seguida a carga era aliviada e os corpos de prova retirados na máquina. Este procedimento foi realizado três vezes para cada corpo de prova. A Figura 44 mostra a montagem de um dos corpos de prova durante o ensaio de tração, e a Figura 45 mostra a mesma montagem em detalhes. O mesmo foi feito para o outro corpo de prova.



Figura 44 - Montagem do ensaio.



Figura 45 - Montagem do ensaio em detalhes.

No próximo capítulo serão aplicados os resultados dos ensaios descritos neste item no modelo analítico-experimental.

Capítulo 5: Resultados

Neste capítulo os resultados experimentais são aplicados ao modelo analítico-experimental.

5.1 Estimativa do fator de concentração de tensões para placas compósitas com furo

Os ensaios realizados com as placas de fibra de carbono descritos no capítulo anterior permitiram encontrar, por meio de *strain gages*, os valores das deformações pontuais causadas por cada carregamento para cada corpo de prova. Substituindo-se estes valores no modelo analítico-experimental foi possível estimar o fator de concentração de tensões para cada um dos corpos de prova ensaiados.

Para o corpo de prova com as fibras orientadas a 0° , os três ensaios foram registrados nos três gráficos da Figura 46, Figura 48 e Figura 48:

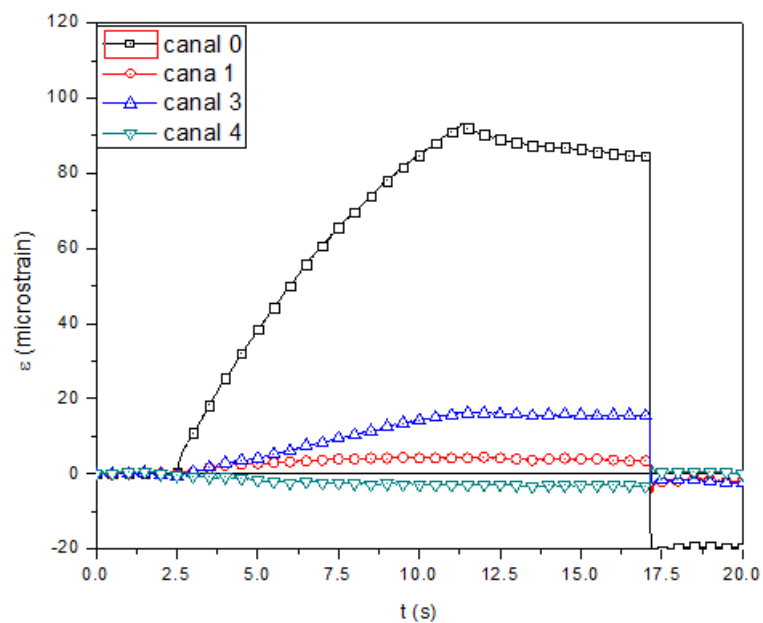


Figura 46 - Deformações no primeiro ensaio do corpo de prova a 0° .

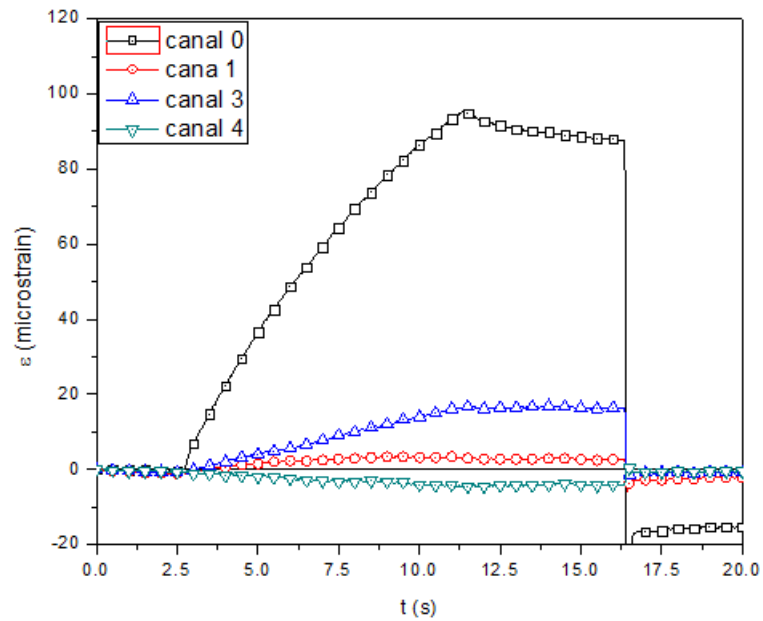


Figura 47 - Deformações no segundo ensaio do corpo de prova a 0°.

