**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Contribuição ao Projeto Estrutural de Cilindros em
Compósitos para Armazenamento de Oxigênio sob Alta
Pressão.**

Hitoshi Taniguchi

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Associado Jonas de Carvalho

**São Carlos - SP
Dezembro de 2008**

Dedicatória

Em memória dos meus pais, Rei e Kioko, pelos inúmeros esforços e sacrifícios por uma educação e formação com qualidade, minha irmã Kazuko pela presença pontual e minha filha Maiha, pelos momentos difíceis.

A g r a d e c i m e n t o s

Ao professor Jonas de Carvalho – contemporâneo de graduação e agora orientador com excelência na área de Compósitos – pela oportunidade do mestrado em Compósitos, além de grande empatia e comprometimento durante o transcorrer do programa.

Aos inúmeros colegas do programa de pós-graduação do SEM, mestrandos e doutorandos, ora pela diversidade, ora pelos momentos de descontração, e pelo compartilhamento de conhecimentos, experiências e dificuldades.

À secretaria do programa de pós-graduação do SEM pelos encaminhamentos necessários de assuntos administrativos.

A todos amigos de fato que me motivaram e incentivaram para o ingresso, continuidade e conclusão do programa de mestrado.

Sumário

I. Resumo.....	i
II. Abstract.....	iii
III. Lista de Figuras.....	v
IV. Lista de Tabelas.....	xi
V. Lista de Abreviações e Siglas.....	ix
1. Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Vasos de Pressão.....	5
2.1.1 Aplicação.....	5
2.1.2 Normas e Códigos.....	6
2.1.3 Construção Usual.....	8
2.1.4 Cálculo	10
2.1.4.1 Carregamentos de Projeto ou Previstos	10
2.1.4.2 Princípios de Projeto e Análise de Tensões	12
2.1.4.3 Análise de Tensões de Membranas	13
2.2 Compósitos.....	21
2.2.1 Introdução	21
2.2.2 Vantagens e Limitações	23
2.2.3 Materiais e Processos	26

2.2.3.1	Fibras	29
2.2.3.2	Matrizes.....	34
2.2.3.3	Processos de Manufatura	36
2.2.4	Mecânica de Compósitos	43
2.2.4.1	Micromecânica	48
2.2.4.2	Macromecânica.....	57
2.2.4.3	Análise de Falhas e Tensões.....	79
2.3	Vasos de Pressão em Compósitos.....	92
2.3.1	Aplicação	92
2.3.2	Regulamentações.....	94
2.3.3	Fator de Segurança	96
2.3.4	Cilindros Metálicos.....	98
2.3.5	Cilindros em Compósitos.....	101
2.4	Método dos Elementos Finitos	109
2.4.1	Introdução.....	109
2.4.2	Etapas de Análise.....	116
3.	Materiais e Métodos	121
3.1	Recursos Materiais.....	121
3.1.1	Sistemas Computacionais	121
3.1.2	Informações Gerais do Cilindro Virtual de Referência.....	122
3.2	Métodos.....	123
4.	Estudo de Casos	127
4.1	Introdução	127
4.2	Estudo de Caso: EC1 (Alumínio 6061-T6)	128

4.3	Estudo de Caso: EC2 (Compósito unidirecional de fibra de vidro tipo E com matriz de resina epóxi)	137
4.4	Estudo de Caso: EC3 (Compósito unidirecional de fibra de carbono AS4 com matriz de resina epóxi).....	148
4.5	Comparação de Resultados.....	161
4.6	Discussões.....	162
5.	Conclusões e Sugestões.....	165
6.	Referências Bibliográficas.....	170
7.	Glossário.....	175

I. R e s u m o

TANIGUCHI, H. *Contribuição ao projeto estrutural de cilindros em compósitos para armazenamento de oxigênio sob alta pressão*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, Brasil, 2008.

Neste trabalho são analisados os aspectos relacionados à otimização estrutural de cilindros de alta pressão em compósitos, a partir do estudo detalhado dos procedimentos de cálculo analítico, utilizando o método análise de rede (*netting analysis*), juntamente com procedimentos baseados em análise numérica pelo método dos Elementos Finitos, considerando modelos de comportamento ortotrópico do material compósito. São considerados cilindros utilizados para armazenamento de oxigênio, fabricados pelo processo de enrolamento filamentar (*filament winding*), comparados a cilindros confeccionados em metal quanto à sua aplicabilidade. Após análise de diferentes estudos de caso, conclui-se que os materiais compósitos podem ser aplicados com sucesso em cilindros de alta pressão, desde que estabelecidos alguns parâmetros decisivos ao projeto estrutural do vaso, tais como: critério de falha mais adequado; determinação de dados experimentais dos materiais utilizados; normas e códigos utilizados no projeto e dados da geometria final do vaso, dependentes do processo de fabricação. Propõe-se também a utilização de um ambiente integrado das atividades de projeto e fabricação do compósito.

Palavras-chave: Cilindros de Alta Pressão. Compósitos. Método dos Elementos Finitos. Filament Winding.

II. Abstract

TANIGUCHI, H. *A contribution to the structural design of composite cylinders for high-pressure oxygen containment.* Dissertation (MSc) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, Brazil, 2008.

In this work the aspects related to the structural optimization of composite high-pressure cylinders are analyzed from the thorough study of analytical calculation, by the use of netting analysis, along with procedures based on numerical analysis by the Finite Element method, considering models of composite materials with orthotropic behaviour. Cylinders used for oxygen containment, manufactured by filament winding process, are considered and compared to the cylinders manufactured in metal in terms of their application. The analyses of different case studies allowed to conclude that composite materials can be applied successfully in high pressure cylinders provided that some critical parameters have been established to the vessel structural design, such as: an adequate failure criteria; determination of experimental data for the composite materials used; standards and codes used in the design and the final vessel geometry data, dependent variables of the manufacturing process. An integrated environment of the design and manufacturing activities is proposed as well in order to embrace all of these aspects.

Key-words: High-Pressure Cylinders. Composites. Finite Element Method.

Filament Winding.

III. Lista de Figuras

Figura 1 - Vaso de pressão horizontal em aço	6
Figura 2 - Representação genérica de um vaso de pressão com componentes típicos	6
Figura 3 - Juntas soldadas: longitudinal e circunferencial	8
Figura 4 - Elementos de uma casca de revolução	13
Figura 5 - Diagrama de corpo livre de corpo cilíndrico sob tensão longitudinal.....	15
Figura 6 - Diagrama de corpo livre de corpo cilíndrico sob tensão circunferencial....	15
Figura 7 - Representação genérica de uma calota sob tensão circunferencial e longitudinal	16
Figura 8 - Situação de equilíbrio de um elemento de uma casca de revolução	17
Figura 9 - Calota elíptica 2:1	20
Figura 10 - Fases de um material compósito	22
Figura 11 - Material ortotrópico com três planos de simetria.....	28
Figura 12 - Tipos de materiais compósitos.....	29
Figura 13 - Conjunto de deposição por moldagem a autoclave	39
Figura 14 - Processo de moldagem por transferência de resina	40
Figura 15 - Processo de moldagem filament winding	42
Figura 16 - Materiais compósitos em diferentes níveis de consideração e análise ...	44
Figura 17 - Lâmina com os eixos de direções principais	45
Figura 18 - Laminado multidirecional em sistema de referência global.....	45
Figura 19 - Processo da micromecânica	49
Figura 20 - RVE típico para uma distribuição retangular (a) e hexagonal (b).....	49

