

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

**ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE CONCENTRAÇÃO DE
TENSÕES EM PLACAS COM FURO CIRCULAR EM
MATERIAIS ISOTRÓPICOS E ORTOTRÓPICOS**

Diego Ferreira Jorge Aragão

Luiz Alberto Silva do Carmo

Rio de Janeiro

Junho de 2019

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

**ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE CONCENTRAÇÃO DE
TENSÕES EM PLACAS COM FURO CIRCULAR EM
MATERIAIS ISOTRÓPICOS E ORTOTRÓPICOS**

Diego Ferreira Jorge Aragão

Luiz Alberto Silva do Carmo

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

Prof. Orientador: Paulo Pedro Kenedi

Rio de Janeiro

Junho de 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

A659 Aragão, Diego Ferreira Jorge
Análise dos coeficientes de concentração de tensões em placas com furo circular em materiais isotrópicos e ortotrópicos / Diego Ferreira Jorge Aragão [e] Luiz Alberto Silva do Carmo.—2019. xi, 55f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2019.

Bibliografia : f. 54-55

Orientador : Paulo Pedro Kenedi

1. Engenharia mecânica. 2. Tensões. 3. Materiais compósitos. I. Carmo, Luiz Alberto Silva do. II. Kenedi, Paulo Pedro (Orient.). III. Título.

CDD 620.1

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

AGRADECIMENTOS

Eu, Diego, agradeço em primeiro lugar a Deus, centro de todas as minhas obras, por Sua graça e sustento nessa caminhada, sem Ele nada disso seria possível. Agradeço imensamente a minha mãe, Cidália, por sempre lutar para me proporcionar as melhores condições e me apoiar durante o curso, e a minha irmã, Karine, pelo companheirismo e suporte em todos os momentos da minha vida. Sou grato a todos os demais familiares que fizeram parte dessa conquista e aos amigos por todo incentivo e ajuda nos momentos difíceis. Agradeço também a minha namorada e melhor amiga, Alessandra, pela compreensão e suporte na reta final, por me motivar e me fazer crescer.

Eu, Luiz Alberto, agradeço aos meus pais por sempre apoiarem meus projetos, desde a infância até os dias atuais. Também agradeço a todos os amigos que me deram força para continuar ou que de alguma forma, direta ou indiretamente, me ajudaram alcançar esse objetivo, que é o projeto final da graduação.

Somos gratos ao grande mestre e professor orientador Paulo Kenedi, por aceitar este projeto, por suas orientações e todo o suporte para a elaboração do trabalho. Agradecemos também a todos do LADES, em especial o engenheiro Brenno, que nos auxiliou nos testes.

Por fim, nosso muito obrigado ao CEFET/RJ, por todos esses anos de aprendizado e preparação.

RESUMO

A utilização de materiais ortotrópicos na área de engenharia está em crescimento, buscando resultados semelhantes ou melhores do que os materiais isotrópicos convencionais amplamente utilizados. O presente trabalho busca determinar, através da realização de ensaios mecânicos, os fatores de concentração de tensões em uma placa com furo circular de material ortotrópico carregada axialmente à tração e compará-los ao fator de concentração de tensões em uma placa com furo circular de material isotrópico, de mesmas dimensões. Para tal, foram utilizados corpos de prova de fibra de carbono alinhadas e epóxi já fabricadas no LADES, com a forma de placas retangulares com furos circulares centralizados, com carregamento alinhado com as fibras de carbono e de mesma forma foi usinada uma placa de material isotrópico de mesma espessura, com furo circular centralizado de mesmo diâmetro. *Strain gages* foram utilizados durante os ensaios para obter as deformações dos corpos de prova em pontos específicos e em conjunto com o modelo analítico-experimental estimar-se os fatores de concentração de tensões, e então analisá-los, comparando os resultados. Após compará-los também com a literatura, conclusões foram tiradas sobre possíveis aplicações e a importância de tais valores.

Palavras-chave: ensaios mecânicos; fatores de concentração de tensões; material ortotrópico; modelo analítico-experimental.

ABSTRACT

The use of orthotropic materials is a growing area in engineering, that seeks similar or better results than the conventional isotropic materials widely used. The current academic work seeks to determine, through the performance of mechanical tests, the stress concentration factors of an orthotropic material plate with centralized hole axially loaded by traction and compare to the stress concentration factors of an isotropic material plate with centralized hole and same dimensions. To do so, aligned carbon fiber and epoxy test specimens already manufactured in LADES were used, in a rectangular shape plate with centralized holes, with the load aligned with the carbon fibers. Likewise, the isotropic material plate was machined with same thickness and centralized hole with equal diameter. *Strain gages* were used during the tests to obtain the deformation of the test specimens at specific points and together with the analytical-experimental model to estimate the stress concentration factors, and then analyze them, comparing the results. After also comparing the results with literature, conclusions were drawn concerning not only possible applications but also the importance of such values.

Key-words: mechanical tests; stress concentration factors; orthotropic material; analytical-experimental model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de um material compósito (DANIEL e ISHAI, 1994 - modificado).	3
Figura 2 - Importância relativa do desenvolvimento de materiais através da história (STAAB, 1999 - modificado).	5
Figura 3 - Reação típica de materiais isotrópicos, anisotrópicos e ortotrópicos sujeitos a tensão axial (STAAB, 1999 - modificado).	6
Figura 4 - Curvas de tensão-deformação de fibras tipicamente usadas como reforço (DANIEL e ISHAI, 1994 - modificado).	8
Figura 5 - Curvas de tensão-deformação de três materiais matriciais típicos (DANIEL e ISHAI, 1994 - modificado).	10
Figura 6 - Classificação dos materiais compósitos (AGARWAL et al., 2006 - modificado)...	11
Figura 7 - Esquema representativo de compósitos particulados (STAAB, 1999 - modificado).	12
Figura 8 - Esquema representativo de compósitos fibrosos (STAAB, 1999 - modificado).	13
Figura 9 - Lâmina e os eixos principais do material: (a) reforço unidirecional e (b) reforço entrelaçado (DANIEL e ISHAI, 1994 - modificado).	14
Figura 10 - Esquema de um compósito laminado (STAAB, 1999).	15
Figura 11 - Moldagem por compressão (BARBERO, 2011 – modificado).	17
Figura 12 - Curvas típicas de deformação das ligas de alumínio (ABAL, 2007).	19
Figura 13 - Laminação a quente e a frio (ABAL, 2007).	22
Figura 14 - Barra cilíndrica e esquematização do ensaio de tração (DALCIN, 2007).	24
Figura 15 - Curva de um ensaio de tração convencional (DALCIN, 2007).	25
Figura 16 - Deformações experimentadas por uma barra prismática submetida a um carregamento unidirecional (DALCIN, 2007).	27
Figura 17 - Gráfico de coeficientes de concentração de tração de uma placa com furo circular (BUDYNAS et al., 2011).	29
Figura 18 - Efeito da concentração de tensões devido à mudança na seção transversal (ANGELO et al., 2005).	30
Figura 19 - Deformação de um fio sob tração (ANDOLFATO et al., 2004).	31
Figura 20 - Lâmina unidirecionalmente reforçada (JONES, 1999).	32
Figura 21 - Corpos de Provas utilizados já com os strain gages instalados.	35
Figura 22 - Teste de tração do corpo de prova com fibras a 0° em relação a carga.	36
Figura 23 - Teste de tração do corpo de provas com fibras a 90° em relação a carga.	36

Figura 24 - Desenho esquemático da placa de material compósito utilizada, em milímetros..	37
Figura 25 - Teste de tração da placa de material compósito com um furo circular no centro..	38
Figura 26 - Desenho esquemático da placa de material isotrópico utilizada, em milímetros...	38
Figura 27 - Placa de material isotrópico com um furo circular no centro.	39
Figura 28 - Teste de tração da placa de material isotrópico com um furo circular no centro...	40
Figura 29 - Deformação em relação ao tempo do corpo de prova com fibras alinhadas a 0° com a carga.	41
Figura 30 - Força em relação ao tempo do corpo de prova com fibras alinhadas 0° com a carga.....	41
Figura 31 - Deformação em relação ao tempo do corpo de prova com fibras alinhadas a 90° com a carga.	42
Figura 32 - Força em relação ao tempo do corpo de prova com fibras alinhadas 90° com a carga.....	43
Figura 33 - Deformação em relação ao tempo do corpo de prova contendo o concentrador de tensão com fibras alinhadas a 0° com a carga.	44
Figura 34 - Deformação em relação ao tempo do corpo de prova de alumínio.	45
Figura 35 - Gráfico força x tempo do ensaio da placa de alumínio com furo circular.....	46
Figura 36 - Razão entre a distribuição da tensão tangencial na borda do furo e a tensão nominal para uma placa com furo circular e diversos valores de a sob diferentes condições de carregamento (continua) (VIGNOLI, 2016).....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das fibras e de materiais convencionais particulados (AGARWAL et al., 2006 – modificado).....	7
Tabela 2 - Processos de fabricação e cura comuns para materiais compósitos (STAAB, 1999 - modificado).....	16
Tabela 3 - Propriedades físicas típicas do alumínio (ABAL, 2007 - modificado).	18
Tabela 4 - Designação das ligas de alumínio (ABNT, 2006).	20
Tabela 5 - Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de alguns materiais (DALCIN, 2007 - modificado).	28
Tabela 6 - Deformações longitudinais e transversais dos corpos de prova.	43
Tabela 7 - Deformações na placa de material compósito e na placa de alumínio.	46

LISTA DE SÍMBOLOS

- P – Carga de tração;
- l_0 – Comprimento inicial;
- l – Comprimento final;
- S_0 – Área da seção transversal inicial;
- σ – Tensão normal convencional;
- ε – Deformação;
- E – Módulo de elasticidade;
- ν – Coeficiente de Poisson;
- G – Módulo de elasticidade transversal;
- τ – Tensão de cisalhamento;
- γ – Deformação cisalhante;
- K_t – Coeficiente de concentração de tensão teórico;
- σ_{nom} – Tensão nominal;
- σ_{max} – Tensão máxima;
- R – Resistência elétrica;
- ρ – Resistividade elétrica;
- A – Área da seção transversal do fio;
- σ_3 – Tensão normal na direção 3;
- τ_{23} – Tensão de cisalhamento no plano 2-3;
- τ_{31} – Tensão de cisalhamento no plano 3-1;
- σ_1 – Tensão normal na direção 1;
- σ_2 – Tensão normal na direção 2;
- τ_{12} – Tensão de cisalhamento no plano 1-2;
- Q_{11} – Rigidez reduzida 1-1;
- Q_{12} – Rigidez reduzida 1-2;
- E_1 – Módulo de elasticidade na direção 1;

E_2 – Módulo de elasticidade na direção 2;

K_t – Fator de concentração de tensões.

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Justificativa.....	1
1.3 Objetivo.....	2
1.4 Materiais e métodos	2
1.5 Organização do projeto	2
Capítulo 2	3
Revisão Bibliográfica	3
2.1 Materiais Compósitos.....	3
2.1.1 Histórico.....	4
2.1.2 Características	5
2.1.3 Reforço.....	7
2.1.4 Matriz.....	8
2.1.5 Classificação	10
2.1.5.1 Compósitos particulados	11
2.1.5.2 Compósitos fibrosos.....	13
2.1.5.3 Compósitos laminados	13
2.1.6 Processos de fabricação.....	15
2.2 Alumínio.....	17
2.2.1 Características	18
2.2.2 Ligas de alumínio.....	19
2.2.3 Processos de fabricação.....	20
Capítulo 3	23
Modelo Analítico.....	23
3.1 Ensaio de tração	23
3.1.1 Ensaio convencional.....	23

3.2	Variáveis mecânicas elásticas	25
3.3	Fator de concentração de tensões	28
3.4	<i>Strain gages</i>	30
3.5	Modelo analítico.....	31
Capítulo 4	.....	35
Resultados	.....	35
4.1	Ensaaios	35
4.2	Resultados dos testes.....	40
4.2.1	Resultado do teste com carregamento axial para a obtenção das propriedades do material compósito	40
4.2.2	Resultados de deformação dos corpos de provas de material compósito com furo circular.....	44
4.2.3	Resultados do teste da placa de alumínio com furo circular.....	45
4.3	Aplicação do Modelo Analítico	46
4.3.1	Aplicação do modelo analítico para a placa de compósito com furo circular	47
Capítulo 5	.....	52
Considerações finais	.....	52
Referências Bibliográficas	.....	54

Capítulo 1

Introdução

Um dos maiores objetivos presentes na engenharia é o aumento do rendimento dos equipamentos, isto diminui o desgaste da máquina, aumenta a produtividade, diminuindo também o consumo excessivo de energia. Para tal aumento de rendimento é necessário que se diminua o atrito entre as partes moveis e até mesmo a massa de alguns componentes, como: eixos, engrenagens e qualquer outra parte que influencie na potência do equipamento.

As indústrias da aviação e automobilística são dois exemplos da indústria mais interessados no aumento do rendimento com a diminuição do peso dos aviões e carros, mas com uma resistência mecânica consideravelmente alta, por isso, são responsáveis pela maioria dos estudos de novos materiais para essas áreas. Alumínio e os materiais compósitos têm sido as alternativas mais leves para partes estruturais, tanto para carros como para aviões.

Com o crescimento do uso destes materiais, torna-se necessário o estudo de suas características nas mais variadas situações de carregamento, como por exemplo: altas e baixas temperaturas, métodos de união dos componentes, entre outros. O presente estudo apresenta a comparação entre os coeficientes de concentração de tensões do alumínio e de um material compósito. Por ser requisito para alguns métodos de união importantes (parafuso ou rebite), o estudo fará a comparação entre os concentradores de tensão em furos circulares dos dois materiais já mencionados.

1.1 Motivação

O estudo de materiais compósitos se faz importante atualmente devido às diversas aplicações na indústria aeronáutica. Os materiais compósitos possuem ótima relação resistência/peso, comparada aos materiais tradicionais de igual ou maior resistência.

Uma vez que o uso destes materiais se torna cada dia mais presente na indústria, o estudo sobre tais materiais precisa ganhar uma atenção especial para que sejam conhecidas as maneiras que estes se comportam diante das mais variadas formas de carregamento.

1.2 Justificativa

O presente projeto trata da obtenção e da comparação do fator de concentração de tensões K_t de furos circulares entre placas de material compósito ortotrópico e placas de material isotrópico através de ensaios experimentais. Os estudos dos concentradores de tensões têm como material de testes, na maioria das vezes, materiais isotrópicos. Por isso se

fez necessário um estudo mais aprofundado sobre materiais ortotrópicos para determinar-se o efeito de concentração de tensão.

1.3 Objetivo

Por meio da realização de testes de tração em placa de material compósito ortotrópico e de material isotrópico, este projeto visa obter as 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 os dois tipos de materiais estudados: ortotrópico e isotrópico.

1.4 Materiais e métodos

A primeira parte deste projeto constará das referências bibliográficas utilizadas, definições dos materiais de estudo, e os métodos que auxiliarão na segunda parte do projeto. Já a segunda parte contará com dados experimentalmente obtidos por meio dos testes de tração e a utilização do modelo analítico.

Quanto aos corpos de prova: um é de material compósito, composto por uma chapa de fibra de carbono/epóxi fabricada nas dependências do CEFET/RJ e outro de material isotrópico: uma chapa de alumínio.

1.5 Organização do projeto

O trabalho é dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 é uma introdução e aborda a motivação e a justificativa para a escolha do tema a ser desenvolvido, deixando claro os objetivos que se quer alcançar com este estudo e uma descrição do material e dos métodos durante a pesquisa. No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica que trata dos materiais isotrópicos e ortotrópicos, mostrando sua relevância, as características, processos de fabricação e etc. No Capítulo 3, é descrito o modelo analítico usado, que trata de toda a referência teórica e expressões que descrevem o comportamento tanto dos materiais isotrópicos quanto dos materiais ortotrópicos. Em seguida, no Capítulo 4, são apresentados os resultados e informações gráficas de todos os testes realizados, assim como a aplicação do modelo analítico para os valores encontrados. No último capítulo são apresentadas as considerações finais, com a conclusão elaborada a partir dos resultados e a relação entre eles, a comparação com resultados de projetos semelhantes e algumas sugestões para trabalhos posteriores sobre o mesmo tema.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Materiais Compósitos

Um material compósito consiste, numa escala macroscópica, em uma mistura física de dois ou mais materiais (fases). Em nível microscópico, tais materiais possuem diferentes interfaces e propriedades distintas. O objetivo de misturá-los é obter melhores propriedades mecânicas comparadas àquelas que os materiais constituintes possuem separadamente. Além disso, modificar um material existente através da incorporação de outro componente pode levar menos tempo e recursos do que desenvolver um novo material (DANIEL e ISHAI, 1994).

Esta classe de material é constituída por uma fase descontínua, chamada de reforço, inserida em uma fase contínua, chamada matriz. Em certos casos, pode haver necessidade de uma terceira fase localizada entre o reforço e a matriz, chamada de interfase. Isto ocorre para evitar que possíveis interações químicas ocorram entre as outras duas fases. A Figura 1 mostra as fases de um material compósito (DANIEL e ISHAI, 1994).