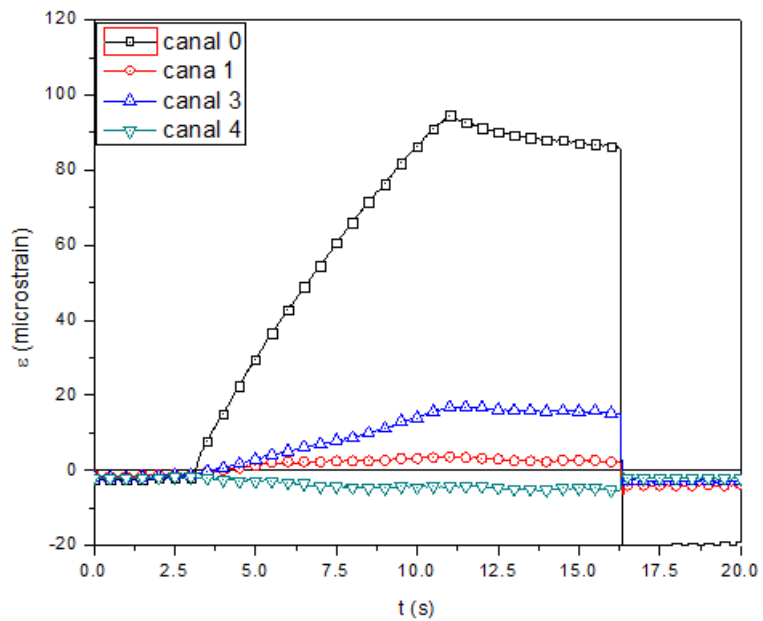


Figura 48 - Deformações no terceiro ensaio do corpo de prova a 0°.

Observando as Figuras 46, 47 e 48, é possível determinar o valor da deformação (ϵ) para cada um dos quatro *strain gages* no momento do carregamento máximo. Os canais 0, 1, 3 e 4 são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Deformações no ensaio a 0°.

	Canal 0 (x 10 ⁻⁶)	Canal 1 (x 10 ⁻⁶)	Canal 3 (x 10 ⁻⁶)	Canal 4 (x 10 ⁻⁶)
ε (primeiro ensaio)	85,00	4,00	15,00	-2,00
ε (segundo ensaio)	90,00	2,00	18,00	-3,00
ε (terceiro ensaio)	86,40	3,12	14,16	-4,56

O fator de concentração de tensões K_t a 0° é estimado pela aplicação das deformações medidas no modelo analítico-experimental, descrito na seção 3.5:

$$\varepsilon_0 = 86,4 \quad (51)$$

$$\varepsilon_1 = 3,12 \quad (52)$$

$$\varepsilon_3 = 14,16 \quad (53)$$

$$\varepsilon_4 = -4,56 \quad (54)$$

$$\sigma_{max} = \frac{107,4}{1 - (0,29^2 \cdot \frac{13,08}{107,4})} \cdot |86,4| + \frac{0,29 \cdot 13,08}{1 - (0,29^2 \cdot \frac{13,08}{107,4})} \cdot |14,16| \quad (55)$$

$$\sigma_{max} = 9,43 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{nom} = \frac{107,4}{1 - (0,29^2 \cdot \frac{13,08}{107,4})} \cdot |3,12| + \frac{0,29 \cdot 13,08}{1 - (0,29^2 \cdot \frac{13,08}{107,4})} \cdot |4,56| \quad (56)$$

$$\sigma_{nom} = 0,356 \text{ MPa}$$

$$K_t^{0^\circ} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = 29,37 \quad (57)$$

Para o corpo de prova com fibras orientadas a 90°, assim como feito anteriormente, os três gráficos da Figura 49, Figura 50 e Figura 51 mostram os valores de deformação registrados nos três ensaios realizados.