Figura 21 - (a) RVE equivalente a um material homogêneo e (b) estrutura final com o RVE substituído pelo material equivalente	49
Figura 22 - Compósito sob tensão de tração longitudinal	51
Figura 23 - Compósito sob tensão de tração transversal	52
Figura 24 - Compósito sob carregamento de cisalhamento no plano	54
Figura 25 - Compósito sob tensão interlaminar no plano 2-3	56
Figura 26 - RVE sujeito a deformação longitudinal uniforme	57
Figura 27 - Laminado com três camadas e suas direções principais	58
Figura 28 - Estado de tensão em um elemento de volume.....	59
Figura 29 - Componentes de tensão nas direções principais e globais de coordenadas	65
Figura 30 - Geometria de uma laminado de N camadas	70
Figura 31 - Geometria de deformação no plano x-z	71
Figura 32 - Camada k em um laminado.....	74
Figura 33 - Forças no plano em um laminado plano.....	75
Figura 34 - Momentos fletores em um laminado plano	75
Figura 35 - Laminado multi-direcional com as coordenadas das laminas individualmente.....	76
Figura 36 - Processo de projeto estrutural.....	80
Figura 37 - Modos de falha	82
Figura 38 - Modos de dano.....	83
Figura 39 - Conjunto típico de SCBA.....	93
Figura 40 - Confeção de um cilindro sem costura.....	98
Figura 41 - Cilindro isotrópico de parede fina sob pressão interna	100

Figura 42 - Cilindro de alta pressão em <i>filament winding</i> - enrolamento helicoidal .	102
Figura 43 - Elemento de camada helicoidal - direção axial	103
Figura 44 - Círculo de Mohr com as tensões circunferencial e longitudinal	103
Figura 45 - Cilindro de alta pressão em filament winding - enrolamento helicoidal e circunferencial	105
Figura 46 - Elemento de camada helicoidal - direção circunferencial	106
Figura 47 - Círculo de Mohr com as tensões circunferencial e longitudinal	106
Figura 48 - Processo de desenvolvimento de produto tradicional	110
Figura 49 - Processo de desenvolvimento de produto rápido - RPD.....	111
Figura 50 - Diagrama típico de um processo MEF	120
Figura 51 - Cilindro de referência para os estudos de casos	123
Figura 52 - Tensões (critério de von Mises) na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão de serviço (parte interna).....	132
Figura 53 - Tensões (critério de von Mises) na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão de serviço (parte externa).....	132
Figura 54 - Deformações na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão de serviço (parte interna).....	133
Figura 55 - Deformações na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão de serviço (parte externa).....	133
Figura 56 - Tensões (critério de von Mises) na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna)	134
Figura 57 - Tensões (critério de von Mises) na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão <i>burst</i> (parte externa)	135

Figura 58 - Tensões (critério de von Mises) na espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna).....	135
Figura 59 - Tensões (critério de von Mises) na espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão <i>burst</i> (parte externa).....	135
Figura 60 - Deformações para espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna)	136
Figura 61 - Deformações para espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão <i>burst</i> (parte externa)	136
Figura 62 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte interna)	142
Figura 63 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte externa)	142
Figura 64 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte interna).....	143
Figura 65 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte externa).....	143
Figura 66 - Deformações para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte interna).....	144
Figura 67 - Deformações para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte externa)	144
Figura 68 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna).....	145
Figura 69 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 8,75 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna).....	145

Figura 70 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna)	146
Figura 71 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura iterativa de 6,50 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna)	147
Figura 72 - Deformações para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna).....	147
Figura 73 - Deformações para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão <i>burst</i> (parte externa).....	148
Figura 74 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte interna).....	153
Figura 75 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte externa).....	154
Figura 76 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte interna)	155
Figura 77 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte externa)	155
Figura 78- Deformações para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte interna)	156
Figura 79- Deformações para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte externa)	156
Figura 80 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna)	157
Figura 81 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna)	157

Figura 82 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna).....	158
Figura 83 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura iterativa de 2,75 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna).....	159
Figura 84 - Deformações para espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna)	159
Figura 85 - Deformações para espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão <i>burst</i> (parte externa)	160
Figura 86 - Deformações para espessura iterativa de 2,75 mm sob pressão <i>burst</i> (parte interna)	160
Figura 87 – Ciclo de projeto com materiais compósitos	166

I V . L i s t a d e T a b e l a s

Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas de fibras	32
Tabela 2 - Compilação das principais iterações entre os vários tipos de cilindros ..	161

V. Lista de Abreviações e Siglas

2-D: Bi-dimensional

3-D: Tri-dimensional

ACM: Advanced Composite Materials

ASME: American Society of Mechanical Engineers

BS: British Standards

BS EN: British Standards Européen de Normalisation

BS PD: British Standards Published Documents

BSI: British Standards Institute

CAD: Computer-Aided Design

CAE: Computer-Aided Engineering

CEN: Comité Européen de Normalisation

CENELEC: Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

CFRP: Carbon-Fiber-Reinforced Plastics

CLT: Classical Lamination Theory

CNG: Compressed Natural Gas – vide **GNV**

CSA: Canadian Standards Association

DOF: Degrees of Freedom – vide **GDL**

DOT: Department of Transportation

DSM: Direct Stiffness Method

EC: Estudo de Caso

FEA: Finite Element Analysis – vide **MEF**

FEM: Finite Element Method – vide **MEF**

FPF: First Ply Failure

FRP: Fiber-Reinforced Plastics

GDL: Graus de Liberdade

GFRP: Glass-Fiber-Reinforced Plastics

GLP: Gás Liquefeito de Petróleo

GNV: Gás Natural Veicular

IEC: International Electrotechnical Commission

ISO: International Organization for Standardization

MEF: Método dos Elementos Finitos

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NFPA: National Fire Protection Association

NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health

PAI: Poli (amida imida)

PAN: Poliacrilonitrila

PED: Pressure Equipment Directive

PEAD: Polietileno de Alta Densidade

PEEK: Poli(éter-éter-cetona)

PPS: Poli(sulfeto de fenileno)

PMC: Polymer Matrix Composites

PR: Prototipagem Rápida

ROM: Rule of Mixtures

RP: Rapid Prototyping – vide **PR**

RPD: Rapid Product Development

RVE: Representative Volume Element

SCBA: Self-contained Breath Apparatus

SLC: Standard Laminate Code

SPP: Stress-partitioning Parameter

UD: Unidirecional

ULF: Ultimate Laminate Failure

1. Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Introduziu-se o conceito de vasos de pressão dada a necessidade de armazenamento e manuseio de fluidos (principalmente gases) em grandes quantidades em recipientes fechados de volume reduzido, utilizando-se a propriedade de alta compressibilidade dos fluidos gasosos.

A diferença de pressão entre o armazenamento e o meio externo (geralmente o meio ambiente) torna potencialmente perigoso o manuseio de tais vasos, tendo historicamente ocasionado muitos acidentes fatais. Nesse ponto reside a importância das etapas de dimensionamento, manufatura e operação, as quais são regidos por normas e códigos (do idioma inglês: *code* – normas com força de lei) em muitos países, com grande ênfase nos parâmetros de pressão e temperatura de segurança máxima de operação.

Entre as muitas aplicações comerciais, industriais e domésticas dos vasos de pressão, podem ser citadas: caldeiras a vapor, tanques de ar comprimido, torres de destilação, fornos auto-clave, vasos de reatores nucleares, cilindros de ar comprimido para mergulho ou de resgate para a operação de bombeiros, cilindros pneumáticos, cilindros de gás GNV e muitos outros. Portanto, devido à expressiva gama de aplicações, a importância da segurança torna a concepção e dimensionamento de vasos de pressão de essencial importância no processo de desenvolvimento e no ciclo de vida do produto. Dentre os diversos itens de dimensionamento considerados, a seleção do material de construção merece

especial importância e está intimamente relacionada à aplicação do vaso. Historicamente, a grande maioria dos vasos é construída com materiais metálicos (ferrosos e não-ferrosos), sendo que nos últimos anos uma nova classe de materiais tem sido aplicada com destaque e uso crescente, que são os materiais compósitos, devido às suas características e propriedades.