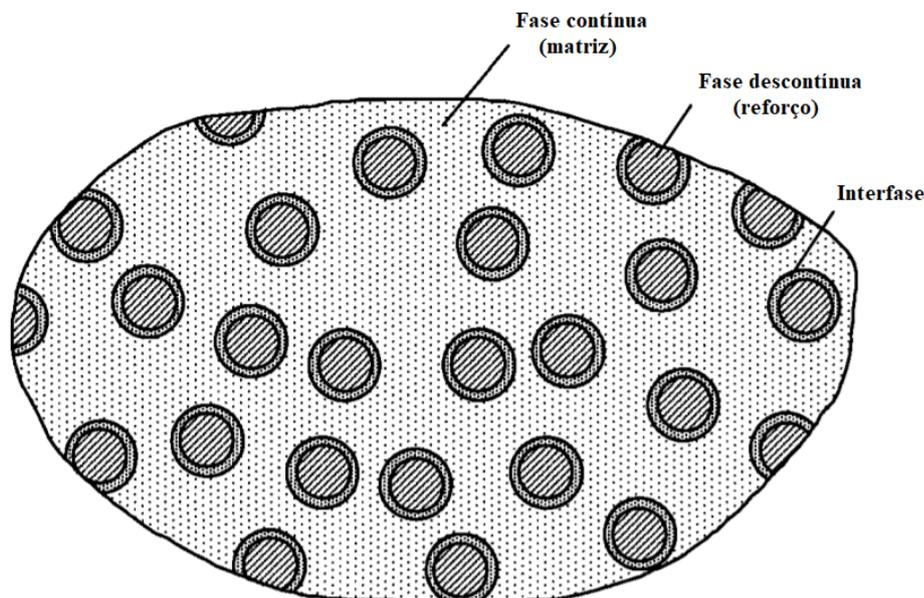


Figura 1 - Fases de um material compósito (DANIEL e ISHAI, 1994 - modificado).

A função do reforço, também chamado de fase dispersa, é realçar as propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas do compósito. É responsável por suportar os esforços envolvidos, geralmente possui elevada rigidez e resistência. Os reforços podem ser

encontrados em forma de fibra ou partículas. Em geral, um material é mais resistente em forma de fibra do que em forma de partícula, devido a geometria alongada e contínua (STAAB, 1999).

A matriz é a fase responsável por preencher os espaços vazios entre uma fibra (ou partícula) e outra, mantendo sua posição relativa, distribuir os esforços mecânicos pelo reforço, além de proteger contra abrasão e efeitos causados pelo ambiente. Geralmente é a matriz que mais influencia nas propriedades mecânicas do compósito, normalmente tendo uma menor densidade, resistência e rigidez do que as fibras. Além disso, é importante que o material da matriz possa ser forçado a envolver o reforço durante o processo de fabricação do compósito. As matrizes são classificadas em metálica, polimérica e cerâmica, cada qual com suas utilidades, aplicações e limitações (STAAB, 1999).

2.1.1 Histórico

A utilização de materiais está diretamente relacionada ao desenvolvimento das civilizações e do ser humano. O homem primitivo utilizava a pedra (cerâmica) combinada com a madeira (polímero natural) para fazer ferramentas e armas, das quais dependia sua sobrevivência. Ao longo da história, foi-se aprimorando o conceito que, mais tarde, veio a ser chamado de compósito. Um dos primeiros registros do uso de fibras como forma de reforço é do antigo Egito, onde são citados tijolos de barro reforçados com palha nos textos bíblicos (Êxodo 5:7). Na *Ilíada* de Homero, o escudo de Aquiles é descrito com um design de compósito laminado (versos 468-480) (DANIEL e ISHAI, 1994).

No século XIX, já se usava varas de ferro para reforçar a alvenaria na construção civil. O uso de metais começou com o ouro, depois cobre, bronze e ferro. No início do século passado, surgiu o uso de resina fenólica com fibra de amianto. Além destes, o aço e o alumínio assumiram papel fundamental em diversos ramos da indústria. Em 1942, foi construída a primeira embarcação feita de fibra de vidro, ao mesmo tempo que plásticos reforçados começaram a ser usados na construção de aeronaves e no desenvolvimento de componentes elétricos. O enrolamento filamentar foi inventado em 1946, seguido por aplicações em mísseis nos anos 50, motivado pelo contexto de Guerra Fria em que se encontrava a Europa (DANIEL e ISHAI, 1994).

A introdução do uso de fibras de boro e de carbono de alta resistência se deram no início dos anos 60, o que abriu possibilidades para a aplicação de compósitos avançados na construção de componentes da indústria aeronáutica, em 1968. Já em 1970, surgem os primeiros compósitos de matriz metálica com uso do alumínio e do boro, enquanto que a

empresa *DuPont* comercializava a primeira fibra de *Kevlar* (aramida), em 1973. Uma grande expansão das aplicações dos compósitos ocorreu no final dos anos 70, alcançando as indústrias automotiva, naval, biomédica e de equipamentos esportivos. Na década de 1990, houve maior aplicação no setor de infraestrutura, trazendo benefícios para o cotidiano da vida em sociedade (DANIEL e ISHAI, 1994).

Atualmente, a tendência que se estabeleceu e vem sendo amplamente estudada é a utilização dos nanocompósitos, que traz todo o potencial dos materiais compósitos para fases de ordem de nanômetros. Enquanto que nos primeiros anos o ser humano usava materiais em sua forma como era encontrado na natureza, as novas pesquisas buscam a utilização de materiais criados e desenvolvidos pela engenharia de materiais. A Figura 2 mostra a variação da importância relativa de cada material em ordem cronológica (DANIEL e ISHAI, 1994).

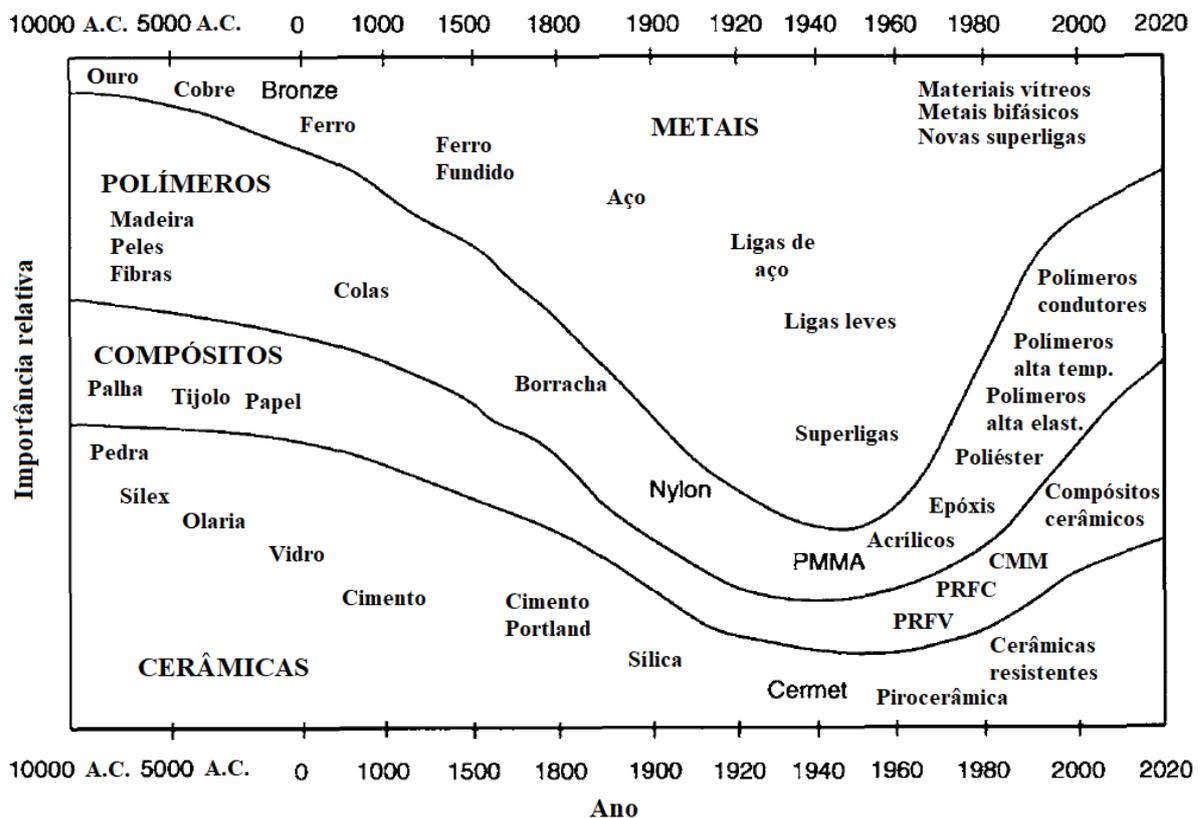


Figura 2 - Importância relativa do desenvolvimento de materiais através da história (STAAB, 1999 - modificado).

2.1.2 Características

As características dos compósitos são diretamente influenciadas pelas propriedades dos materiais constituintes, o modo como estão distribuídos e como interagem entre si. Tais propriedades podem ser descritas como uma soma da fração volumétrica de cada fase ou

podem interagir de forma sinérgica, que não é facilmente contabilizada. Ao descrever um compósito como um sistema, é necessário, além de especificar os materiais que o constituem, descrever a geometria do reforço que será adotada, especificando sua forma, tamanho e distribuição do tamanho. No entanto, mesmo com geometrias idênticas, cada reforço tem suas características únicas, como orientação, concentração e distribuição de concentração. Muitos fatores podem ser importantes para fazer uma descrição teórica das características de um compósito (AGARWAL *et al.*, 2006).

Um material compósito pode ser analisado estabelecendo-se uma relação entre tensão e deformação, assim como a lei de Hooke estabelece para materiais isotrópicos e homogêneos. Estes possuem as mesmas propriedades elásticas em todas as direções, diferentemente dos anisotrópicos e ortotrópicos. A Figura 3 mostra a reação de cada material a aplicação de uma tensão uniaxial, onde o contorno tracejado representa a forma original não deformada. Ao contrário dos materiais convencionais usados na engenharia, os compósitos não são homogêneos e nem isotrópicos. Grande parte comporta-se como anisotrópico ou ortotrópico (STAAB, 1999).

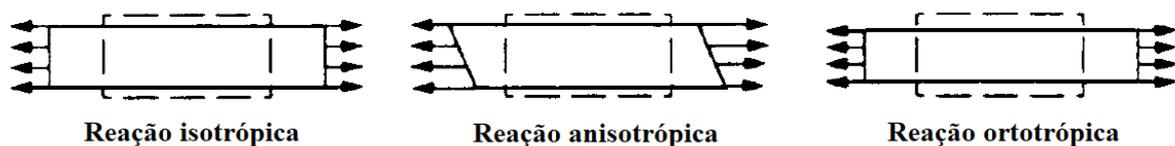


Figura 3 - Reação típica de materiais isotrópicos, anisotrópicos e ortotrópicos sujeitos a tensão axial (STAAB, 1999 - modificado).

As propriedades de um material anisotrópico são diferentes em todas as direções. Geralmente, sob carga de tensão uniaxial, ocorre a adição do alongamento com a deformação por cisalhamento. A deformação real causada pelas cargas aplicadas depende do material, visto que existem diversos graus de anisotropia nos compósitos (STAAB, 1999).

Os materiais ortotrópicos possuem propriedades diferentes em três planos perpendiculares entre si, mas normalmente não ocorre o efeito cruzado nas deformações como nos materiais anisotrópicos. Os deslocamentos transversais, tanto no plano quanto fora dele, não são iguais, porque o coeficiente de Poisson é diferente em dada direção. Apesar da reação do material ortotrópico ser semelhante à do isotrópico, a magnitude dos deslocamentos dentro e fora do plano são diferentes (STAAB, 1999).

A distribuição de concentração das partículas é definida como as relações espaciais entre cada partícula do material. Tais partículas podem ser uniformemente dispersas e localizadas em espaços regulares, de modo que nenhuma delas se toque. Por outro lado, pode-se pensar numa dispersão de tal modo que uma rede contínua que conecta todas as partículas é formada. Tais modos de dispersão em rede podem ter grande influência nas propriedades elétricas do compósito. Um exemplo disso é a concentração volumétrica de fuligem (negro de fumo) na borracha, que acima de 10% aumenta consideravelmente a condutividade elétrica da mistura (AGARWAL *et al.*, 2006).

2.1.3 Reforço

Os reforços são usados para tornar a estrutura do compósito mais resistente. Os materiais mais utilizados como reforço são o vidro, o carbono (também chamado de grafite), o boro e o *Kevlar*. Em menor escala usa-se alumínio, alumina, carboneto de silício, nitreto de silício e o titânio. As fibras, que são o caso mais comum e efetivo nos compósitos, são contínuas e de diâmetro variável entre 3 e 200 μm . São tipicamente elásticas lineares ou perfeitamente plásticas, e geralmente são mais resistentes e rígidas do que o mesmo material em forma de partículas. É uma tecnologia em constante mudança. A Tabela 1 mostra as propriedades das fibras usuais e de outros materiais convencionais (STAAB, 1999).

Tabela 1 - Propriedades das fibras e de materiais convencionais particulados (AGARWAL *et al.*, 2006 – modificado).

Material	Módulo de elasticidade (E) (GPa)	Resistência à tração (σ_u) (GPa)	Densidade (ρ) (g/cm^3)	Módulo específico (E/ρ)	Resistência específica (σ_u/ρ)
Fibras					
Vidro-E	72.4	3.5 ^a	2.54	28.5	1.38
Vidro-S	85.5	4.6 ^a	2.48	34.5	1.85
Carbono (alto módulo)	390.0	2.1	1.90	205.0	1.1
Carbono (alta resistência à tração)	240.0	2.5	1.90	126.0	1.3
Boro	385.0	2.8	2.63	146.0	1.1
Sílica	72.4	5.8	2.19	33.0	2.65
Tungstênio	414.0	4.2	19.30	21.0	0.22
Berílio	240.0	1.3	1.83	131.0	0.71
Kevlar 49 (aramida)	130.0	2.8	1.50	87.0	1.87
Materiais convencionais					
Aço	210.0	0.34–2.1	7.8	26.9	0.043–0.27
Ligas de alumínio	70.0	0.14–0.62	2.7	25.9	0.052–0.23
Vidro	70.0	0.7–2.1	2.5	28.0	0.28–0.84
Tungstênio	350.0	1.1–4.1	19.30	18.1	0.057–0.25
Berílio	300.0	0.7	1.83	164.0	0.38

As fibras de carbono são amplamente utilizadas em compósitos avançados, estando disponíveis em diversas formas, com enorme variedade de rigidez e de resistência, de acordo com o processo de fabricação escolhido. Devido ao modo como são fabricadas, as fibras de carbono são anisotrópicas mecanicamente e termicamente. Na direção radial a rigidez é consideravelmente menor e o coeficiente de expansão térmica é maior, quando comparados à direção axial. A principal desvantagem está relacionada ao custo, que geralmente é alto quando comparado à outras fibras, dependendo das especificações desejadas. A Figura 4 mostra um gráfico comparativo de tensão-deformação das principais fibras tipicamente utilizadas (DANIEL e ISHAI, 1994).

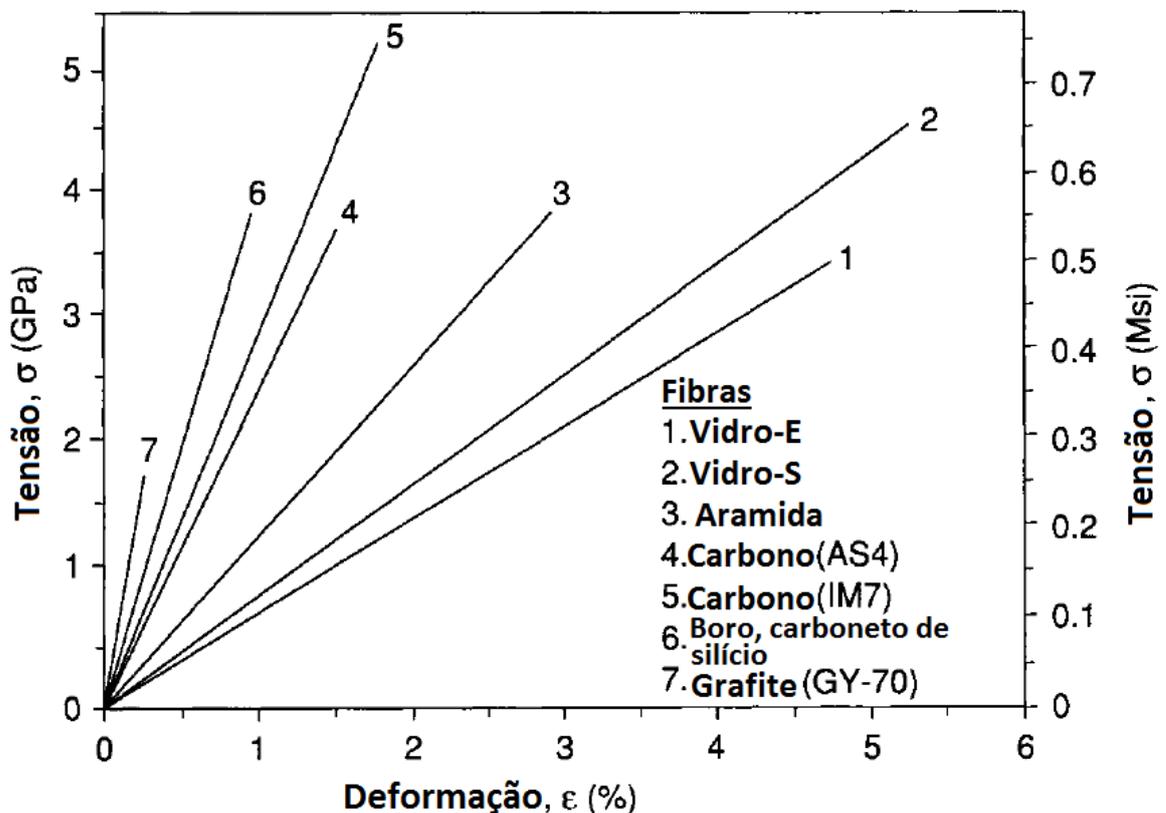


Figura 4 - Curvas de tensão-deformação de fibras tipicamente usadas como reforço (DANIEL e ISHAI, 1994 - modificado).