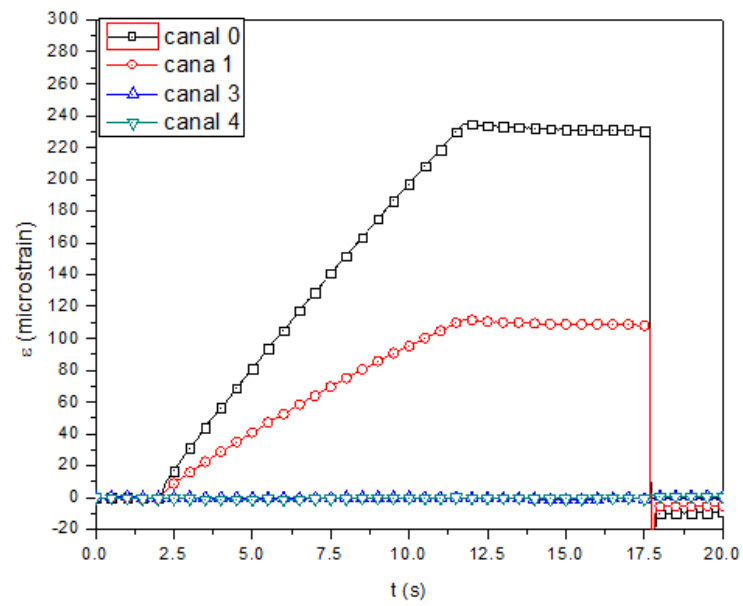


Figura 49 - Deformações no primeiro ensaio do corpo de prova a 90°

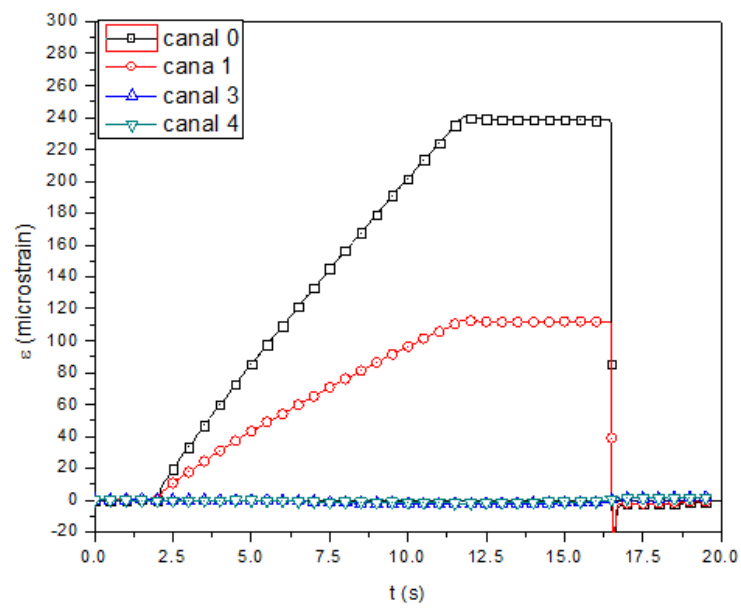


Figura 50 - Deformações no segundo ensaio do corpo de prova a 90°.

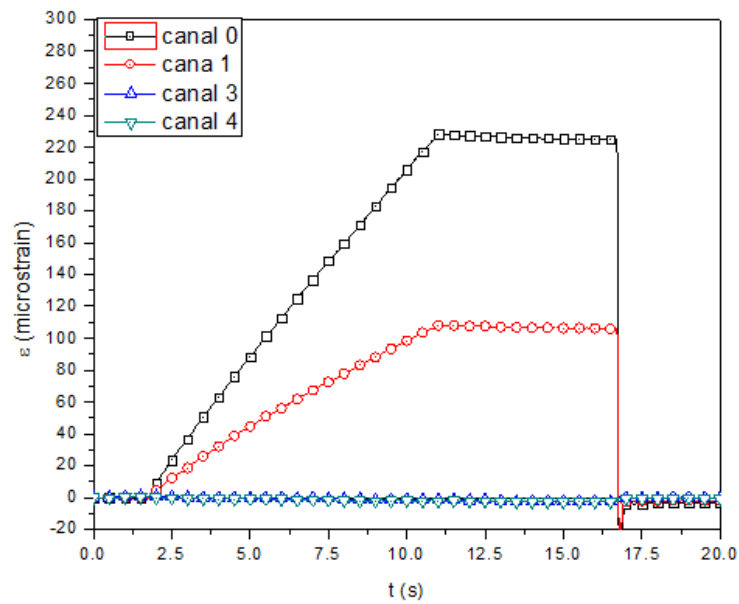


Figura 51 - Deformações no terceiro ensaio do corpo de prova a 90°

Observando as figuras 49, 50 e 51, é possível determinar o valor da deformação (ϵ) para cada um dos quatro *strain gages* no momento do carregamento máximo. Os canais 0, 1, 3 e 4 são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Deformações no ensaio a 90°.