1.2 Objetivos

O presente trabalho traz por objetivo contribuir para a otimização estrutural de cilindros de alta pressão em compósitos, a partir do estudo detalhado dos procedimentos de cálculo analítico, juntamente com procedimentos baseados em análise numérica pelo método dos elementos finitos. Serão considerados cilindros utilizados para armazenamento de oxigênio, fabricados pelo processo de enrolamento filamentar (*filament winding*), comparados a cilindros confeccionados em metal (Alumínio) quanto à sua aplicabilidade.

Como contribuição significativa deste trabalho considera-se o estabelecimento da formulação e procedimento adequado, baseado em método analítico e no método dos elementos finitos, para o projeto de vasos de pressão em materiais compósitos. Embora neste trabalho vá se particularizar a aplicação para cilindros de armazenamento de oxigênio, os conceitos a serem desenvolvidos podem ser, com poucas adequações, aplicados a outros tipos de cilindros de armazenamento.

Os objetivos específicos são:

- Levantamento bibliográfico disponível sobre os diversos temas presentes, tais como: vasos de pressão de uma forma geral, normas e códigos, teoria de tensões de membranas, compósitos e suas aplicações, análise de tensões e

falhas, vasos de pressão em compósitos, processo de desenvolvimento de produtos, análise numérica;

- Levantamento de fabricantes de cilindros de alta pressão para armazenamento de oxigênio e com respectivos dados construtivos para referência;
- Seleção de métodos de dimensionamento estrutural mais adequado para cada tipo de cilindro, conforme o material, incluindo critérios de falhas em compósitos;

1.3 Estrutura da Dissertação

O Capítulo 1 apresenta aspectos gerais do trabalho tais como considerações iniciais, relevância e objetivos.

O Capítulo 2 faz a fundamentação teórica de apoio ao trabalho através de uma revisão bibliográfica dos assuntos envolvidos. Os assuntos tratados são: vasos de pressão, teoria dos compósitos, métodos de análise numérica (no presente trabalho, MEF – Método dos Elementos Finitos) e vasos de pressão em compósitos.

O Capítulo 3 descreve os recursos necessários para realização das análises e a metodologia empregada para a obtenção de resultados.

O Capítulo 4 apresenta um estudo comparativo através de um cilindro de referência, no qual empregam-se métodos analíticos de dimensionamento estrutural e são verificados numericamente para estudos de casos de configurações de cilindros a serem construídos em três materiais diferentes (um em metal não-ferroso e dois totalmente em compósitos) e posterior compilação de resultados para análise crítica de validação e discussões.

No Capítulo 5, conclui-se quanto à aplicabilidade de compósitos em cilindros de armazenamento de oxigênio sob alta pressão e sugere-se por uma complementação ou continuidade futura do trabalho em questão.

Por fim, os Capítulos 6 e 7 apresentam as referências bibliográficas e um glossário, respectivamente.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Vasos de Pressão

2.1.1 Aplicação

Os termos “equipamentos de pressão”, “vasos de pressão” e “sistemas de pressão” são constantemente sujeitos a discussão por inúmeros comitês técnicos que elaboram legislações, regulamentações e normas técnicas. Isso devido aos diferentes significados dados aos termos técnicos em diferentes países com suas diretivas e normas locais, ou seja, tornando o assunto de alta complexidade e em constante mudança (Matthews, 2001).

Os vasos de pressão (Figura 1), em uma definição simplificada, são reservatórios fechados de armazenagem de fluidos – gases ou líquidos – a uma pressão diferente da ambiente. As extremidades de fechamento no corpo cilíndrico são denominadas de calotas ou domos. Geralmente também fazem parte de um conjunto (Figura 2) os seguintes componentes: válvulas, bocais, flanges, plaquetas de identificação, estruturas de sustentação (cavaletes de apoio para vasos horizontais, e pés ou saias para vasos verticais) e elementos de conexão (orifícios de entrada ou saída, drenos, olhais).

Como aplicações típicas de vasos de pressão têm-se: reservatórios industriais de ar, tanques domésticos de água quente, cilindros de ar para mergulho, câmaras de descompressão, torres de destilação, autoclaves, vasos na área de mineração e pólos petroquímicos, vasos de reatores nucleares, interiores de espaçonaves e submarinos, reservatórios pneumáticos, reservatórios de ar de freios automotivos e

ferroviários, vasos de armazenagem de gases liquefeitos (amônia, propano, butano e GLP – gás liquefeito de petróleo).

Figura 1 - Vaso de pressão horizontal em aço

Figura 2 - Representação genérica de um vaso de pressão com componentes típicos

(Adaptado de Pressure Vessel Engineering Ltd – Canadá, 2002)

2.1.2 Normas e Códigos

As normas e códigos (do idioma inglês: *standards* e *codes*, respectivamente) existentes são guias completos para desenvolver vasos de pressão nos quais são

especificados detalhes de projeto, manufatura, testes e inspeções de uso. No aspecto técnico de engenharia são enfatizados o campo de tensões, fadiga, fluência e outros em detalhes (Matthews, 2001).

Em termos ideais todas as normas possuem suposições técnicas idênticas, entretanto na situação prática são diferentes. Isso devido aos diferentes países e corpos técnicos que conduzem os mesmos tópicos a diferentes conclusões ou enfoques. Entretanto, isso não significa que uma norma ou código esteja certo ou errado (Matthews, 2001).

As seguintes normas e códigos são usualmente adotadas para vasos de pressão, como segue:

- *ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC);*
 - *ASME Code Section VIII Division 1;*
 - *ASME Code Section VIII Division 2 Alternative Rule;*
 - *ASME Code Section VIII Division 3 Alternative Rule for Construction of High Pressure Vessel.*
- *BS 4994 – British Standard 4994:1987 - Specification for the Design and Construction of Vessels and Storage Tanks in Reinforced Plastics;*
- *BS PD 5500:2006 – Unfired Fusion Welded Pressure Vessels;*
- *BS EN 13445:2002 – Unfired Pressure Vessels;*
- *CSA B51 – Boiler, Pressure Vessel and Pressure Piping Code.*

2.1.3 Construção Usual

Atualmente, pelo fato de o formato geométrico da maioria dos vasos de pressão ser cilíndrico, o método de fabricação mais empregado para vasos metálicos é o da laminação de chapas planas com posterior soldagem por fusão da junta longitudinal. Juntas circunferenciais são utilizadas para a união das extremidades – calotas ou domos – ao cilindro e também para a união de chapas laminadas no caso de vasos longos (Figura 3). As calotas ou domos são moldados através de um processo de conformação a frio e os demais componentes – bocais, flanges, válvulas – são forjados ou fundidos e são fixados no cilindro e calotas ou domos também pelo processo de soldagem por fusão. As estruturas de sustentação – cavaletes e pés ou saias – também são fixadas pelo mesmo processo de soldagem (Matthews, 2001).

Figura 3 - Juntas soldadas: longitudinal e circunferencial

(Adaptado de Matthews, 2001)

Conforme Matthews (2001), a maioria dos códigos assume que as juntas soldadas não são tão resistentes como a liga das chapas, a não ser que sejam exaustivamente inspecionados durante a manufatura e reparados se defeitos são identificados. Essa redução de resistência é caracterizada pela eficiência da junta soldada.

As tensões residuais na região adjacente à solda são inevitáveis e complexas, mas não são consideradas perigosas quando carregamentos estáticos são aplicados (Bednar, 1986).

A seleção de materiais de construção, conforme Bednar (1986), deve ser feita de acordo com especificações de materiais aprovados pelos códigos. Há muitos fatores apoiados na experiência e resultados de laboratório que devem ser considerados na seleção mais apropriada de materiais, que consideram:

- resistência à corrosão em ambiente de trabalho agressivo;
- resistência para pressão e temperatura de projeto;
- custo;
- disponibilidade dos materiais no mercado;
- manufaturabilidade;
- qualidade de manutenção futura.