2.1.4 Matriz

Certas propriedades dos materiais compósitos, como rigidez e resistência transversais, estão ligadas à matriz escolhida. Algumas dessas propriedades determinam as condições de operação permitidas para o produto, incluindo a faixa de temperatura, resistência química, resistência à abrasão e tempo de desintegração. Desempenha também um importante papel

quanto à transmissão do calor e à condutividade elétrica, além de dominar as características externas, como a aparência. Como já mencionado, as matrizes podem ser poliméricas, metálicas, cerâmicas ou de carbono. O custo associado a cada tipo de matriz aumenta de acordo com esta ordem, assim como a resistência à temperatura (BARBERO, 2011) (JONES, 1999).

Matrizes poliméricas são as mais comuns e de maior utilização devido a facilidade de fabricação de peças complexas com baixo custo de ferramental e baixo investimento de capital para produção. Além disso, proporcionam boas propriedades mecânicas, boa adesão e geralmente são materiais de baixa densidade. Muitos compósitos comerciais com diversas aplicações foram inicialmente desenvolvidos com plásticos não reforçados. Matrizes metálicas são recomendadas para usos em altas temperaturas, em atmosfera oxidante e corrosivos. Os metais mais comuns são ferro, níquel, tungstênio, titânio, magnésio e alumínio. Proporcionam elevada resistência, rigidez e dureza. As matrizes cerâmicas tendem a ser frágeis, mas possuem excelente resistência a temperaturas extremas. Reduzem tensões térmicas entre matriz e reforço devido ao baixo coeficiente de expansão térmica. Comumente são usadas em conjunto com outros tipos de matriz. Já as matrizes de carbono são as únicas que mantêm a resistência mecânica inalterada, sendo capazes de alta resistência à temperatura, atingindo temperaturas superiores a 1500 °C em atmosfera não-oxidante. São amplamente utilizadas para fabricação de bicos de foguete, escudos ablativos de reentrada na atmosfera, pastilhas de freio para aeronave e na indústria aeroespacial de forma geral. Um gráfico tensão-deformação de três materiais matriciais típicos é mostrado na Figura 5 (BARBERO, 2011, LEVY NETO e PARDINI, 2006, STAAB, 1999).

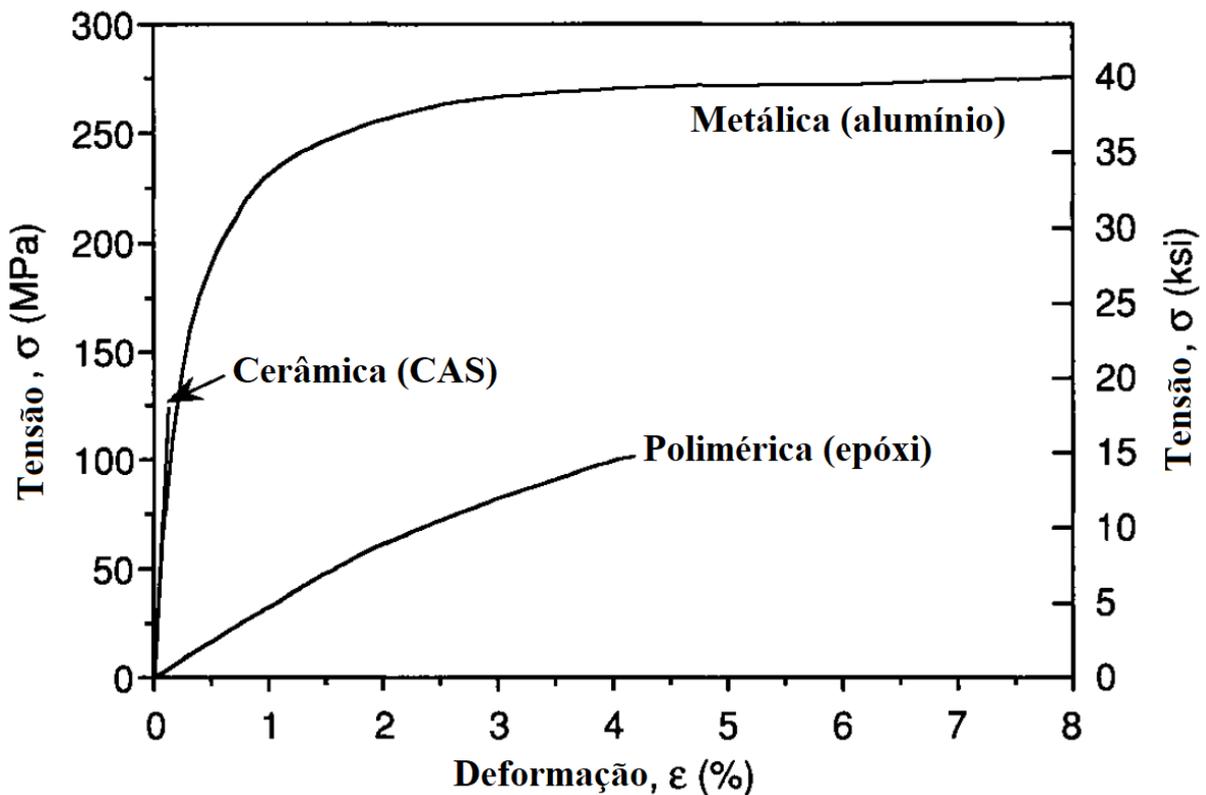


Figura 5 - Curvas de tensão-deformação de três materiais matriciais típicos (DANIEL e ISHAI, 1994 - modificado).

Resinas de epóxi são amplamente usadas como material matricial devido a sua versatilidade, boas propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão. Elas encolhem menos do que outros materiais (1,2 - 4% por volume), o que justifica seu uso em adesivos, já que possui alta capacidade de adesão. Além disso, pode ser desenvolvida para ser menos afetada pela água ou pelo calor em comparação aos demais polímeros matriciais. Também é favorecida pelo processo de cura simples, atingido por temperaturas entre 5 e 150 °C. Sua principal aplicação é na indústria aeronáutica, como resina de laminação em mísseis, na fuselagem e em ferramentas. O custo de resinas epóxis é proporcional ao desempenho da resina, que pode ter grande variação, e normalmente são mais caras do que as feitas de éster-vinílicas (BARBERO, 2011).

2.1.5 Classificação

Os compósitos foram desenvolvidos até hoje com o intuito de melhorar propriedades mecânicas tais como: resistência, rigidez, tenacidade e performance em altas temperaturas. É conveniente agrupar compósitos que possuem o mesmo tipo e geometria de reforço, e usar este critério para classificá-los. Pode-se dividi-los em dois grandes grupos: fibrosos e

particulados, cada qual com suas próprias características e aplicações em diversas indústrias. Naturalmente, é possível subdividi-los em outras categorias mais específicas. A Figura 6 mostra um esquema de classificação comumente aceito para materiais compósitos (AGARWAL *et al.*, 2006) (STAAB, 1999).

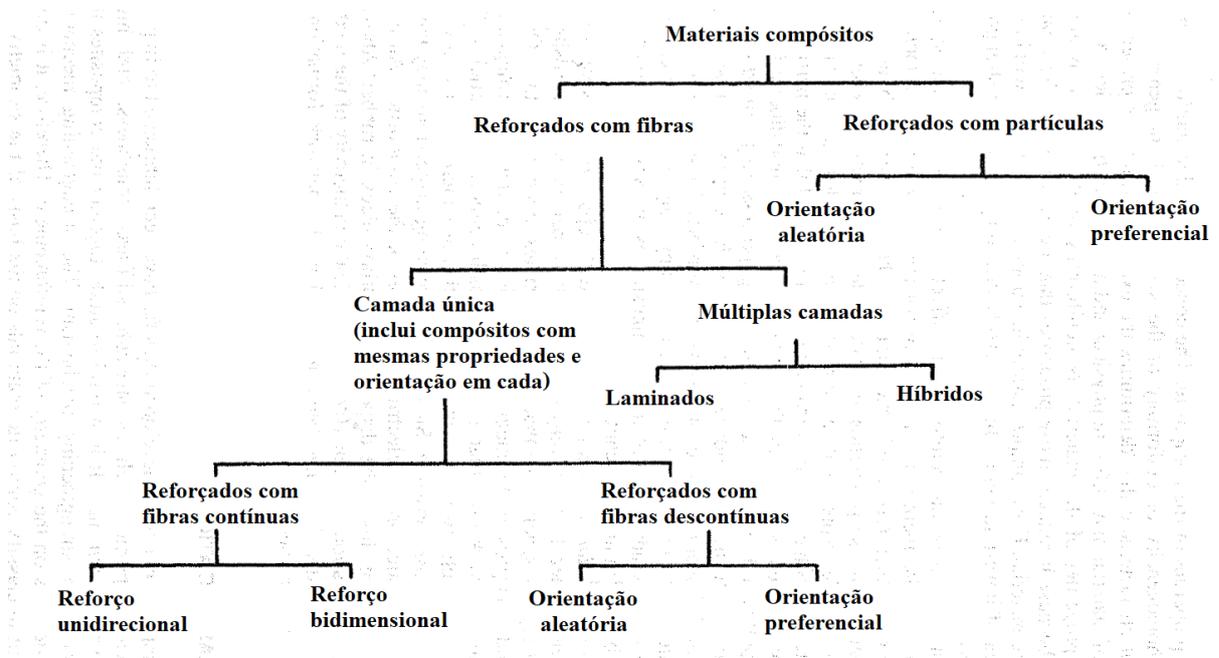


Figura 6 - Classificação dos materiais compósitos (AGARWAL *et al.*, 2006 - modificado).

A partícula pode ser esférica, cúbica, tetragonal, ou qualquer forma regular ou irregular, mas pode-se considerar como equiaxial, o que confere uma natureza não fibrosa a ela. A principal característica da fibra é possuir um comprimento relativamente superior às suas dimensões transversais (AGARWAL *et al.*, 2006).

2.1.5.1 Compósitos particulados

Um compósito particulado pode ser definido como um reforço composto por partículas de pequena dimensão suspensas em uma matriz. O nível de contribuição para as propriedades do novo material é influenciado diretamente pelas dimensões do reforço, que, caso possua longo comprimento, ajuda a evitar a propagação de trincas normais a direção do reforço, prevenindo falhas em compósitos com matrizes mais frágeis. Logo, fibras possuem maior eficiência para melhorar a resistência à fratura de uma matriz (AGARWAL *et al.*, 2006) (STAAB, 1999).

Partículas semelhantes a borracha, quando aplicadas em matrizes poliméricas frágeis tendem a melhorar a resistência à fratura, ainda que, de um modo geral, não sejam muito

eficazes para tal função. Em matrizes metálicas, partículas como cerâmica, metal ou inorgânicas produzem efeitos de reforço por diferentes mecanismos de fortalecimento. Apesar de também contribuírem para a distribuição da carga no compósito, quando comparadas aos fibrosos, possuem menor eficácia. Por outro lado, têm bom desempenho em aumentar a rigidez do novo material (AGARWAL *et al.*, 2006).

A utilização de partículas como preenchimento é, geralmente, devido a sua grande capacidade de melhorar certas propriedades dos materiais matriciais, como condutividade térmica e elétrica, desempenho em temperaturas elevadas, redução do atrito, resistência ao desgaste e à abrasão, usinabilidade, dureza superficial e encolhimento. Na maioria dos casos, também são usados para redução de custos, por serem mais baratos quando comparados aos fibrosos (AGARWAL *et al.*, 2006).

O tipo de partícula e o material da matriz a serem escolhidos para fabricação de um compósito particulado pode ser qualquer combinação de materiais metálicos e não metálicos. Tal escolha depende, majoritariamente, das propriedades finais desejadas, de acordo com a aplicação do mesmo. Por exemplo, partículas de metais frágeis, como tungstênio, cromo e molibdênio, costumam ser incorporadas em metais dúcteis, melhorando o desempenho em altas temperaturas sem perder a ductilidade à temperatura ambiente (AGARWAL *et al.*, 2006).

Segundo STAAB (1999), existem duas subclasses de partículas: flocos e preenchidos. A Figura 7 mostra um esquema ilustrativo da subdivisão citada.

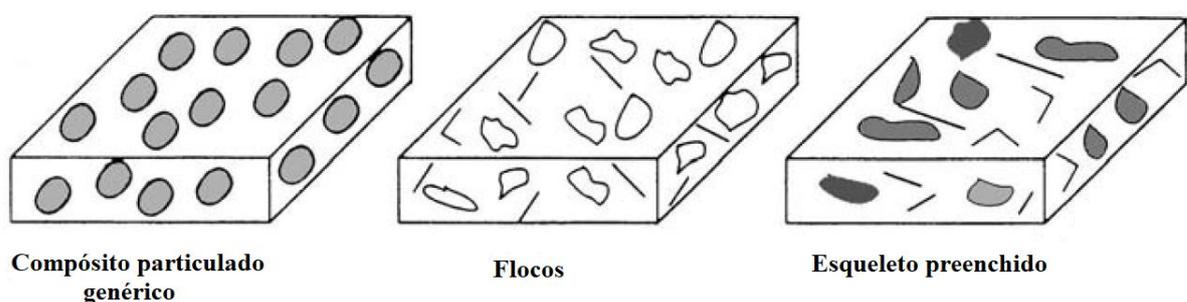


Figura 7 - Esquema representativo de compósitos particulados (STAAB, 1999 - modificado).

Reforços particulados em flocos são, geralmente, compostos por flocos de alta proporção de área superficial por espessura, suspensos na matriz. Os compósitos reforçados com partículas por preenchimento consistem em um esqueleto contínuo atuando como matriz, preenchido por um segundo material (STAAB, 1999).

2.1.5.2 Compósitos fibrosos

Segundo STAAB (1999), um compósito fibroso consiste tanto em fibras contínuas ou fibras curtas (picadas) suspensas em um material matricial. Por causa de sua pequena dimensão transversal, as fibras não costumam ser diretamente utilizadas em aplicações da engenharia, por isso são incorporadas em uma matriz para a formação de um novo material. Em compósitos descontínuos reforçados com fibras, a função exercida pela matriz de distribuir a carga é mais crítica quando comparada aos contínuos. Com isso, os compósitos fibrosos adquiriram grande importância por conseguirem alcançar elevadas resistências (AGARWAL *et al.*, 2006) (STAAB, 1999).

Fibras contínuas são caracterizadas geometricamente por ter uma elevada razão de comprimento por diâmetro. Normalmente são mais fortes e rígidas do que materiais particulados. Dependendo da fibra, pode ter seu diâmetro de 3 e 200 μm . Já as fibras picadas são curtas e espessas, com uma baixa razão comprimento/diâmetro. Para esse tipo de fibra, o diâmetro pode variar de 0,02 a 100 μm . A Figura 8 mostra um esquema representativo de compósitos fibrosos (STAAB, 1999).

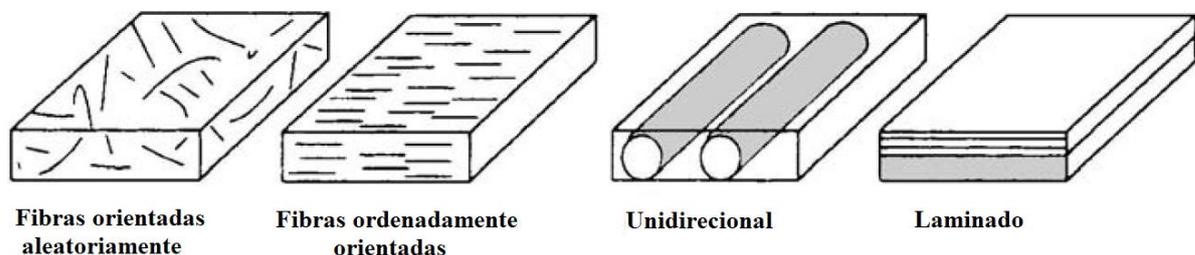


Figura 8 - Esquema representativo de compósitos fibrosos (STAAB, 1999 - modificado).

Os compósitos fibrosos podem ser subdivididos em camada única e multicamadas, com base no estudo de suas propriedades teóricas e experimentais (AGARWAL *et al.*, 2006).

2.1.5.3 Compósitos laminados

Grande parte dos compósitos utilizados em aplicações estruturais são multicamadas, que consiste em várias camadas, idênticas ou diferentes, unidas entre si. Quando os materiais constituintes de cada camada são os mesmos, podem ser considerados como laminados. Caso sejam utilizados diferentes materiais para cada camada, estes são considerados laminados híbridos. Um compósito que possui uma camada de epóxi reforçado com fibra de vidro e outra de epóxi reforçado com fibra de grafite é um exemplo de laminado híbrido (AGARWAL *et al.*, 2006).