	Canal 0 ($\times 10^{-6}$)	Canal 1 ($\times 10^{-6}$)	Canal 3 ($\times 10^{-6}$)	Canal 4 ($\times 10^{-6}$)
ϵ (primeiro ensaio)	230,00	110	2,00	-1,00
ϵ (segundo ensaio)	201,6	96,24	-2,16	-1,44
ϵ (terceiro ensaio)	238	110,00	-1,00	-2,00

O fator de concentração de tensões K_t a noventa graus é estimado pela aplicação das deformações medidas no modelo analítico-experimental:

$$\epsilon_0 = 201,6 \quad (58)$$

$$\epsilon_1 = 96,24 \quad (59)$$

$$\epsilon_3 = -2,16 \quad (60)$$

$$\epsilon_4 = -1,44 \quad (61)$$

$$\sigma_{max} = \frac{107,4}{1 - (0,29^2 \cdot \frac{13,08}{107,4})} \cdot |201,6| + \frac{0,29 \cdot 13,08}{1 - (0,29^2 \cdot \frac{13,08}{107,4})} \cdot |2,16| \quad (62)$$

$$\sigma_{nom} = \frac{107,4}{1 - (0,29^2 \cdot \frac{13,08}{107,4})} \cdot |96,24| + \frac{0,29 \cdot 13,08}{1 - (0,29^2 \cdot \frac{13,08}{107,4})} \cdot |1,44| \quad (63)$$

$$K_t^{0^o} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = 2,09 \quad (64)$$

5.2 Fator de concentração de tensões para materiais isotrópicos

Um método adicional para encontrar o fator de concentração de tensões é utilizando-se a equação encontrada em [13]. O valor encontrado não será usado como comparação nem previsão do valor experimental, apenas será apresentado como uma forma alternativa de se chegar ao K_t .

$$K_t = 3,00 - 3,13 \cdot \left(\frac{2r}{D}\right) + 3,66 \cdot \left(\frac{2r}{D}\right)^2 - 1,53 \cdot \left(\frac{2r}{D}\right)^3$$

$$K_t = 3,00 - 3,13 \cdot \left(\frac{25,4}{90}\right) + 3,66 \cdot \left(\frac{25,4}{90}\right)^2 - 1,53 \cdot \left(\frac{25,4}{90}\right)^3$$

$$K_t = 3,10$$

5.3 Possíveis influências no fator de concentração de tensões

Diversas hipóteses de influências externas no resultado do fator de concentração de tensões podem ser levantadas, desde o escorregamento das garras durante os ensaios até eventuais problemas na colagem dos *strain gages*. Dentre elas, duas se destacam: a discrepância entre as propriedades oferecidas por catálogos e as propriedades da placa fabricada, e os efeitos da distribuição da tensão a partir da borda do furo (ponto de tensão máxima) até o ponto onde os efeitos do concentrador de tensão não são mais notados (ponto de tensão nominal).

Duas das propriedades mais importantes do compósito na análise de seu K_t são seus módulos de elasticidade e, para encontrá-los, deve-se inicialmente conhecer as frações volumétricas de fibras, matriz e vazios do material.

A fração de vazios já é conhecida, estimada no tópico 3.3, e vale 0,06%. Já as frações volumétricas de fibras e matriz, V_F e V_M respectivamente, são calculadas a seguir.

Como se sabe, a soma das frações volumétricas de um compósito é igual à unidade. Logo,

$$V_F + V_M = 1 - V_V = 0,99943$$

Para encontrar a densidade ρ_c do compósito curado foi utilizada uma amostra com massa de 4 g medindo 50,0 x 50,0 x 0,8 mm, resultando assim em:

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} = \frac{4}{5 \cdot 5 \cdot 0,08}$$

$$\rho_c = 2,0 \text{ g/cm}^3$$

Analogamente, pode-se encontrar a densidade da fibra utilizando-se a espessura de 0,34 mm da manta, fornecida pelo catálogo Barracuda, e a massa de 95,45 g da mesma, mensurada durante a fabricação da placa.

$$\rho_c = \frac{95,45}{340 \cdot 280 \cdot 3,4}$$

$$\rho_c = 2,95 \text{ g/cm}^3$$

O catálogo da Barracuda [Anexo 2] para o sistema resina-endurecedor informa as densidades dos constituintes do mesmo, assim como o módulo de elasticidade do sistema, utilizado mais a frente.

$$\rho_{\text{resina}} = 1,15 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{endurecedor}} = 0,95 \text{ g/cm}^3$$

$$E_m = 3,158 \text{ GPa}$$

Utilizando a proporção resina-endurecedor da mistura para ponderar a média, tem-se:

$$\% \text{ resina} = 79,4\%$$

$$\% \text{ endurecedor} = 20,6\%$$

$$\rho_M = 0,794 \times 1,15 + 0,206 \cdot 0,947$$

$$\rho_M = 1,296 \text{ g/cm}^3$$

Conforme visto anteriormente,

$$V_F + V_M = 0,99943$$

$$\rho_{\text{resina}} = \rho_F \cdot V_F + \rho_M \cdot V_M$$

Resolvendo o sistema acima, encontra-se as frações volumétricas procuradas, $V_F = 0,426$ e $V_M = 0,573$, ilustradas na Figura 52.