Entretanto, a escolha do material depende primariamente do ambiente de serviço, o qual classifica-se em não-corrosivo e corrosivo.

Para o ambiente não-corrosivo, considera-se taxa de corrosão desprezível ou muito baixo, e para o corrosivo considera-se aquele que requer materiais especiais que não sejam aço carbono ou aço baixa-liga.

Em adição à resistência a corrosão, também é fundamental no critério de seleção de material a temperatura e pressão de projeto.

Para vasos de pressão simples – horizontais ou verticais compostos por um corpo cilíndrico, duas calotas tipo prato, com aberturas para inspeção, dreno, placa de identificação e conexões de entrada e saída – são geralmente fabricados com três tipos de materiais:

- aço ferrítico (aço baixo carbono);
- aço austenítico (aço inoxidável);
- alumínio e suas ligas.

2.1.4 Cálculo

2.1.4.1 Carregamentos de Projeto ou Previstos

Como em todo projeto mecânico, para dimensionar os componentes, os carregamentos aplicados aos vasos de pressão e seus componentes estruturais devem ser identificados, quantificados e localizados, além de outros dados pertinentes ao projeto.

Os principais esforços ou carregamentos a considerar no projeto de um vaso pressão são:

- pressão prevista ou de projeto (interna ou externa);
- carregamento permanente;
- carregamento devido a ventania;
- carregamento devido a terremotos;
- carregamento devido a temperaturas;

- carregamento de tubulação;
- carregamento cíclico ou de impacto.

A pressão prevista ou de projeto define a mínima espessura de parede requerida pelos componentes dos vasos, e também a diferença entre as pressões interna e externa – geralmente respectivamente a pressão prevista e a atmosférica.

Carregamentos permanentes são devidos ao peso próprio do vaso e qualquer parte conectada permanentemente a ele. Então, o vaso pode apresentar um dos carregamentos como segue:

- ✓ Carregamento permanente ereto (vazio): é o peso do vaso sem algum isolamento externo, revestimento anti-chama, qualquer estrutura externa em anexo ou tubulação;
- ✓ Carregamento permanente operacional: é o peso em uso operacional, com todos os isolamentos internos e externos, revestimento anti-chama, com todas as partes internas, com o fluido armazenado, tubulações, com equipamentos estruturais requeridos para a inspeção e manutenção, e outros equipamentos de processo anexados ao equipamento principal (ex. trocadores de calor);
- ✓ Carregamento permanente para teste de oficina: considera-se o peso da casca do vaso, após o processo de soldagem, preenchido com líquido de teste;
- ✓ Carregamento devido a ventania. No caso o vento pode ser descrito como um fluxo alto de turbulência de ar atuando sobre uma superfície com uma velocidade variável. Para o cálculo de dimensionamento devido a esse

carregamento em uma superfície existem especificações como por exemplo a *ASA Specification A58.1-1955* e a norma *ANSI A58.1-1972*;

- ✓ Carregamento devido a terremotos ou forças sísmicas em um vaso que resultam de um movimento vibratório errático repentino do solo sobre o qual o vaso se apóia e que leva a uma resposta do vaso a esse movimento;
- ✓ Carregamentos de tubulação consistem no peso dos tubos ligados aos bocais nas paredes ou cascas dos vasos e também devido a expansão térmica dos tubos.

2.1.4.2 Princípios de Projeto e Análise de Tensões

Ao projetar um vaso de pressão, diferentes combinações dos carregamentos vistos anteriormente podem ocorrer, portanto a mais provável combinação de carregamentos simultâneos deve ser levada em conta para obter um projeto econômico e seguro (Bednar, 1986).

Após a identificação dos carregamentos de projeto, os mesmos são computados para obter as tensões máximas. Deve-se avaliar qualitativamente individualmente as tensões pelo tipo, uma vez que nem todos os tipos de tensões ou suas combinações requerem o mesmo fator de segurança para falhas (Bednar, 1986). Ou seja, devem ser consideradas as tensões atuantes quando em serviço juntamente com uma teoria de falha para estabelecer uma tensão limite permissível.

Caso os vasos de pressão sejam projetados conforme os Códigos (ex. *ASME Code Section VIII Division 1*), eles são projetados conforme regras, e portanto não requerem uma avaliação detalhada de todas as tensões. É reconhecido que altas

tensões de flexão localizadas são permitidas devido ao alto fator de segurança e às regras de projeto aplicados (Moss, 2004).

2.1.4.3 Análise de Tensões de Membranas

Os vasos de pressão de uso industrial geralmente possuem o formato esférico ou cilíndrico com fechamento (domo ou calota) de extremidades no formato hemisférico, elipsoidal, cônico, torisférico, ou chato (plano). Esses componentes, geralmente cascas, unidos por meio de uma soldagem ou em alguns casos unidos por meio de flanges, formam uma casca com um eixo comum de rotação.

Define-se que um vaso de pressão é uma estrutura de membrana (parede ou casca fina) – Figura 4, quando a espessura (t) de parede é bem menor que os dois raios principais (R_L = raio longitudinal ou meridional e R_t = raio tangencial ou circunferencial) de curvatura em um ponto da casca e as proporções entre a espessura e o raios de curvatura são maiores que dez, $R_L / t > 10$ e $R_t / t > 10$ (Bednar, 1986).

Figura 4 - Elementos de uma casca de revolução

(Adaptado de Bednar, 1986)

As tensões associadas são definidas como tensões de membrana, as quais são tensões médias de tração ou compressão que atuam uniformemente na parede do vaso, sendo tangenciais à superfície.

Para vasos de pressão sujeitos a uma pressão interna ou externa, as tensões resultantes atuam nas paredes da casca e o estado de tensão é tri-axial, sendo:

σ_L = Tensão Longitudinal ou Meridional

σ_C = Tensão Circunferencial ou Latitudinal

σ_R = Tensão Radial

Além dessas, as tensões de flexão e cisalhamento também podem existir.

A tensão radial, resultante da ação direta da pressão sobre a parede do vaso, causa uma tensão de compressão. Nos vasos de pressão de parede fina, essa tensão pode ser desprezada devido ao seu valor muito pequeno em relação as outras duas tensões (longitudinal e circunferencial), portanto com tal simplificação o estado de tensão para propósitos de análise passa a ser bi-axial (plano). Uma vez que os Códigos estabelecem regras para projeto, um alto fator de segurança é usado para permitir tensões desconhecidas no vaso, na qual em algumas situações pode impor uma penalidade em termos de custo no projeto.

Por fim, a análise de tensões de membranas não é completamente precisa, mas permite algumas suposições simplificadoras que permitem resultados de precisão aceitável. As duas principais suposições a serem consideradas são:

- o estado de tensão é bi-axial (plano);
- as tensões são uniformes na parede do vaso.

Para os vasos de parede fina, tais suposições na prática provaram ser confiáveis e, embora nenhum vaso preencha os critérios de membrana

verdadeiramente, a teoria pode ser usada com razoável grau de precisão (Moss, 2004).

Conforme as definições de membranas de paredes finas, as tensões presentes nos vasos de pressão podem ser representadas como segue:

- Corpo cilíndrico (Figura 5 e 6)

Figura 5 - Diagrama de corpo livre de corpo cilíndrico sob tensão longitudinal

Figura 6 - Diagrama de corpo livre de corpo cilíndrico sob tensão circunferencial

A tensão longitudinal (σ_L) é:
$$\sigma_L = \frac{pD}{4t} \quad (2.1)$$

A tensão circunferencial (σ_c) é: $\sigma_c = \frac{pD}{2t}$ (2.2)

e

$$D = (2R + t) \quad (2.3)$$

sendo que:

p = pressão interna

t = espessura de parede

R = raio interno do cilindro

D = diâmetro intermediário mediano da superfície de parede do cilindro, definição adotada pela maioria dos Códigos.