Uma lâmina é um arranjo plano (ou curvo) de fibras unidirecionais ou entrelaçadas suspenso em uma matriz. É um material ortotrópico com os eixos principais do material na direção das fibras, normais às fibras no plano da lâmina e normais ao plano da lâmina. Tais eixos são designados como 1, 2 e 3, respectivamente. No caso de um entrelaçado, as direções do urdume e da trama são as direções do plano 1 e 2, respectivamente, como é mostrado na Figura 9 (DANIEL e ISHAI, 1994).

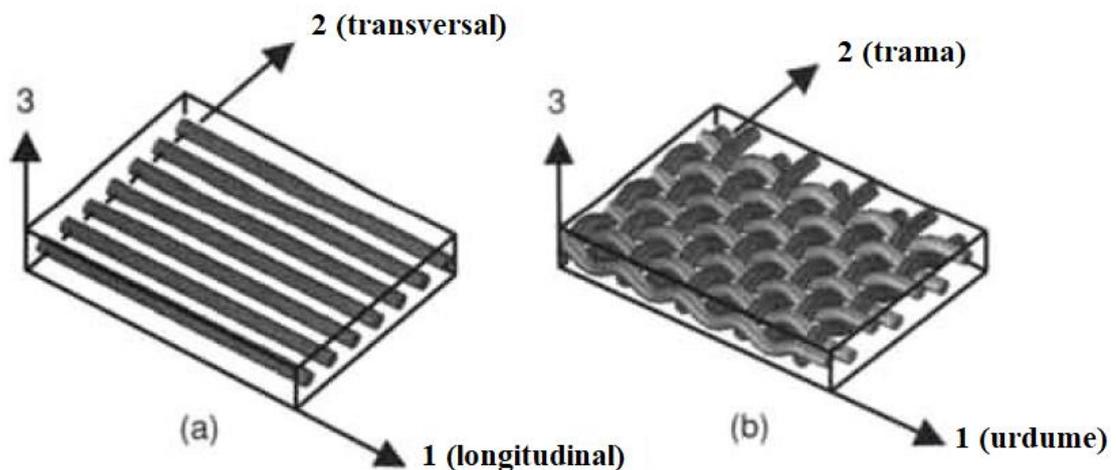


Figura 9 - Lâmina e os eixos principais do material: (a) reforço unidirecional e (b) reforço entrelaçado (DANIEL e ISHAI, 1994 - modificado).

Segundo DANIEL e ISHAI (1994), um laminado é composto de duas ou mais lâminas unidirecionais ou camadas agrupadas e empilhadas em várias orientações. Tais lâminas podem ser de várias espessuras e materiais diferentes. Dependendo da aplicação desejada, pode ser vantajoso aplicar diferentes tipos de fibra dentro da mesma camada unidirecional, como vidro e carbono ou aramida e carbono. O desempenho mecânico de um laminado é diferente do desempenho individual da lâmina que o forma. A performance do laminado depende das propriedades de cada lâmina, assim como a ordem em que estão posicionadas. A Figura 10 mostra um esquema de compósito laminado (DANIEL e ISHAI, 1994) (STAAB, 1999).

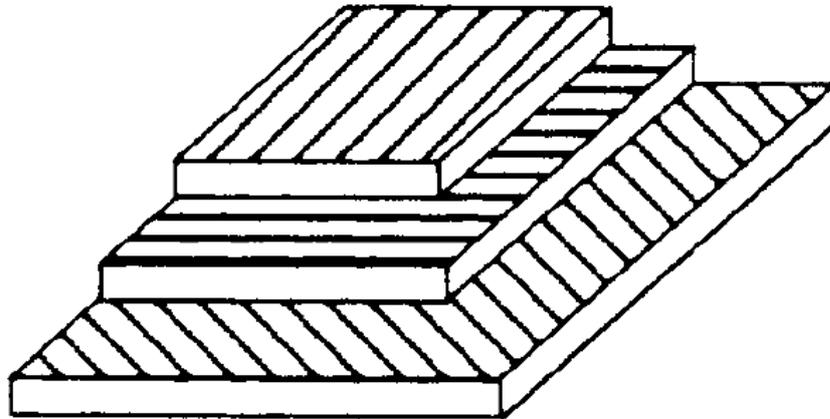


Figura 10 - Esquema de um compósito laminado (STAAB, 1999).

2.1.6 Processos de fabricação

Uma das etapas mais importantes na utilização de materiais compósitos é o seu processo de fabricação. Preferencialmente, este deve ser escolhido simultaneamente com a seleção de materiais e a criação do projeto estrutural, sendo um processo unificado e interativo. A matriz utilizada é o que dita o processo de fabricação a ser usado. O elevado custo dos materiais compósitos ainda é uma barreira significativa para sua ampla utilização no mercado. Boa parte da despesa está associada à falta de métodos de fabricação com bom custo-benefício e à necessidade de inspeções para garantir a qualidade do material após o processo. As propriedades mecânicas do produto final estão diretamente ligadas ao processo de fabricação utilizado (DANIEL e ISHAI, 1994).

Algumas das técnicas utilizadas para compósitos de matriz polimérica não são apropriadas para matrizes metálicas, cerâmicas ou termoplásticas, por exemplo. A natureza diversa dos sistemas de materiais compósitos determina que não existe um único procedimento padrão que possa ser aplicado genericamente a todos os casos. A Tabela 2 mostra um resumo dos procedimentos mais comuns aplicados em compósitos fibrosos, de acordo com o tipo de matriz usado (STAAB, 1999).

Tabela 2 - Processos de fabricação e cura comuns para materiais compósitos (STAAB, 1999 - modificado).

Técnica de fabricação	Compósitos de matriz não metálica	Compósitos de matriz metálica
Moldagem manual	X	
Moldagem a vácuo/autoclave	X	
Moldagem por compressão	X	X
Bobinagem contínua	X	X
Jateamento de plasma	X	X
Metalurgia do pó		X
Infiltração pastosa	X	X
Coextrusão		X
Solidificação controlada		X
Moldagem rotacional		X
Pultrusão		X
Moldagem por injeção		X
Fundição centrífuga		X
Prensa de moldagem		X
Moldagem termoplástica	X	
Moldagem por transferência de resina	X	

BARBERO (2011) elenca as seguintes operações para a fabricação de um compósito de matriz polimérica:

- (1) Posicionamento da fibra na orientação desejada;
- (2) Impregnação das fibras com a resina;
- (3) Consolidação das fibras já impregnadas para remover o excesso de resina, ar ou substâncias voláteis;
- (4) Cura ou solidificação do polímero;
- (5) Extração do molde;
- (6) Procedimentos de acabamento, como remoção de rebarbas.

Para a obtenção dos corpos de prova utilizados neste estudo, foi aplicada a técnica de moldagem por compressão (prensa), antecedida de uma preparação manual. Tais processos foram realizados como objeto de estudo de SODRÉ e COSTA (2018). A produção começa com a disposição e empilhamento do reforço, em forma tecidos, com orientações predefinidas, sobre o molde. É necessário, então, aplicar um produto desmoldante na superfície do molde para que a peça possa ser removida após o término do processo de cura. Para cada camada de reforço colocada, deve-se impregnar a resina pré-formulada com o agente endurecedor apropriado. O número de camadas sobrepostas determinará a espessura do componente moldado (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

Após o posicionamento das lâminas pré-impregnadas no molde da prensa hidráulica, a mesma, utilizando calor e uma pressão relativamente alta, é usada para curar as fibras e a resina, fechando as metades macho e fêmea do molde. Terminada a cura, a pressão é liberada e a peça é retirada do molde. Feito isso, deve-se realizar os procedimentos pós moldagem, como desbaste, por exemplo. A moldagem por compressão é um processo simples e bem estabelecido na indústria, que minimiza parte dos custos de preparação, tem desperdício de material quase nulo e exige pouco trabalho braçal. Um resumo deste processo é mostrado na Figura 11 de maneira ilustrativa (BARBERO, 2011).

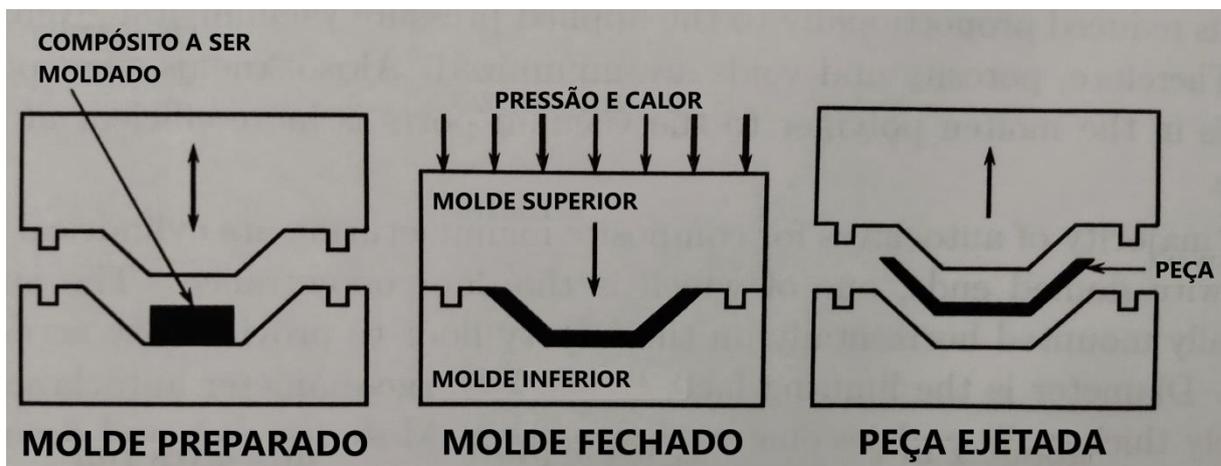


Figura 11 - Moldagem por compressão (BARBERO, 2011 – modificado).

Quando finalizado, o compósito deve cumprir certos requisitos. Deve estar livre de defeitos como trincas, vazios e ondulações na fibra, estar totalmente curado, com rigidez, resistência e resistência à fadiga compatível com o esperado e ter propriedades uniformes. Outros fatores importantes a serem cumpridos são a localização e orientação do reforço, a espessura da camada, a relação fibra-volume, as tensões residuais e as dimensões finais. Durante o processo, a temperatura não deve exceder os valores predefinidos, a distribuição de temperatura deve ser minimamente uniforme em toda a peça e deve-se buscar o menor tempo possível para realizar a cura completa e uniforme (DANIEL e ISHAI, 1994).

2.2 Alumínio

O alumínio é um dos metais que mais se adequa para uso em diversos ramos da engenharia devido a sua ótima combinação de propriedades. Sua ductilidade e maleabilidade permitem fácil transformação através de processos metalúrgicos normais, o que o torna altamente viável para produção em diversas formas requisitadas pela indústria manufatureira. As ligas de alumínio normalmente possuem boas propriedades mecânicas, alta resistência à

corrosão, baixa densidade, boa condutividade térmica e elétrica, boa refletibilidade à luz e ao calor. Além disso, é considerado altamente reativo, possuindo uma película fina e contínua de óxido inerte na presença de ar, que protege o metal contra a corrosão. Depois do aço, são as ligas mais importantes em diversas aplicações com diferentes práticas, sendo o metal não-ferroso mais consumido do mundo (ABAL, 2007) (SCARABOTTO, 2018).

A maioria dos elementos metálicos liga-se facilmente ao alumínio, mas apenas alguns são de maior importância nas ligas comerciais amplamente utilizadas. Entretanto, um bom número de outros elementos é usado como adição para melhorar propriedades e características da liga (HATCH, 1984). Quando combinado com metais como cobre, magnésio, silício, zinco e manganês, juntamente com tratamento mecânico/termomecânico, resulta em ligas com tensão de ruptura que podem atingir 6,0 kgf/mm², podendo ser comparadas a alguns aços estruturais de baixa resistência, mas sendo relativamente mais leves que estes. Já elementos como cromo, níquel, vanádio, boro, prata, chumbo, bismuto, zircônio e lítio proporcionam propriedades especiais às ligas básicas, como melhor usinabilidade, controle de recristalização e resistência a corrosão sob tensão. A presença de elementos como ferro, titânio, sódio, estrôncio e antimônio são impurezas que precisam ser controladas (SOUSA, 2013).

2.2.1 Características

A excelente combinação de propriedades do alumínio é o que o faz ser um dos materiais com maior versatilidade para áreas como engenharia, arquitetura e indústria em geral. Suas principais características podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades físicas típicas do alumínio (ABAL, 2007 - modificado).

Densidade (g/cm ³)	2,70
Temperatura de fusão (°C)	660
Modulo de elasticidade (MPa)	70000
Coefficiente de dilatação térmica (L/°C)	23·10 ⁻⁶
Condutibilidade térmica a 25°C (Cal/cm/°C)	0,53
Condutibilidade elétrica (%IACS)	61

A leveza é um dos principais pontos fortes do alumínio, sua densidade é aproximadamente 35% da densidade do aço e 30% do cobre. Tal característica, aliada ao aumento da resistência mecânica por adição de elementos de liga e tratamentos térmicos, faz

com que ele seja amplamente usado na indústria aeronáutica e do transporte. É também altamente resistente ao tempo, mesmo em atmosferas corrosivas. Seu coeficiente de dilatação térmica é duas vezes maior que o do aço. Tem boa condutividade elétrica, sendo capaz de conduzir tanta corrente quanto o cobre, sendo duas vezes mais leve que o mesmo. Em estado recozido, o alumínio puro possui limite de resistência à tração de aproximadamente 48 MPa, e um limite de escoamento de 12,7 MPa (ABAL, 2007). As curvas típicas de deformação de algumas ligas de alumínio podem ser vistas na Figura 12.

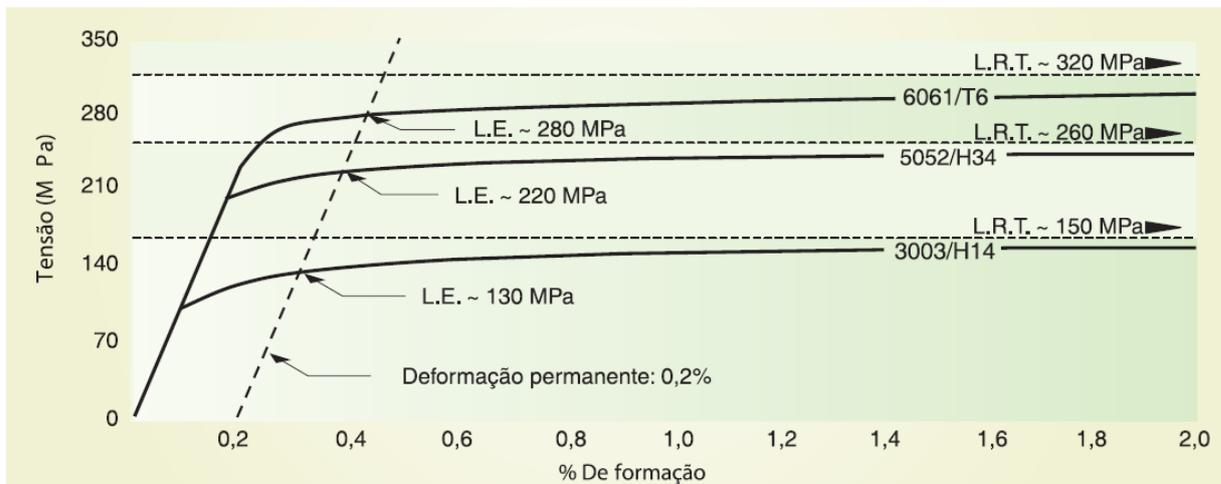


Figura 12 - Curvas típicas de deformação das ligas de alumínio (ABAL, 2007).

Por ser um material não magnético, o alumínio é comumente utilizado como proteção em equipamentos eletrônicos. Também é usado na estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivas, já que não produz faíscas, e é um dos principais materiais para caminhões-tanque que transportam combustíveis. Além disso, por ter uma característica não-tóxica, tem ampla presença em utensílios domésticos, especialmente na cozinha, já que não prejudica o organismo humano (SCARABOTTO, 2018).

2.2.2 Ligas de alumínio

O motivo principal que impulsionou a criação das ligas de alumínio foi aumentar a resistência mecânica sem que as outras propriedades fossem alteradas. Podem ser classificadas, segundo a Norma NBR 6834 da ABNT, em oito grupos, conforme os elementos básicos da sua composição. É um sistema numérico de quatro dígitos, no qual o primeiro identifica o grupo do elemento principal (fora o alumínio) da liga, como é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Designação das ligas de alumínio (ABNT, 2006).

Designação	Componente Majoritário da Liga
1XXX	Nenhum
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Magnésio e Zinco
8XXX	Outros

SOUSA (2013) explica que nas ligas de série 1XXX, os dois últimos dígitos indicam a porcentagem de alumínio que excede 99%, enquanto que nas séries 2XXX e 8XXX apenas diferem ligas de um mesmo grupo. Quando o segundo dígito é diferente de zero significa que tal liga é derivada da de mesmo número com segundo dígito zero, por exemplo, a liga 1350 é derivada da liga 1050. Também são classificadas como tratáveis termicamente (séries 2XXX, 6XXX, 7XXX e algumas 8XXX) e não tratáveis termicamente (séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX).