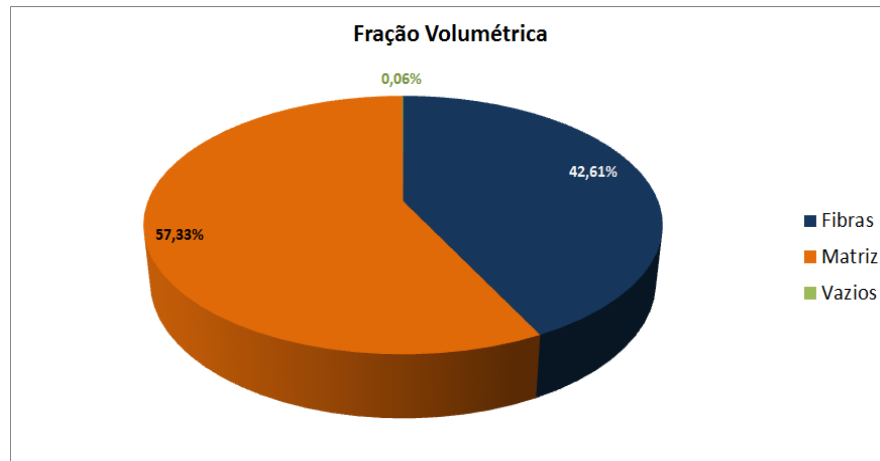


Figura 52 - Frações volumétricas.

Como visto no Anexo 1, os valores teóricos para um compósito carbono-epóxi apresenta as seguintes propriedades, sendo E_1 e E_2 os respectivos módulos de elasticidade longitudinal e transversal:

$$V_F = 0,63$$

$$V_M = 0,37$$

$$E_1 = 142 \text{ GPa}$$

$$E_2 = 10,3 \text{ GPa}$$

Essas propriedades serão utilizadas para encontrar E_{1f} e E_{2f} , módulos de elasticidade axial (ou longitudinal) e radial (ou transversal) respectivamente, esperados pela literatura, de modo que possam ser calculados E_1 e E_2 para as frações volumétricas da placa do presente estudo utilizando-se as fórmulas presentes no tópico 2.14.1.

$$E_1 = E_{1f} \cdot V_F + E_M \cdot V_M$$

$$142 = E_{1f} \cdot 0,63 + 3,158 \cdot 0,37$$

$$E_{1f} = 223,54 \text{ GPa}$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_F}{E_{2f}} + \frac{V_M}{E_M}$$

$$\frac{1}{10,3} = \frac{0,63}{E_{2f}} + \frac{0,37}{3,158}$$

$$E_{2f} = 7,15 \text{ GPa}$$

Tendo a placa fabricada $V_F=0,426$ e $V_M=0,573$, os módulos de elasticidade da mesma são:

$$E_1 = 223,54 \cdot 0,426 + 3,158 \cdot 0,573$$

$$E_1 = 97,04 \text{ GPa}$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{0,426}{7,15} + \frac{0,573}{3,158}$$

$$E_2 = 8,21 \text{ GPa}$$

Tais valores diferem dos valores esperados pelo catálogo do fornecedor, conforme explícito pela Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação dos módulos de elasticidade

	Projeto	Catálogo	Desvio
E₁	97,04 GPa	114,16 GPa	14,99%
E₂	8,21 GPa	9,89 GPa	16,99%
ρ_c	2,0 g/cm ³	1,55 g/cm ³	29,03%
V_M	0,57	0,37	54%

A variação encontrada nos módulos de elasticidade, além da elevada densidade encontrada e da fração volumétrica de matriz acima do normal podem ter causado alterações nos valores encontrados para o K_t .

Uma hipótese adicional para o que pode ter influenciado os cálculos do K_t diz respeito à posição dos *strain gages* em relação à distribuição de tensões. Considerando a Figura 19, se o strain gage estiver colado antes da curva de distribuição de tensões ficar assintótica, a deformação medida não será a causada pela tensão nominal, fato que pode causar variações no cálculo do fator de concentração de tensões. Assim, é possível que a deformação medida pelo *strain gage* ainda esteja sob efeito do concentrador de tensões, causando distorções em seu cálculo.

Capítulo 6: Conclusão

Este trabalho de final de curso teve como objetivo estimar o fator de concentração de tensões (K_t) em placas de material compósito com furo centralizado submetidas ao esforço de tração.

Para tal um modelo analítico-experimental foi utilizado para a estimativa do K_t tanto para fibras alinhadas com o carregamento quanto para fibras perpendiculares ao carregamento. O K_t no primeiro caso revelou-se muito maior que o K_t no segundo caso, evidenciando a dependência do K_t , além da geometria do entalhe e do tipo de carregamento, das condições de anisotropia das placas furadas utilizadas como c.p.s.