Conforme as equações 2.1 e 2.2 acima, a tensão circunferencial é o dobro da longitudinal, portanto a resistência à tensão circunferencial passa a ser o parâmetro de controle (Matthews, 2001).

- Fechamento das extremidades – domos ou calotas (Figura 7)

Figura 7 - Representação genérica de uma calota sob tensão circunferencial e longitudinal

(Adaptado de Matthews, 2001)

Os fechamentos são projetados conforme a “teoria das cascas finas de revolução”, na qual a casca é formada pela rotação de um meridiano, uma curva contida no plano meridional r - z , conforme a Figura 7, em torno do eixo z , resultando em uma casca de espessura t simetricamente distribuída. Ao se carregar a casca com uma pressão p , o resultado é semelhante ao de um corpo cilíndrico de parede fina, em que as tensões radiais também são desconsideradas para efeito de simplificação (Matthews, 2001). Resulta que as tensões de membrana são (Figura 8):

$$\sigma_\phi = \sigma_L = \text{Tensão Longitudinal ou Meridional}$$

$$\sigma_\theta = \sigma_C = \text{Tensão Circunferencial ou Latitudinal}$$

Figura 8 - Situação de equilíbrio de um elemento de uma casca de revolução

(Adaptado de Matthews, 2001)

As duas tensões acima são deduzidas a partir da suposição de situação de equilíbrio desde que os carregamentos sejam axi-simétricos. Considere um elemento localizado no ponto A no plano r-z como indicado na Figura 7, e definidos $\theta, d\theta$ e $d\phi$ (Figura 8). A superfície normal intercepta o eixo z no ponto B e o segmento AB é definido como r_θ . O centro de curvatura no ponto C da normal AC, e r_ϕ sendo o raio instantâneo da curvatura do meridiano.

As componentes de pressão e tensões resultantes sobre a normal no sentido externo (para fora) são:

$$\text{pressão: } pdS = p(rd\theta)r_\phi d\phi \quad (2.4)$$

$$\text{tensão longitudinal: } -2\sigma_\phi (trd\theta) \sin(d\phi/2) \quad (2.5)$$

$$\text{tensão circunferencial: } -2\sigma_\theta (tr_\phi d\phi) \sin(d\theta/2) \sin \phi \quad (2.6)$$

Tomando-se os limites e substituindo $r = r_\theta \sin \phi$, então o equilíbrio do elemento requer que:

$$\sigma_\theta / r_\theta + \sigma_\phi / r_\phi = p/t \quad (\text{equação de membrana}) \quad (2.7)$$

e

$$pr^2 p = 2prt\sigma_\phi \sin \phi \quad (\text{equação para o equilíbrio da área do fechamento acima do anel circunferencial}) \quad (2.8)$$

Solucionando as duas equações obtêm-se as componentes de tensões em função de r_θ e r_ϕ , funções da geometria meridional em termos forma e localização em relação ao eixo de rotação, como segue:

$$\sigma_{\phi} = (p/2t)r_{\theta} \quad (2.9)$$

e

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\phi}(2 - r_{\theta}/r_{\phi}) \quad (2.10)$$

As equações 2.9 e 2.10 podem ser aplicadas em alguns casos particulares, tais como:

✓ Cilindro

Para $r_{\theta} = D/2$ e r_{ϕ} tendendo a infinito, tem-se que $\sigma_{\theta} = 2\sigma_{\phi} = pD/2t$ (equações de tensão do corpo cilíndrico). (2.11)

✓ Calota esférica ou hemisférica

Para $r_{\theta} = r_{\phi} = D/2$, tem-se que $\sigma_{\theta} = \sigma_{\phi} = pD/4t$ (2.12)

Observa-se que pelo valor de tensão ser menor que nos demais casos, a esfera é o formato ideal, na qual a pressão é dividida igualmente nas duas metades. Entretanto, torna-se inviável devido a sua manufaturabilidade, a não ser que deva ser utilizado para pressões muito altas.

✓ Calota elíptica

Também conhecido como calota elíptica 2:1 (proporção entre o eixo maior e o menor da elipse). Esse formato é considerado o mais econômico em termos de custo pelo fato de a altura da calota ser um quarto do diâmetro, sendo o mais utilizado em projetos de vasos, principalmente para pressões internas acima de 150 psi (Bednar, 1986).

Um meridiano elíptico de semi-eixo maior a e semi-eixo menor b e excentricidade $e = 1 - (b/a)^2$ é rotacionado em torno do eixo menor para formar a calota do cilindro de diâmetro $D = 2a$. A posição de um elemento na elipse pode ser dada em função do raio r conforme se observa na Figura 9.

Figura 9 - Calota elíptica 2:1

Por conveniência costuma se definir uma variável independente $u = \left[1 - e(r/a)^2\right]^{1/2}$ na qual $u = f(r)$ e $b/a \leq u \leq 1$.

Portanto obtêm-se as tensões no raio r :

$$\sigma_\phi = (pa^2/2bt)u \quad (2.13)$$

e

$$\sigma_\theta = \sigma_\phi (2 - 1/u^2) \quad (2.14)$$

sendo que $u = f(r)$

2.2 Compósitos

2.2.1 Introdução

Para satisfazer suas necessidades em geral, o homem desenvolveu facilidades e recursos para o seu conforto, mas isso não seria possível sem a grande influência exercida pelos materiais que os constituem. Tanto é que os períodos da civilização foram dominados e nomeados conforme os materiais disponíveis ou desenvolvidos à época. Acentuadamente nos últimos trinta anos, materiais compósitos, polímeros plásticos e cerâmicos surgiram como materiais emergentes dominantes (Barbero, 1999). Dentre esses, os compósitos têm tido uma posição de destaque em termos de crescimento de aplicações em diversas áreas, tais como: aeroespacial, aeronáutica, marítima, automotiva, energia, infra-estrutura, biomédica, materiais esportivos e outros. As razões que levam o crescente uso dos compósitos residem no fato de apresentarem adaptabilidade para uma função desejável da estrutura, ou seja, são materiais que podem ter seu desempenho mecânico projetado – alta-rigidez específica, alta-resistência específica, vida longa à fadiga, baixa-densidade.

Um material compósito de uma forma genérica pode ser definido como uma combinação de dois ou mais materiais que resultam em uma combinação única de propriedades. Entre esses materiais podem ser incluídos ligas de metais, plásticos copolímeros, minerais e madeira (Mazumdar, 2002). Entretanto, conforme Daniel e Ishai (2006), existe um grupo, conforme as aplicações citadas, denominado de compósito estrutural que é um conjunto de materiais que consiste de duas ou mais fases em uma escala macroscópica, cujo desempenho mecânico e propriedades são

projetados para serem superiores aos materiais componentes atuando independentemente. Uma das fases denominada de reforço é geralmente descontínua, mais rígida e resistente, enquanto que a fase menos rígida e mais fraca é denominada matriz. Em algumas situações, devido a interações químicas ou efeitos de processos por tratamento químico pela aplicação de agentes aderentes, uma terceira fase distinta existente entre a matriz e o reforço é denominada como interfase (Figura 10). A finalidade da interfase é a melhoria da interface mecânica entre a matriz e o reforço. As propriedades de um compósito dependem das propriedades dos materiais componentes, suas geometrias e a distribuição das fases.

Figura 10 - Fases de um material compósito

(Adaptado de Daniel e Ishai, 2006)

Os tipos de estruturas em compósitos encontrados ao longo da história vão desde a antiguidade como a madeira, tijolos de argila reforçados com palha no antigo Egito, aos dias atuais como a resina fenólica reforçada com fibra de amianto, concreto armado, cascos de embarcações marítimas de fibra de vidro, componentes de fibras de carbono de alta resistência aplicados em componentes de aeronaves,

materiais esportivos etc. Dessa extensa família de materiais, este trabalho em questão destaca os polímeros reforçados por fibras longas contínuas. Para esse tipo de compósito o sustentáculo da estrutura são os reforços de fibras contínuas que definem a rigidez e a resistência ao longo da direção das fibras, enquanto que a matriz (polímero) provê o invólucro de proteção às fibras do ambiente e abrasão mecânica, absorve parte dos carregamentos (particularmente tensões transversais e de cisalhamento interlaminar), mantém as fibras unidas (transfere os carregamentos entre as fibras e entre o componente e os vínculos) e daí a forma. E a interfase, apesar de pequena em dimensões, pode exercer um papel importante no controle do mecanismo de falhas, propagação de falhas, tenacidade à fratura e o comportamento geral de tensão-deformação para a falha do material (Daniel e Ishai, 2006).