Por se tratar do objeto principal deste Projeto, as ligas de alumínio-magnésio serão mais detalhadas. Normalmente contém até 5% de Mg, pois acima desse valor a estabilidade é comprometida, principalmente sob influência da temperatura. Possuem excelente soldabilidade, boa usinabilidade, alta resistência à corrosão e boa conformabilidade a frio. Podem apresentar elevada resistência mecânica após tratamentos térmicos ou com o aumento do teor de Mg (SCARABOTTO, 2018). As principais aplicações das ligas de série 5XXX são em carrocerias de ônibus/furgões, equipamentos rodoviários e veículos em geral, estruturas solicitadas, reboques, elementos estruturais, utensílios domésticos, indústria química e alimentícia, construção civil e embarcações (ABAL, 2007). A liga usada neste projeto foi a 5052, um alumínio naval amplamente encontrado no mercado, encomendado conforme especificações de corte, espessura, fornecido em chapas, blocos ou barras.

2.2.3 Processos de fabricação

O alumínio pode ser fabricado facilmente por todos os processos metalúrgicos clássicos, colocando à disposição da engenharia uma gama de formas quando comparadas a

outros materiais. Pode ser fundido por qualquer método conhecido, ser laminado em qualquer espessura (menores até que folhas de papel). As chapas podem ser estampadas, cunhadas, repuxadas e corrugadas. A extrusão também pode ser utilizada para obter diversos perfis de seção transversal constante e grande comprimento. O forjamento é amplamente utilizado, e o metal ainda pode ser impactado. Além disso, grande parte dos métodos de união são perfeitamente aplicáveis ao alumínio, como soldagem, rebitagem, brasagem e colagem (ABAL, 2007).

No processo de forjamento, um bloco, tarugo ou perfil é aquecido até 500 °C (aproximadamente) e pressionado contra uma matriz bipartida, na qual o negativo da peça foi escavado, fazendo o metal escoar, preenchendo a cavidade formada pelo ferramental, fazendo a peça tomar forma. Na trefilação, vergalhões são usados para obtenção de arames de alumínio, que originam os fios de alumínio, que ao serem encordoados, se transformam em cabos condutores. A extrusão é o processo no qual são fabricados os perfis para esquadrias, partindo de lingotes, por meio do forçamento de uma seção transversal a fluir por um orifício de uma matriz, sob efeito de altas pressões. A laminação permite a fabricação de chapas e folhas para diversos usos e aplicações (DOS REIS, 2006). Por se tratar do objeto principal deste Projeto, será mais detalhado a seguir.

Segundo ABAL (2007), a laminação é um processo de transformação mecânica que consiste na redução da seção transversal por compressão do metal através da passagem entre dois cilindros de aço ou ferro fundido com eixos paralelos que giram em torno de si mesmos. As espessuras obtidas podem variar de 0,005 mm a 150 mm, e podem ser obtidas chapas planas ou bobinadas, folhas e discos. Existem dois processos de laminação: a quente e a frio. A laminação a quente trabalha com temperatura mínima igual a temperatura de recristalização (aproximadamente 350 °C), enquanto que a frio trabalha com temperaturas bem inferiores à de recristalização e utiliza o produto recém-saído da laminação a quente (ABAL, 2007). A Figura 13 mostra o processo de laminação a quente e a frio.

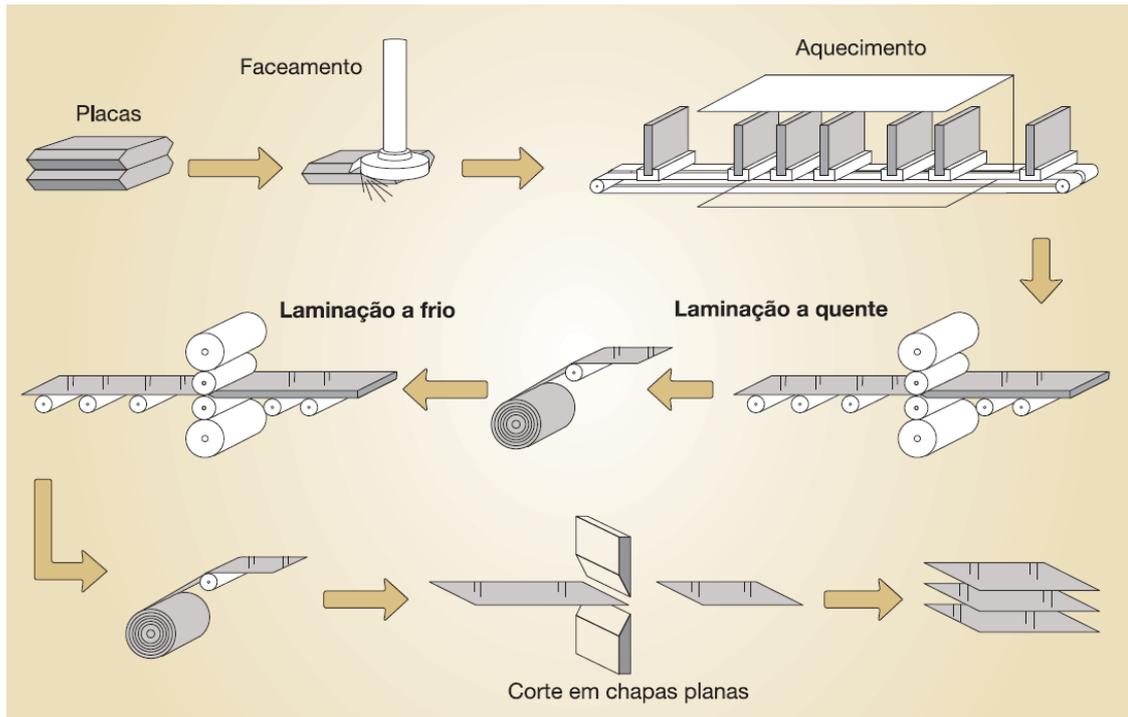


Figura 13 - Laminação a quente e a frio (ABAL, 2007).

Capítulo 3

Modelo Analítico

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos e modelo analítico utilizado.

3.1 Ensaio de tração

Consiste em aplicar uma carga de tração uniaxial crescente em um determinado corpo de prova até que se chegue à ruptura. É feita a medida da variação de comprimento em função da carga que dá origem a um gráfico chamado: curva tensão-deformação.

É um ensaio mecânico destrutivo bastante utilizado na indústria de componentes mecânicos, pois fornece diversos dados quantitativos das características mecânicas dos materiais. As principais características e as de maior importância para o andamento deste estudo são: o limite de resistência a tração, o limite de escoamento e o módulo de elasticidade.

Os resultados obtidos pelo ensaio de tração são muito influenciados por alguns fatores externos ou internos, como a temperatura do material ensaiado, a velocidade de deformação, a anisotropia do material, tamanho de grão, quantidade de impurezas presentes, entre outras.

O ensaio de tração é o tipo mais utilizado para a avaliação de propriedades mecânicas de materiais devido a sua relativa facilidade e rapidez de execução e da grande gama de informações importantes para o projeto e fabricação de peças.

3.1.1 Ensaio convencional

Para a definição da tensão e deformação convencionais, considera-se uma barra cilíndrica e uniforme que é submetida a uma carga de tração uniaxial crescente (GARCIA *et al.*, 1999).

A Figura 14 mostra a representação de uma barra cilíndrica e o desenho esquemático de um ensaio de tração.

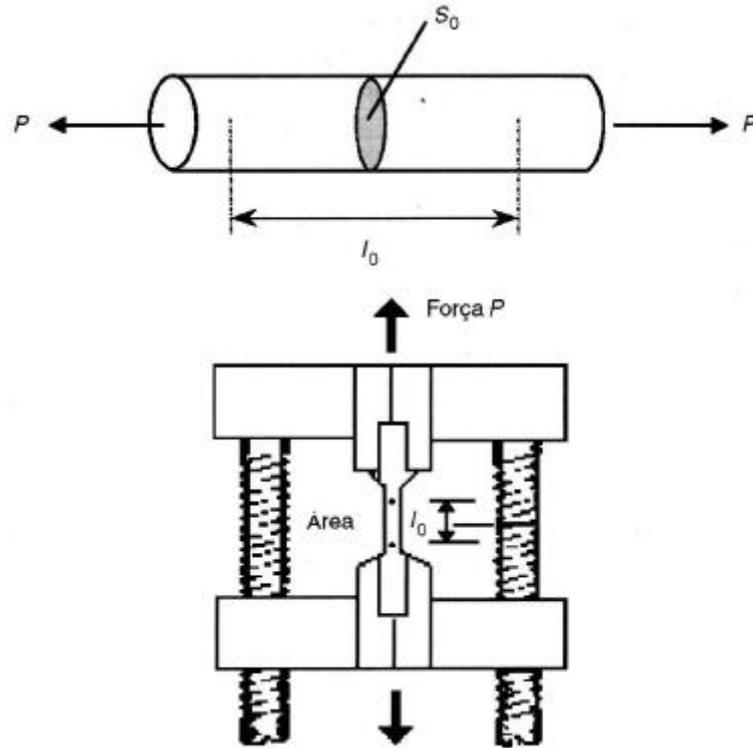


Figura 14 - Barra cilíndrica e esquematização do ensaio de tração (DALCIN, 2007).

A tensão nominal corresponde à força dividida pela área da seção sobre a qual a força é aplicada:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

A Figura 15 ilustra o esboço da curva obtida em um ensaio de tração convencional, conhecida como curva tensão-deformação.

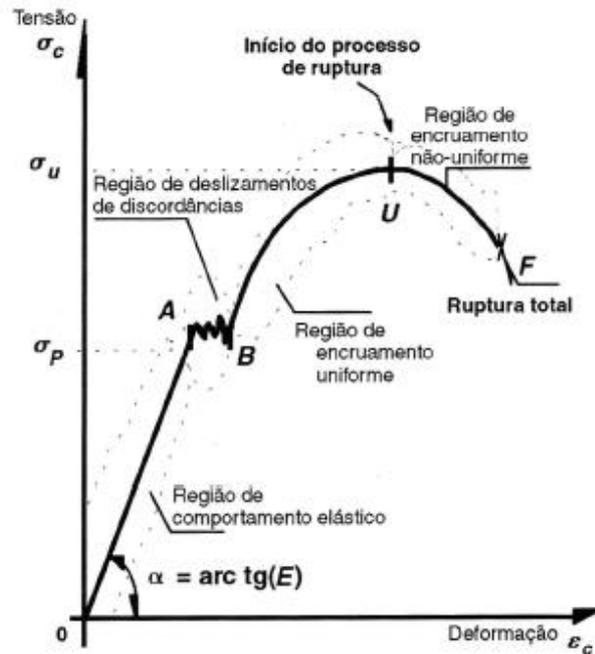


Figura 15 - Curva de um ensaio de tração convencional (DALCIN, 2007).

3.2 Variáveis mecânicas elásticas

A deformação nominal ε_c é dada por:

$$\varepsilon_c = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Onde: ε_c = Deformação (adimensional);

l_0 = comprimento inicial de referência (m);

l = comprimento de referência para cada carga aplicada (m).

Na curva da Figura 15 são vistas quatro regiões de comportamentos diferentes, sendo elas:

OA: Região de comportamento elástico;

AB: Região de escoamento;

BU: Região de encruamento uniforme;

UF: Região de encruamento não-uniforme.

Região de comportamento elástico (OA)

Quando o corpo de prova de um material sofre uma deformação em consequência de uma força e após a retirada da força aplicada, recupera suas dimensões originais.

A deformação elástica de um corpo de prova é dada pela lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Sendo: σ = Tensão;

E = Modulo de elasticidade do material;

ε = Deformação.

Modulo de elasticidade (E)

O modulo de elasticidade fornece uma indicação da rigidez do material e depende fundamentalmente das forças interatômicas, o que explica seu comportamento inversamente proporcional a temperatura (GARCIA *et al.*, 1999).

Região do escoamento (AB)

É o fenômeno localizado que se caracteriza por um aumento relativamente grande na deformação, acompanhado por uma pequena variação na tensão. Pode ser nítido na curva tensão-deformação ou imperceptível, dependendo do material constituinte do corpo de prova (GARCIA *et al.*, 1999).

A tensão máxima atingida na região do escoamento é a tensão limite de escoamento σ_u , que é a máxima tensão que o material suporta antes de começar a se deformar plasticamente.

Coefficiente de Poisson (ν)

Representa a relação entre as deformações transversais e longitudinais dos materiais,

Sendo:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (4)$$

A Figura 16 mostra as contrações nas medidas transversais e o crescimento nas medidas longitudinais numa barra prismática.

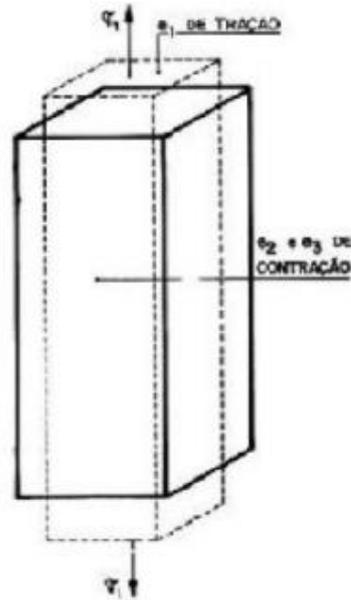


Figura 16 - Deformações experimentadas por uma barra prismática submetida a um carregamento unidirecional (DALCIN, 2007).

Modulo de elasticidade transversal (G)

Corresponde a rigidez de um material quando submetido a um esforço de cisalhamento.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (5)$$

Onde, τ e γ são a tensão e a deformação cisalhante que sofre o corpo de prova, respectivamente. A seguir, a Tabela 5 mostra os dados de módulo de elasticidade e de coeficiente de Poisson de alguns materiais usados na engenharia.

Tabela 5 - Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de alguns materiais (DALCIN, 2007 - modificado).

Material	Módulo de elasticidade, E (MPa)	Coefficiente de Poisson, ν
Alumínio e ligas de alumínio	$6,93 \times 10^4 - 7,98 \times 10^4$	0,32 – 0,34
Latão	$1,02 \times 10^5 - 1,11 \times 10^5$	0,33 – 0,36
Cobre	$1,19 \times 10^5 - 1,26 \times 10^5$	0,33 – 0,36
Ferro fundido	$9,1 \times 10^4 - 1,47 \times 10^5$	0,21 – 0,30
Aço ao carbono e de baixa liga	$1,96 \times 10^5 - 2,24 \times 10^5$	0,26 – 0,29
Aço inox (18-8)	$1,96 \times 10^5 - 2,07 \times 10^5$	0,30
Titânio	$1,06 \times 10^5 - 1,15 \times 10^5$	0,31 – 0,34
Tungstênio	$4,0 \times 10^5$	0,27
Vidro	$4,97 \times 10^4 - 7,94 \times 10^5$	0,21 – 0,27
PMMA	$2,41 \times 10^3 - 3,45 \times 10^3$	0,35
Polietileno	$1,38 \times 10^2 - 3,8 \times 10^2$	0,45
Borracha	0,76 – 4,14	0,50

3.3 Fator de concentração de tensões

Em um projeto mecânico, o projeto é feito visando o uso da menor quantidade de material, para que o peso do componente seja o menor possível e, assim, ter um aumento de rendimento mecânico. Outra preocupação é a mudança brusca de forma geométrica, por exemplo: eixos com áreas de seção transversais diferentes ao longo do comprimento, cantos vivos, furos, entalhes, entre outros. Estas mudanças geométricas formam descontinuidades que poderão dar origem a uma eventual falha do componente mecânico mesmo trabalhando com cargas abaixo da tensão limite de escoamento do material na parte distante da descontinuidade. Isto ocorre devido a um fator de concentração de tensões causado por essas descontinuidades.

Usa-se um fator de concentração de tensão teórico, K_t para relacionar a tensão máxima verdadeira na descontinuidade à tensão nominal. Os fatores são definidos por meio da seguinte equação (BUDYNAS *et al.*, 2011):

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (6)$$

Onde: K_t : Fator de concentração de tensões teórico;

σ_{max} : tensão máxima;

σ_{nom} : tensão nominal.

O subscrito t, em K_t , significa que esse fator de concentração de tensões depende apenas da geometria da peça e do tipo de carregamento, isto é, o material usado não influi no valor de K_t . É chamado de fator de concentração de tensões teórico (BUDYNAS *et al.*, 2011).

A determinação de fatores de concentração de tensão não é muito simples. A maioria dos fatores de concentração de tensão é determinada por meio de técnicas experimentais. O método de elementos finitos também é utilizado (BUDYNAS *et al.*, 2011).

A Figura 17 mostra um gráfico que relaciona o coeficiente de concentração de tensão de uma placa fina retangular com um furo circular em seu centro, de acordo com a razão entre o diâmetro do furo circular e a largura da placa.

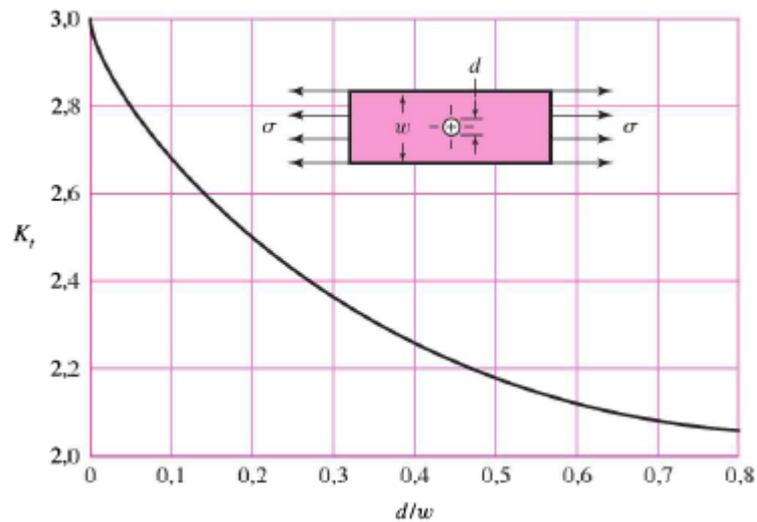


Figura 17 - Gráfico de coeficientes de concentração de tração de uma placa com furo circular (BUDYNAS *et al.*, 2011).