6.1 Sugestões para projetos subsequentes

Futuros projetos sobre o mesmo tema podem ter resultados mais completos ao variar o material compósito, a largura dos corpos-de-prova e a posição dos *strain gages*. Além disso, variar o diâmetro do furo, a forma do entalhe, utilizar mais *strain gages* para medições mais apuradas e realizar outros tipos de ensaio, como o de flexão, geraria uma análise mais abrangente.

Capítulo 7: Referências Bibliográficas

1. M. Daniel and O. Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, New York: Oxford University Press, 1994.
2. G. H. Staab, *Laminar Composites*, Woburn: Butterworth-Heinemann, 1999.
3. Richardson, T. *Composites: A Design Guide*. Industrial Press Inc., New York, 1987.
4. Vinson, J. R., and R. L. Sierakowski. *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*. Dordrecht, Holanda: Martinus Nijhoff, 1986.
5. Levy Neto, Flaminio, e Pardini, Luiz Cláudio. *Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia*, São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 2006.
6. Da Silva, R.V.; Aquino, E. M. F.; Rodrigues, L. P. S.; Barros, A. R. F. *Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética*. Espírito Santo, Brasil: Revista Matéria, v.13, p. 154 – 161, 2008.
7. MANGALGIRI, P D. Composite materials for aerospace applications. Bull. Mater. Sci, Bangalore, v. 22, n. 3, p.657-664, maio 1999.
8. MACEDO et al. MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE GESSO E ISOPOR PARA CONSTRUÇÃO DE CASAS POPULARES. Holos, Santa Cruz, v. 5, n. 27, p.95-105, dez. 2011.
9. WANG, Hao et al. Green Composite Materials. *Advances In Materials Science And Engineering*, [S.L.], v. 2015, p.1-1, maio 2015. Hindawi Limited.
10. AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM 3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, Pa: Astm International, 2000. 13 p.
11. KLOTZ, Beatriz. *Análise de Concentradores de Tensões em Placas de Material Compósito Ortotrópico com Entalhe*. 2017. 105 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2017.
12. ECOMPOSITES. TECIDO DE FIBRA DE CARBONO UNIDIRECIONAL UC300. Disponível em: <12. https://www.ecomposites.com.br/TECIDO_DE_FIBRA_DE_CARBONO_UNIDIRECIONAL_UC300/prod-4587808/>. Acesso em: 03 maio 2018.

13. CASTRO, Jaime Tupiassú Pinho de; MEGGIOLARO, Marco Antonio. *Fatigue Design Techniques Under Real Service Loads: High-Cycle Fatigue*. Rio de Janeiro: Createspace Independent Publishing Platform, 2016.
14. Wong, S.C. and Mai, Y.W.. *Fracture resistance and microstructures of unreinforced and fiber reinforced PA6,6/PP/SEBS-g-MA*. *Annual Technical Conference, 56*, Atlanta, USA, 1998
15. AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM 792-66: *Specific Gravity and Density of Plastics by Displacement*. Philadelphia, PA: Astm International, 1986.
16. AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM 3171-76: *Fiber Content of Resin-Matrix Composites by Matrix Digestion*. Philadelphia, PA: Astm International, 1986.
17. AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM 3553-76: *Fiber Content by Digestion of Reinforced Metal Matrix Composites*. Philadelphia, PA: Astm International, 1986
18. Kar, R.J.. *Failure Analysis of Composites*, Anaheim, CA, USA, 1992
19. Tsai, W. S. and Hahn, H.T.. *Introduction to Composite Materials*, Technomic Publishing Co., Lancaster, UK 1980