2.2.2 Vantagens e Limitações

Ao falar sobre as vantagens dos compósitos, deve-se comparar aos materiais monolíticos (convencionais), e como já descrito no sub-capítulo anterior, poder-se-ia resumir em termos de alta resistência e rigidez específica, e características anisotrópicas e heterogêneas do material. Por outro lado, os compósitos possuem limitações quando comparados aos materiais monolíticos convencionais, tais como: resistência a corrosão, resistência ao desgaste, aparência, comportamento dependente da temperatura, estabilidade ambiental, isolamento térmico, condutividade e isolamento acústico; mas que por adições na matriz e no reforço podem melhorar tais limitações (Daniel e Ishai, 2006).

Pode-se comparar ambos tipos de materiais, monolíticos e compósitos, conforme alguns aspectos, como segue:

- **Micromecânica:** quando vistas pelo aspecto da dimensão das fibras, os compósitos possuem a vantagem da alta resistência e alta rigidez das fibras, e baixa tenacidade à fratura das fibras, mas que podem ser melhoradas pela ductilidade da matriz e dissipação de energia na interface matriz/fibra. As concentrações de tensões locais em torno das fibras reduzem a resistência à tração transversal consideravelmente. Os materiais monolíticos são mais sensíveis à suas microestruturas e irregularidades locais que influem no comportamento dúctil ou frágil do material. Sua homogeneidade o torna mais susceptível ao crescimento de defeitos sob ação de carregamentos cíclicos de longa duração.
- **Macromecânica:** neste aspecto, o material é tratado como quase-homogêneo, ou seja, sua anisotropia pode ser usada como uma vantagem. O comportamento do material pode ser controlado e previsto a partir das propriedades dos materiais constituintes. Entretanto, a análise anisotrópica é mais complexa e depende de recursos computacionais ou ensaios experimentais. Por outro lado, a análise dos materiais monolíticos é muito mais simples devido a sua isotropia e homogeneidade.
- **Caracterização mecânica:** a análise de compósitos estruturais requer dados das características dos materiais. Essas propriedades podem ser previstas com base nas propriedades e arranjos dos materiais constituintes. Porém, verificações experimentais ou caracterizações independentes necessitam de um programa de testes amplo para a determinação de um grande número de

parâmetros básicos do material. Para os materiais convencionais isotrópicos, essa caracterização é mais simples, duas constantes elásticas e dois parâmetros de resistência são suficientes.

- Projeto estrutural, análise e otimização: os compósitos possuem a característica única de permitir que se projete o material a partir de sua estrutura e fabricação em um processo unificado e simultâneo. Entretanto, o processo todo requer uma base de dados de materiais confiável, métodos de análise estrutural padronizados, técnicas de modelamento e simulação e modelos para o processamento de materiais. Devido às inúmeras possibilidades de combinações, a análise torna-se mais complexa. Para os materiais convencionais, a otimização é limitada geralmente a um ou dois parâmetros geométricos – poucos graus de liberdade disponíveis.
- Tecnologia de manufatura: componentes estruturais de compósitos são fabricados em ferramentais de relativa simplicidade, além de haver diversas técnicas para as mais diversas aplicações. No entanto, a fabricação de compósitos é ainda dependente de habilidades manuais da mão-de-obra com limitada automação e padronização, a qual requer procedimentos de controle de qualidade mais rigorosos tornando-os mais onerosos. Para os materiais convencionais, a fabricação dos materiais e dos componentes são processos distintos, sendo que a fabricação do componente requer ferramentais complexos e posterior etapa de montagem com múltiplos elementos.
- Condição de manutenção, operação e durabilidade: compósitos podem operar em ambientes agressivos por um longo período, por possuírem boa resistência química e serem de fácil manutenção e reparo. Entretanto,

compósitos com matriz de polímeros tipo termofixos são sensíveis a ambientes higrotérmicos, para o qual requer recobrimentos de proteção a esse tipo de ataque. As técnicas de detecção a problemas, muitas vezes, são sofisticadas, técnicas não-destrutivas. Os materiais convencionais também são sensíveis a ambientes corrosivos, entretanto apesar da detecção desses problemas ser mais fácil, um reparo duradouro desses materiais não é considerado simples.

- Efetividade do custo: os compósitos possibilitam redução na aquisição e custo do ciclo de vida. Isso acontece através da redução da massa, custos menores de ferramental, número reduzido de componentes, menor número de operações de montagem e manutenção reduzida. Essas vantagens são diluídas quando considerados os altos custos da resina polimérica, fibras, ou fibras pré-impregnadas com resina, e materiais auxiliares empregados na fabricação e montagem do compósito estrutural. Além de que como mencionado anteriormente, os processos de manufatura são caros devido à dependência do fator manual, operador com habilidades, o qual requer um intenso e minucioso controle de qualidade e inspeção. Para os materiais convencionais, o baixo custo das matérias-primas se contrasta com o alto custo do ferramental, usinagem e montagem.

2.2.3 Materiais e Processos

Segundo Daniel e Ishai (2006), definições físicas e geométricas podem ser dadas aos materiais conforme:

-
- Tipo de material: condição de dependência conforme o número de constituintes ou fases, um material é denominado monolítico (única fase), bifásico (duas fases), trifásico (três fases) e multifásico (mais de quatro fases). As diferentes fases de um compósito estrutural possuem propriedades físicas e mecânicas diferentes e suas dimensões bem maiores do que dimensões moleculares e granulares.
 - Homogeneidade: um material é considerado homogêneo se suas propriedades são as mesmas em qualquer ponto. Conceito que é associado com a escala ou volume característico e definição de propriedades envolvidas, ou seja, o material pode ser mais homogêneo ou menos homogêneo.
 - Heterogeneidade: um material é considerado heterogêneo se suas propriedades variam de ponto a ponto ou dependem da posição. Também associado com a escala ou volume característico e definição de propriedades envolvidas.
 - Isotropia: um material é considerado isotrópico quando suas propriedades são as mesmas em todas as direções ou não dependem de orientação ou eixos de referências. Muitas propriedades de materiais tais como rigidez, resistência, expansão térmica, condutividade térmica e permeabilidade são associadas com uma direção ou eixo.
 - Anisotropia / Ortotropia: um material é considerado anisotrópico quando suas propriedades em um ponto qualquer variam com a direção e dependem da orientação dos eixos de referência. Caso as propriedades de um material ao longo de qualquer direção sejam as mesmas como ao longo de uma direção simétrica em relação a um plano, então este plano é definido como um plano

de simetria do material. Um material pode possuir nenhum, um, dois ou mais planos de simetria de material em um ponto. Um material sem um plano de simetria é denominado como anisotrópico geral, por outro lado, os isotrópicos possuem uma infinita quantidade de planos de simetria. E um caso de especial relevância para os materiais compósitos são os materiais ortotrópicos (Figura 11), que possuem simultaneamente três planos ortogonais, sendo que as intersecções desses três planos definem três eixos mutuamente ortogonais e são denominados eixos principais de simetria do material ou simplesmente eixos principais do material.