Na prática da Engenharia, especificamente em projetos de elementos de máquinas e estruturas, o engenheiro mecânico deve prestar especial atenção à presença do efeito de concentração de tensões. Este efeito aparece, fundamentalmente, no caso de mudanças bruscas na seção transversal do elemento, provocando picos de tensões nessa região. Esta alteração nos valores das tensões deve ser considerada na hora de dimensionar, escolher o tipo de material e a geometria da peça a ser projetada, pois, sobretudo no caso de carregamento cíclico, o fato de não considerar este efeito pode conduzir à falha prematura do componente mecânico, como pode ser visto na Figura 18 (ANGELO *et al.*, 2005).

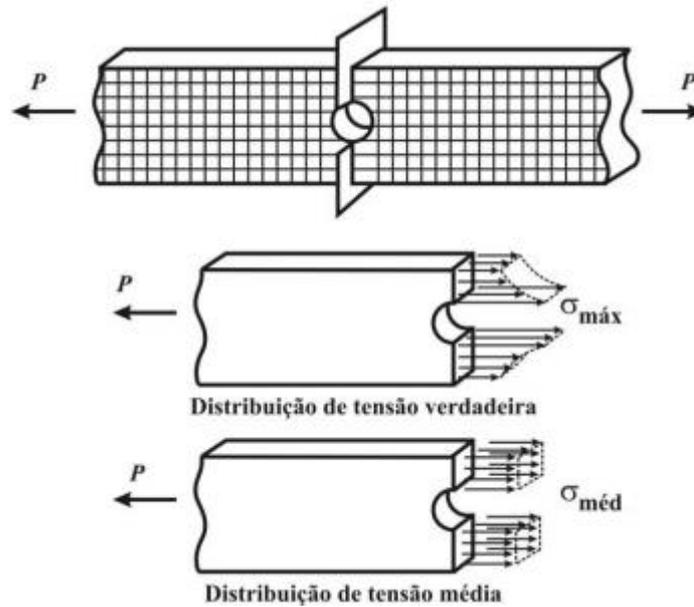


Figura 18 - Efeito da concentração de tensões devido à mudança na seção transversal (ANGELO *et al.*, 2005).

A presença de um furo circular, como mostrado na Figura 18, provoca uma alteração na distribuição de tensões, aparecendo um pico de tensão, $\sigma_{\text{máx}}$. A tensão média, $\sigma_{\text{méd}}$, seria o valor de tensão que desconsiderasse (equivocadamente) o efeito da concentração de tensões.

Determinar a tensão máxima e o local do entalhe, furo, descontinuidade onde ela ocorre, com a maior precisão possível é de grande importância para a segurança e o sucesso do projeto mecânico, pois falhas ocasionadas por concentradores de tensão costumam ser catastróficas e repentinas.

3.4 *Strain gages*

Strain gages ou extensômetros elétricos são sensores, que colados a superfície de um corpo de prova, medem a deformação elástica sofrida pelo mesmo. Seu funcionamento se baseia no fato de que os *strain gages* mudam sua resistência elétrica quando sofrem deformação. Os extensômetros elétricos são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas suas dimensões em variações proporcionais em sua resistência elétrica, e podem ser usados pelos engenheiros de instrumentação. (ANDOLFATO *et al.*, 2004).

Os extensômetros elétricos podem ser usados para medir deformações de onde estão colados e no caso das bordas de furos circulares, por exemplo, mede o aumento das deformações causado pelo detalhe construtivo, como é o caso deste estudo.

A Figura 19 exemplifica a parte de um fio metálico, semelhante aos usados nos extensômetros (no início desta tecnologia), em que l é o comprimento inicial antes da deformação, e este apresenta uma resistência elétrica, R . A linha tracejada apresenta o fio alongado, e seu comprimento agora é $l + \Delta l$ e a resistência é $R + \Delta R$. A resistência R é dada por:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (7)$$

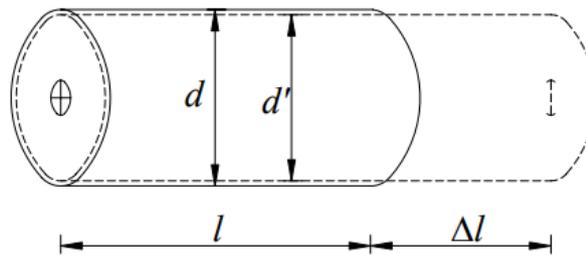


Figura 19 - Deformação de um fio sob tração (ANDOLFATO *et al.*, 2004).

A expressão (8) descreve a relação entre a variação do comprimento do *strain gage*, denominado *gage factor* (GF):

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (8)$$

A expressão (9) descreve a deformação medida pelo *strain gage* através da variação de sua resistência elétrica (ΔR):

$$\varepsilon = \frac{1}{R \cdot GF} \Delta R \quad (9)$$

3.5 Modelo analítico

Nesta seção apresenta-se o método utilizado para a determinação das tensões nominais e as tensões máximas sofridas pelos corpos de prova durante os testes de tração.

Para materiais ortotrópicos, possuem expressões mais complexas do que os materiais isotrópicos. (JONES, 1999).

Para uma lâmina reforçada unidirecionalmente no plano 1-2, como mostrada na Figura 20, um estado de tensão plano é definido por:

$$\begin{aligned} \sigma_3 = 0 \quad \tau_{23} = 0 \quad \tau_{31} = 0 \\ \sigma_1 \neq 0 \quad \sigma_2 \neq 0 \quad \tau_{12} \neq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Em que, conforme a figura 20:

σ_1 : Tensão normal na direção 1;

- σ_2 : Tensão normal na direção 2;
 σ_3 : Tensão normal na direção 3;
 τ_{12} : Tensão de cisalhamento no plano 1-2
 τ_{23} : Tensão de cisalhamento no plano 2-3;
 τ_{31} : Tensão de cisalhamento no plano 3-1;

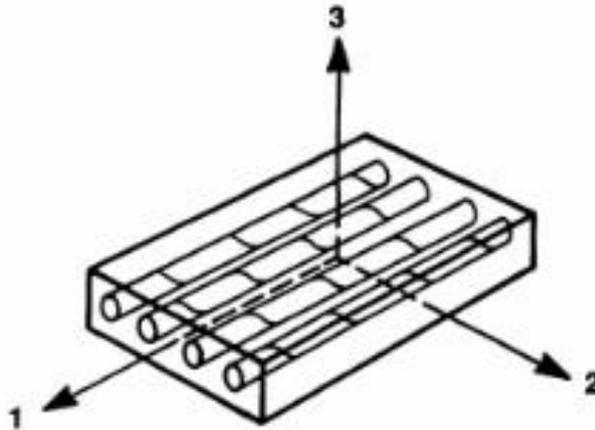


Figura 20 - Lâmina unidirecionalmente reforçada (JONES, 1999).

Para materiais ortotrópicos, a relação tensão deformação é mostrada em (11) (JONES, 1999).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Onde, Q_{ij} é chamado de rigidez reduzida para um estado de tensão plano no plano 1-2.

De (11) serão apenas consideradas as tensões normais, visto que o objetivo deste projeto é a determinação do coeficiente de concentração de tensão em placas com furo circular sob carregamento axial.

Em termos das constantes de engenharia tem-se que:

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

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad (13)$$

Onde:

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (14)$$

Substituindo (14) em (12) e (13), tem-se:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} \quad (15)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} \quad (16)$$

Onde E_1 e E_2 são, respectivamente, os módulos de Elasticidade nas direções 1 (na direção do carregamento) e 2 (na direção perpendicular ao carregamento).

A variável ν_{21} pode ser colocada em função de ν_{12} , E_1 e E_2 , conforme (14), e, portanto, há a necessidade de obter-se apenas o coeficiente de Poisson ν_{12} .

A tensão normal na direção do carregamento segundo a 1ª linha de (11), tem-se:

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} \cdot \varepsilon_1 + \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} \cdot \varepsilon_3 \quad (17')$$

A equação (17') pode ser reescrita como tensão normal nominal conforme a Fig. 24 usando a denominação dos *strain gages* posicionados longe do furo circular:

$$\sigma_{nom} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} \cdot \varepsilon_1 + \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} \cdot \varepsilon_3 \quad (17)$$

A equação (17') pode ser reescrita como tensão normal máxima conforme a Fig. 24 usando a denominação dos *strain gages* posicionados perto do furo circular:

$$\sigma_{max} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} \cdot \varepsilon_0 + \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} \cdot \varepsilon_2 \quad (18)$$

O índice das deformações das equações (17) e (18) foram retirados da nomenclatura da Fig. 24, onde os índices 0 e 1 são paralelos ao carregamento e os índices 2 e 3 são perpendiculares ao carregamento.

O coeficiente de concentração de tensão é dado por:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (19)$$

Para a placa de alumínio o método de análise é muito mais simples, visto que o material é isotrópico, onde:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (20)$$

Sendo: σ = Tensão;

E = Modulo de elasticidade do material;

ε = Deformação.

Onde, para a placa de alumínio:

$$\sigma_{max} = E \cdot \varepsilon_{max} \quad (21)$$

$$\sigma_{nom} = E \cdot \varepsilon_{nom} \quad (22)$$

Por ser isotrópico, o modulo de elasticidade do alumínio é independente da direção e assim, substituindo-se (21) e (22) em (19), tem-se:

$$K_t = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{nom}} \quad (23)$$

Ou seja, para definir o fator de concentração de tensão de um material isotrópico, basta dividir a deformação máxima, aquela que ocorre no ponto mais próximo ao concentrador de tensão, pela deformação nominal, que é a que ocorre em um ponto afastado do concentrador de tensão.

Capítulo 4

Resultados

Neste Capítulo são apresentados todos os corpos de provas utilizados para os testes de tração, as especificações dos materiais utilizados e os procedimentos para a realização dos ensaios.

4.1 Ensaio

Os primeiros ensaios foram feitos com corpos de prova de material compósito. Estes testes tinham como objetivo definir o módulo de elasticidade do material, tanto na direção 1 (a 0° em relação a carga aplicada) como na direção 2 (a 90° em relação a carga aplicada). Para estes primeiros testes foram utilizados dois corpos de prova de material compósito, um com as fibras orientadas a 0° em relação a direção da força aplicada e outro com as fibras orientadas a 90° em relação a direção da força aplicada, como é mostrado na Figura 21.

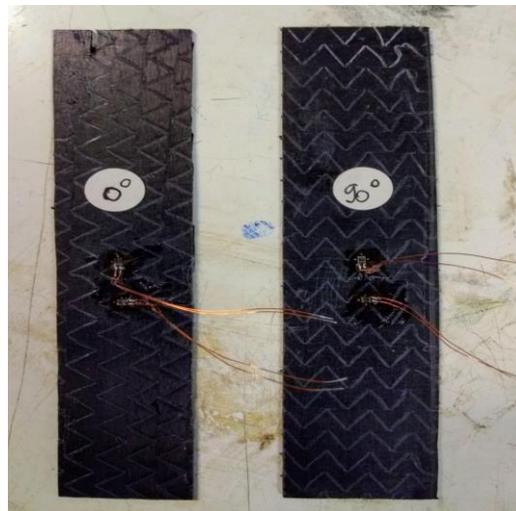


Figura 21 - Corpos de Provas utilizados já com os *strain gages* instalados.

Estes dois corpos de prova foram confeccionados para que se realizasse um ensaio de tração para cada corpo, com o objetivo de verificar, com a utilização de *strain gages*, algumas propriedades mecânicas elásticas do material compósito, são elas: ν_{12} , ν_{21} , E_1 , E_2 .

Dois *strain gages* foram instalados em cada corpo de teste para a aferição das deformações longitudinais e transversais, e ensaiados à tração. Após a instalação dos *strain gages*, os corpos de prova foram colocados na máquina de ensaio de tração para que os dados

de deformação fossem conhecidos. As Figuras 22 e 23 mostram, respectivamente, os corpos de provas já na máquina de teste de tração para o c.p. de 0° e o c.p. de 90° .



Figura 22 - Teste de tração do corpo de prova com fibras a 0° em relação a carga.

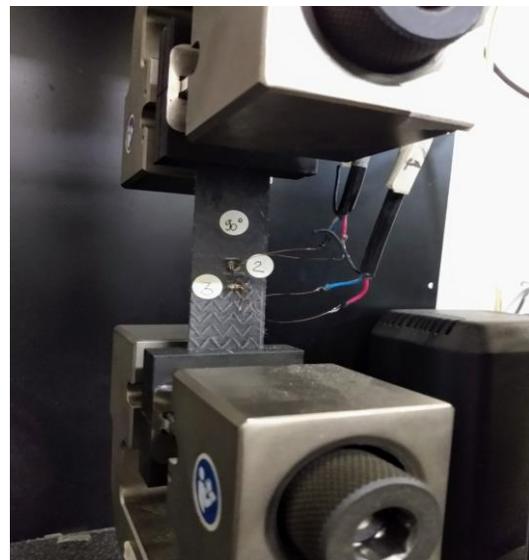


Figura 23 - Teste de tração do corpo de provas com fibras a 90° em relação a carga.

Conhecidos os resultados de deformação e força dos corpos de prova mostrados nas Figuras 22 e 23, foi possível medir o módulo de elasticidade nas duas direções aferidas e o coeficiente de Poisson do material no plano.

Após o ensaio dos corpos de prova, com o objetivo de conhecer as propriedades do material, foram realizados mais dois testes de tração, um numa placa de mesmo material dos

corpos de prova e outro numa placa de alumínio com mesmas dimensões desta última. A Figura 24 mostra um desenho esquemático da placa de material compósito utilizada, com suas respectivas medidas em milímetros e o posicionamento dos *strain gages*.

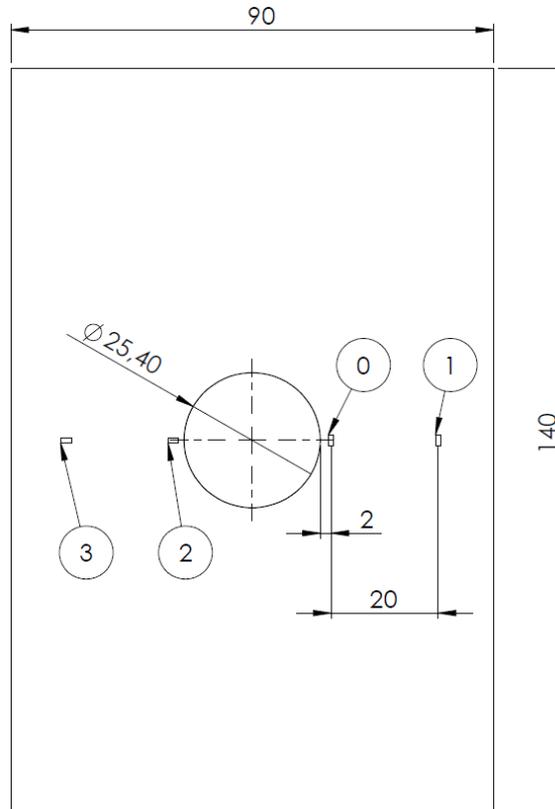


Figura 24 - Desenho esquemático da placa de material compósito utilizada, em milímetros.

No desenho mostrado na Figura 24 há quatro *strain gages* instalados representados pelos balões numerados. Os *strain gages* 0 e 2 medem, respectivamente, a deformação longitudinal e transversal próximo a borda do furo circular e os *strain gages* 1 e 3 medem, respectivamente, a deformação longitudinal e transversal em pontos de deformações nominais (longe da borda do furo circular). A Figura 25 mostra a placa sendo solicitada ao esforço de tração, com a respectiva numeração dos *strain gages*, como já mencionado.

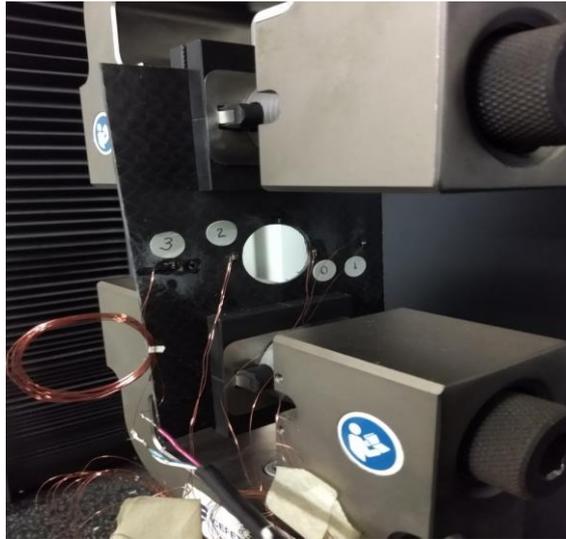


Figura 25 - Teste de tração da placa de material compósito com um furo circular no centro.

A Figura 26 mostra um desenho esquemático da placa de material isotrópico, em milímetros, confeccionada em alumínio, contendo as mesmas dimensões, espaçamentos e posicionamento da placa de material compósito.