ANEXO I: Propriedades de Compósitos Unidirecionais

Table 2.6 Properties of Typical Unidirectional Composite Materials

Property	⁵ E-glass/ epoxy	S-glass/ epoxy	Woven- glass/ epoxy (7781/5245C)	⁵ Kevlar/epoxy (Aramid 149/ epoxy)	Carbon/epoxy (AS4/3501-6)	Carbon/PEEK (AS4/APC2)
Fiber volume ratio, (V_f)	0.55	0.50	0.45	0.60	0.63	0.58
Density (ρ , g/cm ³ [lb/in ³])	2.10 (0.076)	2.00 (0.072)	2.20 (0.080)	1.38 (0.050)	1.58 (0.057)	1.57 (0.057)
Longitudinal modulus (E_1 , GPa [Msi])	39 (5.7)	43 (6.3)	29.7 (4.31)	87 (12.6)	142 (20.6)	131 (19.1)
Transverse modulus (E_2 , GPa [Msi])	8.6 (1.24)	8.9 (1.29)	29.7 (4.31)	5.5 (0.80)	10.3 (1.50)	8.7 (1.27)
In-plane shear modulus (G_{12} , GPa [Msi])	3.8 (0.54)	4.5 (0.66)	5.3 (0.77)	2.2 (0.31)	7.2 (1.04)	5.0 (0.73)
Major Poisson's ratio (ν_{12})	0.28	0.27	0.17	0.34	0.27	0.28
Minor Poisson's ratio (ν_{21})	0.06	0.06	0.17	0.02	0.02	0.02
Longitudinal tensile strength (F_{1t} , MPa [ksi])	1,080 (157)	1,280 (185)	367 (53)	1,280 (185)	2,280 (330)	2,060 (299)
Transverse tensile strength (F_{2t} , MPa [ksi])	39 (5.7)	49 (7.1)	367 (53)	30 (4.2)	57 (8.3)	78 (11.4)
In-plane shear strength (F_{6s} , MPa [ksi])	89 (12.9)	69 (10.0)	97.1 (14.1)	49 (7.1)	71 (10.3)	157 (22.8)
Ultimate longitudinal tensile strain (ϵ_{1u}^t)	0.028	0.029	0.025	0.015	0.015	0.016
Ultimate transverse tensile strain (ϵ_{2u}^t)	0.005	0.006	0.025	0.005	0.006	0.009
Longitudinal compressive strength (F_{1c} , MPa [ksi])	620 (90)	690 (100)	549 (80)	335 (49)	1,440 (209)	1,080 (156)
Transverse compressive strength (F_{2c} , MPa [ksi])	128 (18.6)	158 (22.9)	549 (80)	158 (22.9)	228 (33)	196 (28.4)
Longitudinal thermal expansion coefficient, (α_1 , $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [$10^{-6}/^{\circ}\text{F}$])	7.0 (3.9)	5.0 (2.8)	10.0 (5.6)	-2.0 (-1.1)	-0.9 (-0.5)	-0.2 (-0.1)
Transverse thermal expansion coefficient (α_2 , $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [$10^{-6}/^{\circ}\text{F}$])	21 (11.7)	26 (14.4)	10.0 (5.6)	60 (33)	27 (15)	24 (13.3)
Longitudinal moisture expansion coefficient (β_1)	0	0	0.06	0	0.01	0
Transverse moisture expansion coefficient (β_2)	0.2	0.2	0.06	0.3	0.2	0.3

ANEXO II: Propriedades da Fibra de Carbono UC300



Standard Product Specification
UC 300-PX35 - Unidirectional Carbon
Carbon Fiber Fabric

Description

Fiber Type	Carbon 50K
Architecture	0° Unidirectional
Dry Thickness	0.013 in (0.34 mm)
Total Weight	8.90 oz/yd ² (302 g/m ²)

Product Specifications

	Normal Weight		Tolerance	Composition
	oz/yd ²	g/m ²		
0°	8.90	302	±5%	100%
Warp				
Total	8.90	302	±5%	100%

Laminate Weight

	UC300PX35 Resin Infusion		UC300PX35 Open Mold	
	Fiber	0.06 lb/sq.ft	0.29 kg/sq.m	0.06 lb/sq.ft
Resin	0.03 lb/sq.ft	0.16 kg/sq.m	0.07 lb/sq.ft	0.36 kg/sq.m
Total	0.09 lb/sq.ft	0.46 kg/sq.m	0.13 lb/sq.ft	0.65 kg/sq.m

Physical Properties

	UC300PX35 Resin Infusion		UC300PX35 Open Mold	
	Density	0.88 oz/cu.in	1.53 g/cc	0.82 oz/cu.in
Fiber Content	64% by Wt.	54% by Vol.	45% by Wt.	35% by Vol.
Thickness	0.012 in	0.3 mm	0.018 in	0.5 mm



Standard Product Specification
 UC 300-PX35 - Unidirectional Carbon
 Carbon Fiber Fabric

Laminate Moduli

	UC300PX35 Resin Infusion		UC300PX35 Open Mold	
	Ex	16.56 MSI	114.16 Gpa	10.90 MSI
Ey	1.43 MSI	9.89 Gpa	1.08 MSI	7.44 Gpa
Gxy	0.59 MSI	4.09 Gpa	0.42 MSI	2.91 Gpa
Ex,flex.	15.73 MSI	108.45 Gpa	10.44 MSI	71.99 Gpa
Ey,flex.	1.36 MSI	9.39 Gpa	1.03 MSI	7.07 Gpa