Figura 11 - Material ortotrópico com três planos de simetria

(Fonte: Barbero, 1999)

A partir da definição inicial dada acima aos compósitos estruturais ou materiais compósitos, os principais componentes desses materiais são a matriz e as fibras. Em particular, os compósitos de matriz polimérica (do idioma inglês: *Polymer Matrix Composites* – PMC) e fibras contínuas, que são da classe de plásticos reforçados com fibras (do idioma inglês: *Fiber-Reinforced Plastics* – FRP). Na Figura 12 é apresentada de uma forma genérica os diversos tipos de materiais

compósitos. As fibras fornecem a maior parte da rigidez e resistência, e a matriz mantém as fibras alinhadas e unidas e distribuídas uniformemente e se encarrega da transferência de carregamentos entre as fibras e da transferência de carregamentos externos entre o compósito e os vínculos.

Figura 12 - Tipos de materiais compósitos

(Adaptado de Daniel e Ishai, 2006)

2.2.3.1 Fibras

Fibras, conceitualmente são formadas por um conjunto de filamentos contínuos e longos, no qual cada filamento tem um diâmetro entre cinco e quinze micrometros (Gay, Hoa e Tsai, 2003), ao passo que uma fibra, formada por

filamentos, possui diâmetro de 0,01 a 0,04 milímetros e um comprimento no mínimo cem vezes o diâmetro. A primeira forma ou conjunto de filamentos unidos através da interfase, em quantidade de 204 filamentos, apresenta-se no formato de um maço ou cordão (do idioma inglês: *strand* ou *tow*) e são enrolados em uma bobina. Esses maços ou cordões também são encontrados na forma torcida denominados *yarn* (vocabulo técnico do idioma inglês). Uma outra forma de distribuição é em bobina de cordões *strand*, sessenta cordões distribuídos paralelamente, com a finalidade de fornecer características plenas de resistência unidirecional principalmente para o enrolamento filamental, seria o formato *roving* (Schwartz, 2002).

As fibras, devido às suas características tais como leveza, rigidez, resistência, estabilidade térmica, e da possibilidade de fornecer condutividade ou isolamento elétrico dependendo do tipo da fibra, suportam de 70% a 90% dos carregamentos, são aplicadas nos compósitos (Mazumdar, 2002). Se comparados à sua forma bruta, o material vidro, as fibras são muito mais resistentes. Isso se deve a orientação preferencial de suas moléculas ao longo da direção da fibra e também ao número reduzido de defeitos presentes nas mesmas (Barbero, 1999). São usadas como reforços contínuos em compósitos unidirecionais pelo alinhamento de uma grande quantidade de filamentos em uma placa fina ou casca denominada como lâmina, camada ou espessura. Uma lâmina unidirecional possui máxima rigidez e resistência ao longo da direção das fibras e propriedades mínimas na direção perpendicular a elas.

Os tipos de fibras mais comuns em aplicações de compósitos são de vidro, carbono e orgânico (Kevlar), enquanto que para aplicações especiais são utilizados

Boron, SiC e Alumina. A seleção de qualquer uma dessas fibras depende das propriedades mecânicas e ambientais desejadas e o custo delas (Barbero, 1999). Na Tabela 1 pode-se visualizar comparativamente valores de algumas propriedades mais comuns para alguns dos tipos de fibras mais comuns à disposição no mercado.

Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas de fibras

(Adaptado de Daniel e Ishai, 2006 e Barbero, 1999)

Fibra	Diâmetro (μm)	Densidade (g/cm^3)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (GPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Coefficiente de Poisson
Vidro						
Tipo E aplicações comuns	8 - 14	2,54	73	3,45	4,4	0,22
Tipo S alto desempenho	10	2,49	86	4,5	5,3	0,22
Carbono						
T300 alta rigidez	6,5	1,76	230	3,1	1,5	0,2
AS2 alta rigidez	-	1,8	227	2,756	1,3	-
AS4 alta rigidez	7	1,81	235	3,7	1,6	-
IM6 módulo intermediário	4	1,8	275,6	4,5	1,73	-
HMS4 módulo alto	-	1,8	317	2,343	0,8	-
UHM módulo ultra-alto	-	1,85	441	3,445	0,8	-
M50 módulo ultra-alto	-	1,91	490	2,45	0,5	-
Aramida						
Kevlar 49	12	1,45	131	3,8	2,8	0,35
Kevlar 149	12	1,45	186	3,4	1,9	-
Boro	140	2,5	395	3,45	0,79	0,2
Carboneto de Silício						
SCS-6	-	3	427	2,4 - 4	0,6	0,2
Alumina						
Nextel 610	-	3,75	370	1,9	-	-
Nextel 720	-	3,4	260	2,1	-	-

Outras fibras:

- Fibra de boro: possuem alta rigidez, alta resistência e baixa densidade, e são muito utilizadas em aplicações aeroespaciais e materiais esportivos. Essas fibras são produzidas por deposição química de vapor em fio de tungstênio. Entretanto devido ao seu baixo volume de produção, estão entre as mais caras;
- Fibra de SiC (carboneto de silício): são fabricadas como as fibras de boro, mas utilizando um substrato de carbono. Apresentam alta rigidez e alta resistência, e uma maior capacidade para temperaturas altas. Também devido ao volume baixo de produção, o seu custo é alto;
- Fibra de alumina: fibra cerâmica de alto volume, baixo custo, inicialmente foi utilizado para reforçar pistões de motores a diesel. Esse tipo de fibra mantém a resistência dos compósitos de matrizes de metal a temperaturas altas, na qual a degradação do metal geralmente ocorre.

Importante ressaltar que para existir uma compatibilidade entre a matriz e a fibra, a terceira fase mencionada anteriormente como “interfase” reveste a fibra, por meio de um tratamento superficial, e fornece uma proteção para danos durante o processamento da fibra no equipamento e também como proteção atuando como lubrificante e agente anti-estático e principalmente para manter as fibras como uma unidade e a adesão com a matriz (Barbero, 1999).

As fibras utilizadas em reforços de matrizes poliméricas podem estar no formato contínuo ou descontínuo. No formato descontínuo, as fibras são curtas ou picadas (redução de custo) e podem estar orientadas aleatoriamente ou direcionadas. No formato contínuo, as fibras são formadas por fios longos contínuos

que geralmente alcançam valores máximos em propriedades tais como resistência e rigidez devido à sua anisotropia controlada e menor quantidade e tamanho dos defeitos de superfície. Em compósitos reforçados por fibras, há o interesse de que a maior parte do carregamento é absorvida pelas fibras orientadas ao longo da direção de carregamento (Barbero, 1999).

2.2.3.2 Matrizes

Os materiais das matrizes podem ser: polímeros, metais e cerâmicos. As matrizes poliméricas são as mais comuns, pois adicionam uma importante vantagem aos compósitos, que é a facilidade de fabricação de peças complexas com baixo custo de ferramental e investimento. Plásticos não-reforçados apresentam redução de custos em ferramental, mas sofrem com o problema de fluência do material, ao passo que, plásticos reforçados com fibras eliminam virtualmente o problema de fluência, além de abrir uma outra dimensão para o projeto estrutural e do material através das ilimitadas variações das propriedades mecânicas sob o controle do projetista.

A seleção de materiais para as matrizes deve levar em conta as propriedades mecânicas, resistência a corrosão e flamabilidade, e também os métodos de processamento, ou seja, essas escolhas devem ser analisadas no início do projeto conforme o processo de manufatura a ser utilizado (Barbero, 1999).

As matrizes dos compósitos de matrizes poliméricas podem ser resinas de polímeros da família dos termofixos ou termoplásticos.

Uma matriz de resina de polímero termofixo é obtida por meio de uma transformação química irreversível de polímero em uma matriz polimérica amorfa. O polímero é denominado sistema de resina durante o processamento e matriz após o polímero ter sofrido o processo de cura (solidificação). As resinas termofixas possuem baixa viscosidade, que favorece uma excelente impregnação da fibra de reforço e velocidades altas de processamento, além de serem os mais comuns devido a facilidade de processamento e seu baixo custo. As resinas mais comuns dessa família são os poliésteres, epóxis e fenólicas.