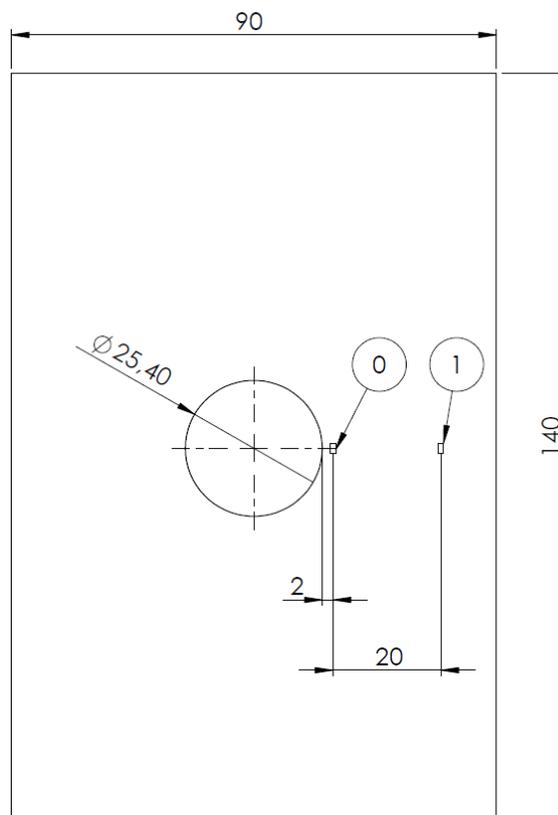


Figura 26 - Desenho esquemático da placa de material isotrópico utilizada, em milímetros.

Os balões numerados de 0 e 1 representados na Figura 26 indicam os *strain gages* instalados, que medem as deformações resultantes a aplicação da carga, sendo o representado pelo número 0 responsável por medir a deformação próxima a borda do furo circular

(deformação majorada pela concentração de tensões), e o número 1 responsável por medir a deformação longe da borda do furo circular (deformação nominal), ou seja, sem a influência do concentrador de tensão. A Figura 27 mostra a placa de alumínio utilizada antes da realização do ensaio.



Figura 27 - Placa de material isotrópico com um furo circular no centro.

Ambos os *strain gages* estão na posição longitudinal (paralelos a direção do carregamento). Visto que o alumínio é um material isotrópico, foi necessário utilizar somente dois *strain gages* para medir a deformação perto e longe do concentrador, pois a reação deste tipo de material é a mesma em qualquer direção. A Figura 28 mostra a placa de alumínio sendo submetida ao esforço axial.

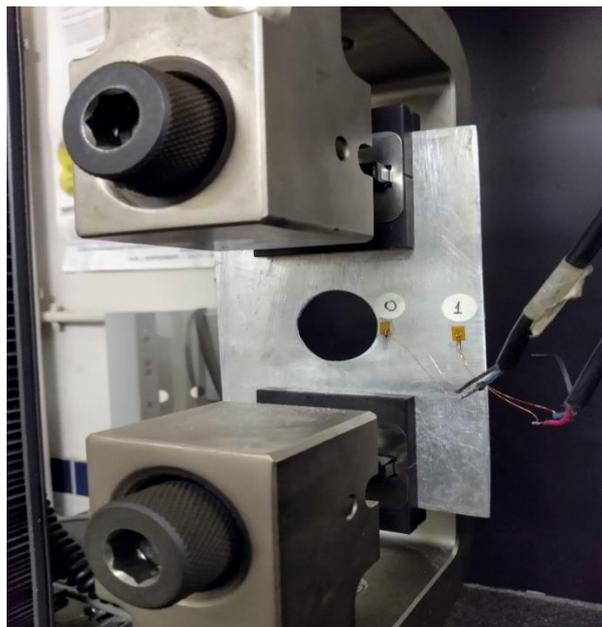


Figura 28 - Teste de tração da placa de material isotrópico com um furo circular no centro.

Importante lembrar que o ensaio não é feito até a ruptura do corpo de prova, os ensaios para este trabalho são feitos dentro do regime elástico do material, ou seja, não ocorrem deformações permanentes ao corpo de prova.

4.2 Resultados dos testes

Neste item serão apresentados os resultados obtidos através dos experimentos realizados com os corpos de prova.

4.2.1 Resultado do teste com carregamento axial para a obtenção das propriedades do material compósito

Estes primeiros ensaios foram realizados para que algumas propriedades do material fossem conhecidas. Foi possível conhecer a deformação pontual no corpo de prova de material compósito através dos *strain gages* instalados e os valores de carga e tempo são fornecidos pela máquina de teste de tração. Através destes dados foi possível obter os valores de propriedades do material como: o coeficiente de Poisson-Poisson e os módulos de elasticidade nas duas direções de fibras onde foram submetidas a carga, a 0° e a 90° em relação ao carregamento axial.

As Figuras 29 e 30 mostram os resultados de deformação por tempo e de carga por tempo, respectivamente, do teste de tração no corpo de prova com fibras orientadas a 0° em relação à carga de tração mostrado na Fig. 22.

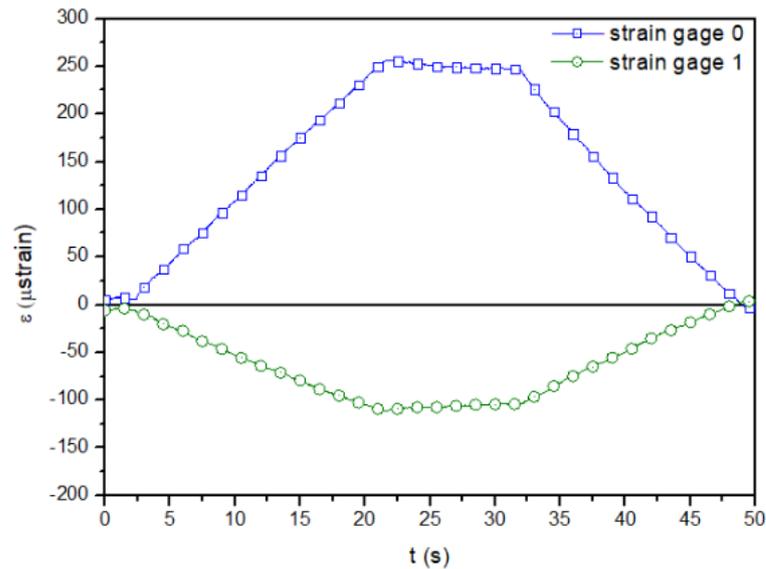


Figura 29 - Deformação em relação ao tempo do corpo de prova com fibras alinhadas a 0° com a carga.

De acordo com a Figura 29, a linha de cor azul, referente ao *strain gage* de número 0, mostra a deformação longitudinal sofrida na direção das fibras do corpo de prova e a linha de cor verde, referente ao *strain gage* de número 1, mostra a deformação sofrida na direção transversal as fibras do material. Nota-se que, enquanto a deformação longitudinal é positiva, a deformação transversal é negativa, ou seja, ocorre um alongamento na direção das fibras enquanto que na direção transversal à direção das fibras o corpo de prova sofre uma contração.

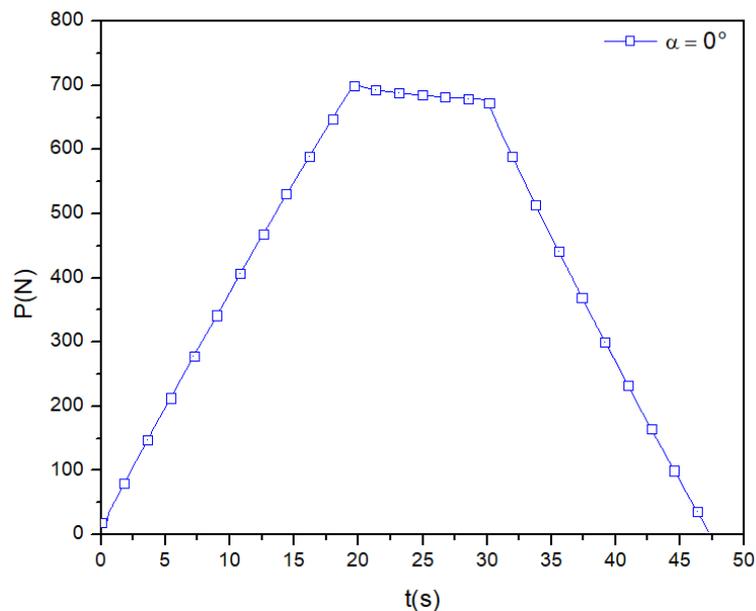


Figura 30 - Força em relação ao tempo do corpo de prova com fibras alinhadas 0° com a carga.

A Figura 30 mostra a carga em relação ao tempo durante todo o ensaio. Nota-se que a carga sofre um aumento com taxa constante desde o início até os 20 segundos de ensaio. Após isso, mantém a carga até os 33 segundos de ensaio e então sofre uma diminuição com taxa constante, até que se anule a carga ao fim do teste.

A Figura 31 e a Figura 32 mostram, respectivamente, o gráfico de deformação por tempo e o gráfico de força por tempo do corpo de prova com fibras orientadas a 90° com a direção da carga, mostrado na Fig. 23.

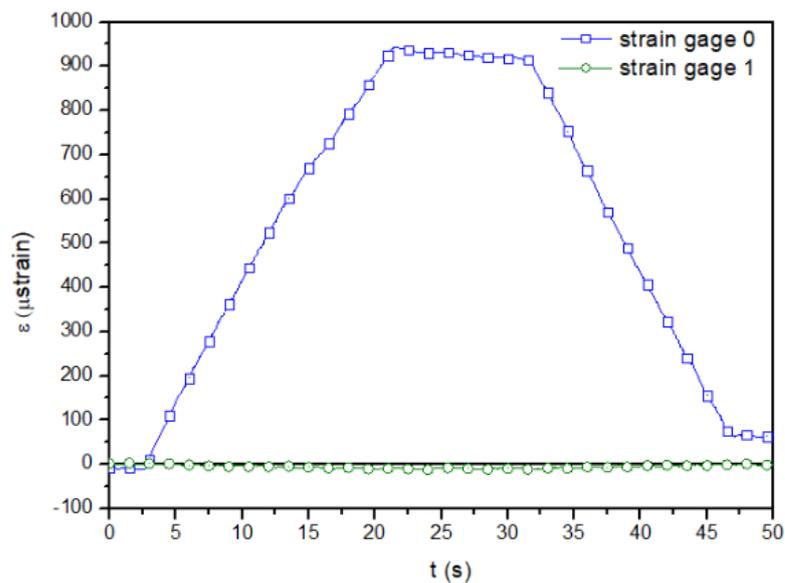


Figura 31 - Deformação em relação ao tempo do corpo de prova com fibras alinhadas a 90° com a carga.

De acordo com a Figura 31, a linha azul, referente ao *strain gage* de número 0, mostra a deformação sofrida pelo corpo na direção da carga e transversalmente às fibras do material e a linha de cor verde, referente ao *strain gage* de número 1 mostra a deformação sofrida na direção transversal a carga aplicada e na mesma direção das fibras do corpo de prova. Nota-se que a deformação transversal deste teste é negativa, ou seja, de compressão, mas é muito pequena em relação a deformação longitudinal. Isto acontece, provavelmente, pois as fibras de carbono têm melhores propriedades quando se trata de esforços de tração, e neste caso, a matriz de epóxi está suportando a maior parte do esforço.

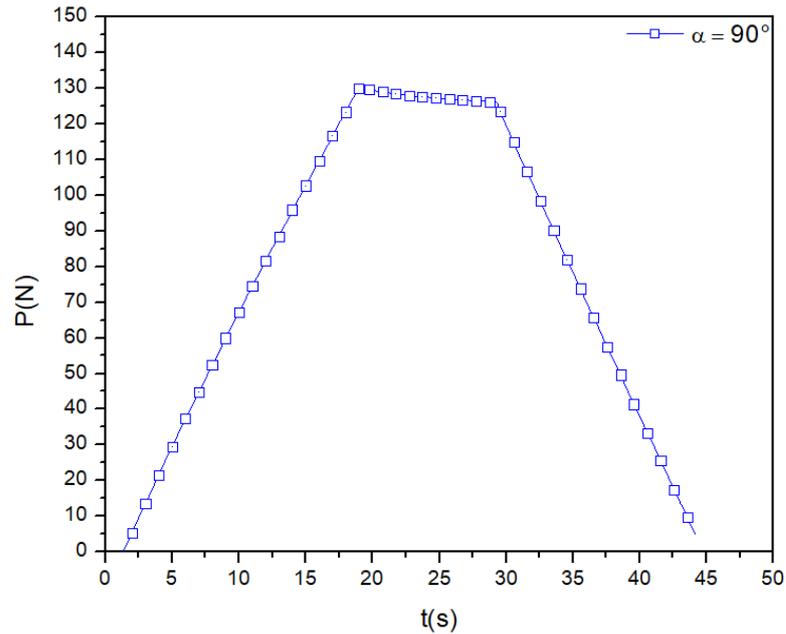


Figura 32 - Força em relação ao tempo do corpo de prova com fibras alinhadas 90° com a carga.

Conforme a Figura 32, a carga máxima utilizada foi de 130N, sendo imposto um aumento de carga com taxa constante durante os primeiros 15 segundos de ensaio, mantendo-se no mesmo valor até os 30 segundos e impondo-se, então, uma diminuição de carga com taxa constante até o final do ensaio. A carga utilizada é menor que no ensaio anterior, porém os dois ensaios ocorreram dentro do regime elástico.

Os resultados de deformação longitudinal e transversal obtidos através dos gráficos mostrados nas Figuras de 29 a 32 são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Deformações longitudinais e transversais dos corpos de prova.

	$\varepsilon_L (\mu\varepsilon)$	$\varepsilon_T (\mu\varepsilon)$
Lâmina 1	$\varepsilon_0 = 250$	$\varepsilon_1 = -105$
Lâmina 2	$\varepsilon_2 = 925$	$\varepsilon_3 = -12$

A Lâmina de material compósito de número 1 tem suas fibras orientadas a 0° em relação a direção da carga aplicada, enquanto a Lâmina 2 tem suas fibras orientadas a 90° em relação a direção da carga. As deformações ε_L e ε_T são as deformações longitudinais e transversais sofridas pelos corpos de prova.

4.2.2 Resultados de deformação dos corpos de provas de material compósito com furo circular

Após os testes com os corpos de prova para a obtenção das propriedades do compósito epóxi-fibra de carbono, foram realizados os ensaios de tração para as placas com o furo circular, uma de material compósito e outra de alumínio 5052. O primeiro ensaio foi feito com a chapa de epóxi-fibra de carbono, com quatro *strain gages* instalados para a medição de deformações longitudinais e transversais, com dois *strain gages* medindo as deformações longitudinal e transversal próximas ao furo circular e os outros dois medindo as deformações longitudinal e transversal em locais mais afastados do furo circular.

A Figura 33 mostra as deformações medidas para a placa de material compósito com fibras orientadas a 0° em relação a carga aplicada.

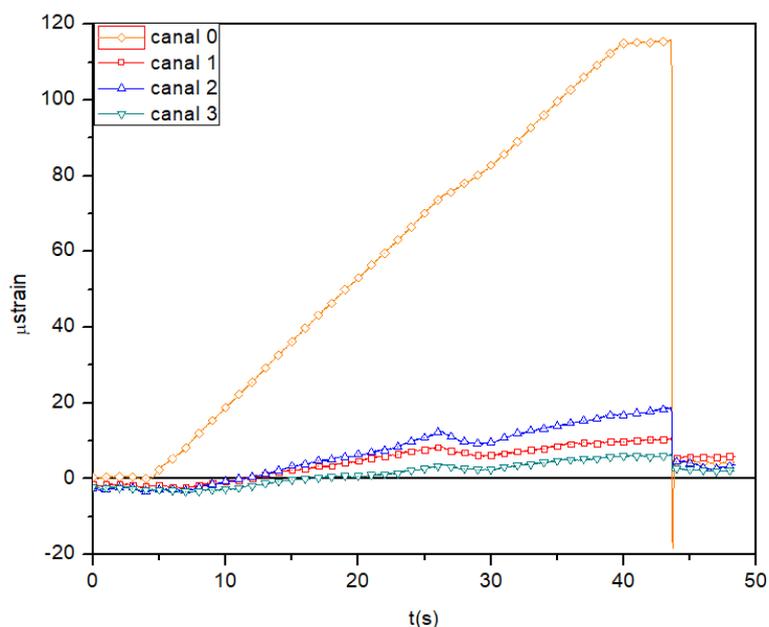


Figura 33 - Deformação em relação ao tempo do corpo de prova contendo o concentrador de tensão com fibras alinhadas a 0° com a carga.

São mostradas no gráfico da Figura 33 as deformações medidas pelos quatro *strain gages* instalados na placa de material compósito com furo circular. Os *strain gages* referentes ao canal 0 e 1 são os que medem a deformação longitudinal da placa, e os canais 2 e 3 medem as deformações transversais. As deformações medidas nos locais mais próximos ao furo circular são representadas pelos canais 0 e 2, assim como as deformações medidas nos locais mais afastados do furo circular são representadas pelos canais 1 e 3, conforme mostrado na Fig. 24.

4.2.3 Resultados do teste da placa de alumínio com furo circular

O ensaio com carregamento axial da placa de alumínio, material isotrópico, onde as suas propriedades independem da direção em que o esforço é aplicado, necessita apenas de dois *strain gages* para medir as deformações, um próximo ao furo circular e o outro afastado do furo circular. A Figura 34 mostra a deformação sofrida pelo alumínio no teste com carregamento axial.