Ultimate Stress

	UC300PX35 Resin Infusion		UC300PX35 Open Mold	
	Long. Ten.	198.7 KSI	1,369.9 Mpa	131.9 KSI
Long. Comp.	126.9 KSI	875.2 Mpa	84.3 KSI	581.0 Mpa
Trans. Ten.	4.2 KSI	29.2 Mpa	4.0 KSI	27.9 Mpa
Trans. Comp.	16.1 KSI	110.8 Mpa	15.4 KSI	106.0 Mpa
In-Plane Shear	7.9 KSI	54.3 Mpa	7.5 KSI	51.6 Mpa
Long. Flex.	120.6 KSI	831.4 Mpa	80.1 KSI	552.0 Mpa
Trans. Flex.	4.0 KSI	27.7 Mpa	3.8 KSI	26.5 Mpa

ANEXO III: Propriedades da Resina e do Endurecedor



Sistema de Resina AR260 e AH260
Datasheet

Descrição

O sistema de resina epoxy AR260 com endurecedor epoxy AH260 é um sistema de cura rápida, de baixa viscosidade, para uso em laminação manual, laminação a vácuo e infusão.

Propriedades Mecânicas

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Cor	Visual	-	Âmbar claro
Dureza Shore D	ASTM D-2240	-	87
Resistência à tração	ASTM D-638	MPa	73,77
Módulo de tração	ASTM D-638	MPa	35780
Resistência ao alongamento	ASTM D-638	%	8,8
Resistência à compressão	ASTM D-695	MPa	88,94
Resistência à flexão	ASTM D-790	MPa	199,28
Módulo de flexão	ASTM D-790	MPa	2737,22
-DT - Cura a temperatura ambiente	ASTM D-648	°C	58
-DT - Temperatura de pós-cura	ASTM D-648	°C	98
Impacto Izod, com entalhe	ASTM D-256	kJ/m ²	2,67
Contração	ASTM D-2566	mm/mm	<0,002

Propriedades de Manuseio

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Densidade da Resina	ASTM E-201	Kg/m ³	1150,33
Densidade do endurecedor	ASTM E-201	Kg/m ³	946,63
Viscosidade da Resina a 25°C	ASTM D-2393	cps	1200
Viscosidade do Endurecedor a 25°C	ASTM D-2393	cps	30
Viscosidade Mista a 25°C	ASTM D-2393	cps	300
Viscosidade Mista a 49°C	ASTM D-2393	cps	140
Taxa de mistura por peso (100 A)	Calculado	-	100A : 26B
Gel time a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	290
Ponto de gel a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	120

Armazenagem e Manuseio

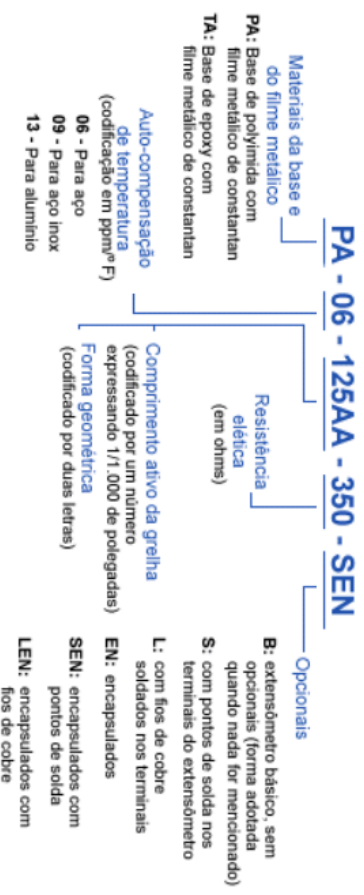
O sistema de resina deve ser armazenado em local seco, entre 15,5 e 37,7°C, e deve sempre ser tampado após o uso. Em caso de cristalização do produto, aquecer à temperatura de 40°C até os cristais se dissolverem e mexer bem até que o produto estiver liquefeito. Sempre utilize ferramentas limpas e secas para misturar e aplicar os produtos. A mistura deve ser feita cuidadosamente e imediatamente antes do uso, seguindo a taxa de mistura descrita neste datasheet. A temperatura do ambiente não deve ser menor que 18°C durante a mistura.

ANEXO IV: Nomenclatura de *strain gages*

Extensômetros Coláveis de Resistência Elétrica.

Sistema de Codificação

A codificação é feita por um conjunto de letras e números que identifica o extensômetro, conforme suas características.



Fator de Sensibilidade (Gage Factor)

- o valor teórico do Fator de Sensibilidade é $K = 2,1$
- o valor real apresenta pequenas variações, de lote para lote, em torno do valor teórico.

No caso de extensômetros de uso em extensometria, o Fator de Sensibilidade é informado em cada fornecimento, junto com a identificação do lote.

No caso de extensômetros de aplicação voltada à construção de transdutores, o Fator de Sensibilidade só é informado mediante solicitação.