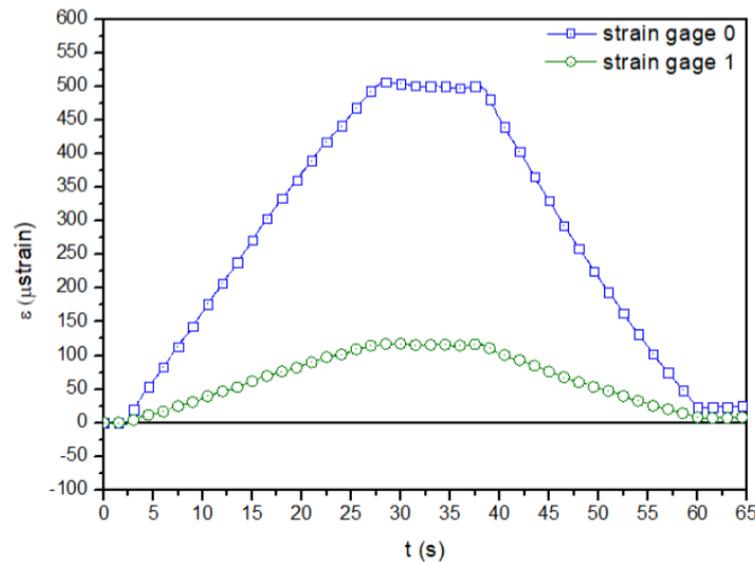


Figura 34 - Deformação em relação ao tempo do corpo de prova de alumínio.

O gráfico apresentado na Figura 34 mostra as deformações experimentadas pelos *strain gages* instalados na placa de alumínio com furo circular. Ambos medem a deformação longitudinal da placa, pois sendo o alumínio um material isotrópico, suas propriedades permanecem constantes, independente da direção da carga. O *strain gage 0* é instalado próximo a borda do furo circular e o *strain gage 1* é instalado afastado da borda do furo circular (vide Fig. 26).

A Figura 35 mostra o gráfico força x tempo que foi imposto no ensaio da placa de alumínio com furo circular.

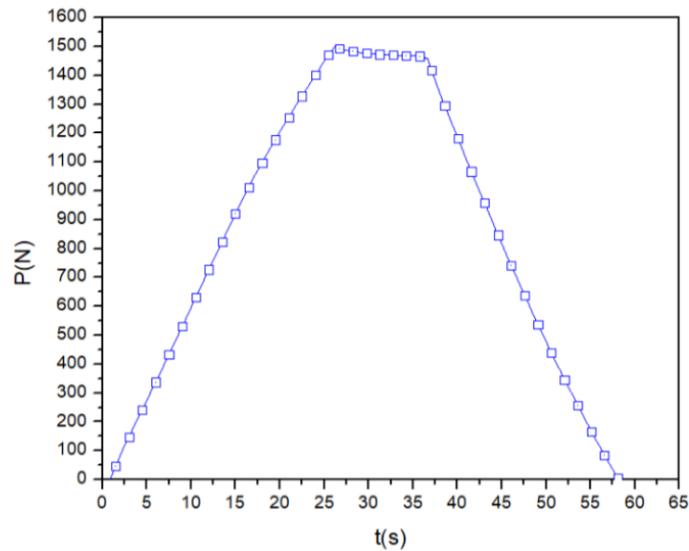


Figura 35 - Gráfico força x tempo do ensaio da placa de alumínio com furo circular.

A carga aplicada à placa de alumínio com furo circular chegou a um máximo de 1500 N e permaneceu constante por 15 segundos, após isso, sofreu uma redução a taxa constante até o final do ensaio, tudo isto ocorrendo, também, no regime elástico

Na Tabela 7 são mostradas as deformações obtidas pelos *strain gages* instalados na placa de material compósito e na placa de alumínio, ambas com furos circulares.

Tabela 7 - Deformações na placa de material compósito e na placa de alumínio.

	ε_0 ($\mu\varepsilon$)	ε_1 ($\mu\varepsilon$)	ε_2 ($\mu\varepsilon$)	ε_3 ($\mu\varepsilon$)
Placa de compósito	116	15	18	6
Placa de alumínio	500	115	-----	-----

4.3 Aplicação do Modelo Analítico

Neste item, o modelo analítico apresentado no item 3.5 é empregado para calcular o fator concentração de tensões tanto da placa de compósito com furo circular quanto da placa de alumínio com furo circular.

4.3.1 Aplicação do modelo analítico para a placa de compósito com furo circular

Utilizando os resultados de deformações medidos com *strain gages* e o modelo analítico, o coeficiente de Poisson no plano 1-2 do material epóxi-fibra de carbono é definido reescrevendo a equação (4):

$$\nu_{12} = \frac{-\varepsilon_{T1}}{\varepsilon_{L1}} \quad (24)$$

$$\nu_{12} = -\frac{-105}{250}$$

$$\nu_{12} = 0,42$$

O módulo de elasticidade na direção 1 (0° entre a direções das fibras e da carga) é calculado pela equação:

$$E_1 = \frac{P_1}{A_1 \cdot \varepsilon_{L1}} \quad (25)$$

$$E_1 = \frac{700}{2,341 \cdot 10^{-5} \cdot 250 \cdot 10^{-6}}$$

$$E_1 = 119,6 \text{ GPa}$$

O módulo de elasticidade na direção 2 (90° entre as direções das fibras e da carga) é calculado pela expressão:

$$E_2 = \frac{P_2}{A_2 \cdot \varepsilon_{L2}} \quad (26)$$

$$E_2 = \frac{130}{2,349 \cdot 10^{-5} \cdot 925 \cdot 10^{-6}}$$

$$E_2 = 5,983 \text{ GPa}$$

A rigidez reduzida, calculada de acordo com a expressão do modelo analítico, Q_{11} :

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} \quad (15)$$

Substituindo em (15) com os valores encontrados:

$$Q_{11} = \frac{1,196 \cdot 10^{11}}{1 - 0,42^2 \cdot \frac{5,983 \cdot 10^9}{1,196 \cdot 10^{11}}}$$

$$Q_{11} = 120,6 \text{ GPa}$$

A rigidez reduzida, calculada de acordo com a equação do modelo analítico, Q_{12} :

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} \quad (16)$$

Substituindo e, (16) com os valores encontrados:

$$Q_{12} = \frac{0,42 \cdot 5,983 \cdot 10^9}{1 - 0,43^2 \cdot \frac{5,983 \cdot 10^9}{1,196 \cdot 10^{11}}}$$

$$Q_{12} = 2,535 \text{ GPa}$$

A tensão máxima sofrida pelo material compósito pode ser determinada utilizando (18):

$$\sigma_{max} = Q_{11} \cdot \varepsilon_0 + Q_{12} \cdot \varepsilon_2 \quad (18)$$

Substituindo os valores encontrados em (18) têm-se:

$$\sigma_{max} = 1,206 \cdot 10^{11} \cdot 116 \cdot 10^{-6} + 2,535 \cdot 10^9 \cdot 18 \cdot 10^{-6}$$

$$\sigma_{max} = 14 \text{ MPa}$$

Da mesma forma, a tensão nominal, também sofrida pelo material compósito pode ser determinada através da aplicação de (17):

$$\sigma_{nom} = Q_{11} \cdot \varepsilon_1 + Q_{12} \cdot \varepsilon_3 \quad (17)$$

$$\sigma_{nom} = 1,206 \cdot 10^{11} \cdot 15 \cdot 10^{-6} + 2,535 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-6}$$

$$\sigma_{nom} = 1,82 \text{ MPa}$$

Determinadas as duas tensões, com a divisão da tensão máxima pela tensão nominal, obtém-se o coeficiente de concentração de tensão para a placa de material compósito:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (6)$$

$$K_t = \frac{14}{1,82}$$

$$K_t = 7,69$$

Ou seja, as tensões próximas às bordas do furo circular, na placa de material compósito, chegariam a ser 7.69 vezes maiores do que as tensões longe da borda do furo circular.

Para materiais ortotrópicos foi necessária a utilização de oito *strain gages* para a determinação do coeficiente de concentração de tensões de uma placa com furo circular carregada axialmente. Os quatro primeiros *strain gages* foram utilizados para o levantamento dos dois módulos de elasticidade e dos dois coeficientes de Poisson (na realidade, apenas um dos coeficientes de Poisson teve que ser levantado experimentalmente, pois o outro tinha uma relação conhecida com o primeiro). Os outros quatro *strain gages* foram utilizados, dois a dois, para o cálculo das tensões máximas e das tensões nominais, utilizadas para a determinação do coeficiente de concentração de tensões.

Com os valores de deformação do corpo de prova de alumínio, de acordo com a Tabela 7 e a seção 3.5, tem-se, para o coeficiente de concentração de tensão para o ensaio da placa de alumínio:

$$K_t = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{nom}} \quad (23)$$

$$K_t = \frac{500}{115}$$

$$K_t = 4,34$$

Para materiais isotrópicos com apenas dois *strain gages*, um posicionado na borda do furo circular e outro afastado do furo circular, foi possível determinar o coeficiente de concentração de tensões, pois materiais isotrópicos possuem apenas um módulo de elasticidade. As deformações e as tensões se relacionam linearmente na fase elástica, pode-se dividir diretamente os resultados das deformações medidas pelos *strain gages* para a determinação do coeficiente de concentração de tensões.

A fim de comparar os resultados obtidos neste projeto com outros trabalhos realizados na área de materiais compósitos, a Figura 36 mostra valores de coeficientes de concentração de tensões em materiais ortotrópicos e isotrópicos com diferentes ângulos entre o esforço e o alinhamento das fibras, segundo VIGNOLI (2016).

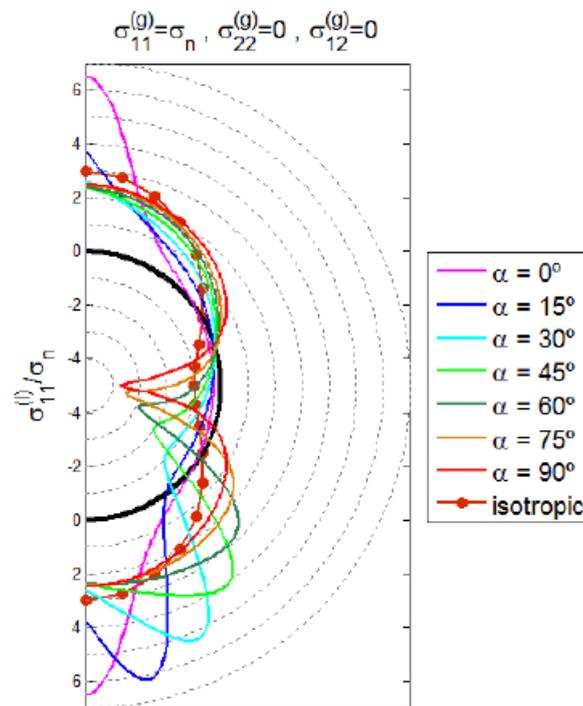


Figura 36 - Razão entre a distribuição da tensão tangencial na borda do furo e a tensão nominal para uma placa com furo circular e diversos valores de α sob diferentes condições de carregamento (continua) (VIGNOLI, 2016).

Considerando que o gráfico obtido por VIGNOLI (2016), mostrado na Figura 36, provém de uma análise teórica, é possível comparar o valor do coeficiente de concentração de tensão de aproximadamente 6.5 quando $\alpha = 0^\circ$ com o valor de 7.69 obtido do material compósito neste projeto (18,3% maior que a referência), assim como o valor de aproximadamente 2,4 (vide Fig.17), para material isotrópico com o valor de 4.34 (neste caso 80% maior que a referência), do alumínio aqui obtido. Embora exista diferenças entre o modelo proposto neste trabalho para material ortotrópico e o modelo proposto por VIGNOLI (2016), ela não chega a ser muito discrepante. Deve-se entender que dificuldades presentes, principalmente, na parte experimental do modelo apresentado neste trabalho como por exemplo a não garantia completa da circularidade dos furos das placas quanto ao posicionamento e tamanhos dos *strain gages*; e ainda a não garantia do campo de tensões trativas estarem totalmente desenvolvidos na região do furo circular.

Capítulo 5

Considerações finais

O estudo dos concentradores de tensão é um vasto campo na área da engenharia e de grande importância para o funcionamento de estruturas mecânicas devido ao aumento da tensão em pontos críticos, onde há a presença de alguma descontinuidade, que pode ser um furo circular para a fixação de elementos como parafusos ou rebites, entalhes para encaixe de peças, entre outros, podendo causar falhas catastróficas mesmo estando submetidas à tensões nominais abaixo da tensão máxima de escoamento do material.

Uma característica importante do presente estudo foi a não utilização do método das misturas para a definição das propriedades do material ortotrópico utilizado, este método analisa a quantidade percentual de reforço e de matriz presente no material compósito para a definição de propriedades como o módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν). Para a definição das mesmas, foi utilizado o método analítico experimental descrito seção 3.5, que se baseia nas deformações obtidas experimentalmente nos corpos de prova com fibras alinhadas em duas direções (0° e 90° em relação à carga).

Com o auxílio de uma abordagem analítico-experimental foi possível determinar a diferença existente nos fatores de concentração de tensão, em placas com furos circulares carregadas axialmente, entre materiais ortotrópicos e isotrópicos. O coeficiente de concentração de tensão da placa de material compósito para um ponto na borda do furo circular em cima do eixo de simetria horizontal teve um resultado aproximadamente 1.77 vezes maior que o coeficiente de concentração de tensão encontrado na placa de material isotrópico (alumínio).

Os resultados obtidos mostram que, de acordo com a utilização, um material ortotrópico pode ter um desempenho mecânico bastante razoável quando comparado a um material isotrópico convencional por possuir menor peso específico e boa relação peso-resistência, mas deve-se levar em conta o coeficiente de concentração de tensões maior que no caso isotrópico.

Como sugestão para trabalhos futuros, esta mesma análise pode ser feita para outros tipos de concentradores de tensão, como entalhes, rasgo de chavetas, furos elípticos, entre outros. A utilização de tensões que ultrapassem o intervalo do regime elástico dos materiais

também é uma sugestão pertinente para que se enriqueça ainda mais o conhecimento experimental sobre o comportamento de entalhes em materiais ortotrópicos.

Referências Bibliográficas

ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. Fundamentos e aplicação do alumínio. São Paulo: ABAL, 2007.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6834 – Alumínio e suas ligas – Rio de Janeiro, 2006.

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas; CAMACHO, Jefferson Sidney; BRITO, GA de. Extensometria básica. Ilha, 2004.

ANGELO, E; LÓPEZ, J., PAPPALARDO J.; “Demonstração do efeito da concentração de tensões empregando o método dos elementos finitos no processo de ensino na engenharia mecânica”. XXXIII – Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 12 – 15 de setembro de 2005.

AGARWAL, B. D.; BROUTMAN L. J.; CHANDRASHEKHARA, K. Analysis and performance of fiber composites. Editora: John Wiley & Sons, 3. ed. New Jersey, 2006.

BARBERO, E. J.; Introduction to composite materials design. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

BUDYNAS, Richard, G.; NISBETT, J., Keith. Elementos de Maquinas de Shigley. São Paulo: AMGH Editora Ltda., 2011.

DALCIN, Gabrieli Bortoli. Ensaio dos materiais. 2007. 41f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia mecânica). Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI). Rio Grande do Sul, 2007. Disponível em: <http://www.urisan.tche.br/~lemm/arquivos/ensaios_mecanicos.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2018.

DANIEL, Isaac, M.; ISHAI, Ori. Engineering Mechanics of Composite Materials, New York: Oxford University Press, 1994.

DOS REIS, Magda N. Processo de produção e uso do alumínio na construção civil. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP, São Paulo, 2006.

DOS SANTOS FILHO, Olmede C. Caracterizações de propriedades microestruturais e mecânicas de ligas AA 1100 e AA 5052 processadas pela técnica de laminação acumulativa (“Accumulates Roll Bonding – ARB”). Dissertação de Mestrado apresentada a Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2009.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Cláudio. Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia, São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 2006.

GARCIA, Amauri.; SPIM, Jaime, Alvares.; SANTOS, Carlos Alexandre. Ensaio dos materiais. Campinas: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1999.

HATCH, J.E. Aluminum: Properties and Physical Metallurgy. ASM, Metals Park, USA, 1984.

JONES, R. M. Mechanics of Composite Materials, 2. Ed., Taylor & Francis Editions, 1999.

SCARABOTTO, Mônica. Estudo da corrosão nas ligas de alumínio 3105 e 5052. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da UFRS, Porto Alegre, 2018.

SODRÉ, Iuri C.; COSTA, Rodrigo M. Determinação experimental de concentração de tensões em materiais ortotrópicos. Rio de Janeiro: CEFET – Maracanã, 2018.

SOUSA, Marcelo do Nascimento. Influência das propriedades mecânicas das ligas de alumínio na usinabilidade – Foco no grau de recalque, na dimensão da zona de fluxo e na microdureza dos cavacos. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU, Uberlândia, 2013.

STAAB, George, H. Laminar Composites, Woburn: Butterworth-Heinemann, 1999.

USGS, United States Geological Survey. Mineral Commodity Summaries, January 2018. Disponível em: <<https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/aluminum/mcs-2018-alumi.pdf>>. Acessado em março de 2019.

VIGNOLI, Lucas L. Um Estudo do Efeito de Concentração de Tensão em Materiais Anisotrópicos Aplicado à Compósitos Laminados Unidirecionais. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2016.