As resinas de poliéster possuem baixa viscosidade, são líquidos claros, podem ser formulados para terem resistência a raios ultra-violeta, e podem ser utilizados em várias aplicações de uso externo. Pela adição de retardantes a chama, apresentam uma boa resistência a flamabilidade. São também consideradas resinas de baixo-custo.

As resinas de epóxi são as mais utilizadas devido a sua versatilidade em termos de propriedades mecânicas, alta resistência a corrosão, baixa contração, são menos afetados pela água e calor do que outros polímeros, além de o seu processo de cura ser atingido a qualquer temperatura entre 5°C e 150°C. Uma de suas grandes aplicações está na indústria aeronáutica que a utiliza como adesivo para estruturas de colméia, como resinas de laminação para aplicações balísticas, estruturas de enrolamento filamental, e ferramental.

As resinas fenólicas possuem baixa flamabilidade e baixa emissão de fumaça se comparada com outras resinas de baixo custo, além de apresentarem boa estabilidade dimensional sob flutuações de temperatura e boa propriedade adesiva. Também bastante aplicado em aeronaves, veículos de transporte coletivo, como

material de construção de interiores onde a flamabilidade deve ser baixa, e em componentes de enrolamento filamentar.

Matrizes de resinas de polímeros termoplásticos por sua vez não passam por uma transformação química durante o processamento, sofrem um amolecimento do estado sólido, e retornam ao estado sólido após o processamento esteja finalizado. Possui alta viscosidade nas temperaturas de processamento, que o torna de difícil manuseio durante seu processamento. As altas tensões de cisalhamento necessárias para que os termoplásticos fluam causam danos às fibras que resultam em uma redução no comprimento da fibra da ordem de dez a cem vezes. Portanto, para um novo termoplástico, um dos objetivos é de se reduzir o efeito da viscosidade no fluido. Esse é um dos motivos que adicionam um custo ao produto final. Entre os termoplásticos usados como matrizes podem ser citados: PEEK, PPS, PEAD, PAI (Barbero, 1999).

2.2.3.3 Processos de Manufatura

A etapa de manufatura pode ser considerada como uma das mais importantes para se produzir um compósito, e é regida principalmente pelo material da matriz a ser empregado. Em termos ideais, o processo de manufatura deve ser selecionado simultaneamente com a seleção de materiais e o projeto estrutural em um ambiente integrado – unificado e interativo – do processo de desenvolvimento (Daniel e Ishai, 2006). Inicialmente as técnicas de fabricação foram voltadas para aplicações militares e posteriormente para aplicações civis. Em termos de custo, o alto custo dos materiais o torna uma barreira para uma aplicação mais extensiva.

A maior parte dos custos é atribuída a uma falta de métodos de fabricação automatizados e à necessidade de inspeções pós-fabricação para assegurar a qualidade do material, ou seja, as propriedades do produto final acabado estão intimamente relacionadas ao métodos de manufatura. Os produtos acabados devem satisfazer requisitos gerais, como segue:

- livre de defeitos (vazios, fissuras, ondulamento de fibras);
- propriedades uniformes;
- cura completa (expectativa por propriedades tais como rigidez, resistência, durabilidade na fadiga).

Requisitos de manufatura também devem ser satisfeitos tais como:

- controle da orientação e posicionamento das fibras;
- espessura da camada;
- proporção do volume de fibras;
- tensões residuais;
- dimensões finais;
- a temperatura não deve exceder o valor prescrito;
- a distribuição de temperatura deve ser uniforme ao longo da peça;
- a cura deve ser completa e uniforme em um intervalo de tempo mais curto possível.

De acordo com Barbero (1999), um processamento típico de compósitos de matrizes poliméricas envolve as seguintes etapas:

1. disposição das fibras ao longo das direções desejadas;
2. impregnação das fibras com a resina;

3. consolidação das fibras impregnadas com a remoção de excessos de resina, ar e voláteis;
4. cura ou solidificação do polímero;
5. extração do molde;
6. operações de acabamento.

Atualmente inúmeros processos de fabricação estão em uso, entre eles pode-se citar: moldagem a autoclave, moldes de compressão à vácuo, *filament winding*, posicionamento de fibras, moldes de injeção, pultrusão, e moldagem por transferência de resina (Daniel e Ishai, 2006). São descritos dentre esses métodos, três que são mais empregados, como segue:

- Moldagem a autoclave (Figura 13): usado para processamento de compósitos de alto desempenho em aplicações militares, aeroespaciais, de transportes, marítimas e de infra-estrutura. Este processo apresenta poucas restrições quanto ao tamanho e formato da peça e resulta em produtos com boa tolerância dimensional. Por ser um processo de baixo volume de produção e de intenso uso de um operador, apresentam alto custo. As matrizes empregadas são tanto termofixas como termoplásticas, e as fibras de reforço são de vidro, carbono e aramida. A forma que este processo utiliza os materiais é denominado como *prepreg*. O formato *prepreg* consiste na combinação matriz e reforço e está pronto para o processamento dos compósitos. As fibras estão dispostas em uma fita na qual uma camada de fibras paralelas ou entrelaçadas como num tecido estão dispostas sobre ela, estando pré-impregnadas com a resina da matriz parcialmente curadas ou endurecidas. As fitas de *prepreg* são cortadas conforme o tamanho e

orientadas segundo a direção desejada, e empilhadas para formação de camadas. O conjunto de materiais é selado em uma câmara a vácuo, na qual a cura é efetuada pela aplicação de um ciclo prescrito de temperatura, pressão a vácuo e tempo dentro de uma autoclave.

Figura 13 - Conjunto de deposição por moldagem a autoclave

(Adaptado de Daniel e Ishai, 2006)

- Moldagem por transferência de resina (do idioma inglês: *Resin Transfer Moulding* – RTM) – Figura 14: usado para altos volumes de produção de peças complexas ou espessas em aplicações militares, aeroespaciais, de transportes, marítimas e de infra-estrutura. Os reforços empregados são fibras de vidro, carbono, Kevlar e fibras dispostas em forma de tecidos, e as resinas para as matrizes são as termofixas como epóxi, poliéster insaturado e vinilestér. O processo consiste na seleção do material, projeto do molde, preenchimento do molde, cura e controle. O reforço de fibra é disposto seco na cavidade do molde, e então o molde é fechado. A resina é injetada através de aberturas, impregnando as fibras e preenchendo as cavidades do

molde. Quando o molde está preenchido, o fornecimento de resina é interrompido e as aberturas de entrada e saída são seladas e uma quantidade de calor prescrita é aplicada para a cura da resina. Após a cura completa, o molde é aberto e o compósito é retirado para controle.

Figura 14 - Processo de moldagem por transferência de resina

(Adaptado de Daniel e Ishai, 2006)

- Enrolamento filamentar (do idioma inglês: *Filament Winding*), Figura 15: este processo baseia-se no enrolamento sob tensão de fibras contínuas pré-impregnadas de resina ou fibras molhadas com resina durante o enrolamento em torno de um mandril em rotação até que a superfície do mandril esteja

coberta e a espessura requerida seja atingida. Pelo fato de ser rotativo o processo é indicado para peças como tubos, vasos de pressão, reservatórios de produtos químicos, peças esféricas e cônicas. A compactação é alcançada por meio da tensão de tração nas fibras. Por ser um processo de razoável automação, é considerado um processo de baixo custo. A rotação programada do mandril e o movimento horizontal do olhal de deposição angular das fibras produzem um padrão helicoidal de disposição das fibras sobre o mandril. Há dois tipos básicos de equipamentos de enrolamento: helicoidal e polar. O helicoidal é semelhante a um torno, no qual o mandril é rotacionado continuamente enquanto o olhal de deposição angular realiza um movimento horizontal de ida e volta, e pode ser ajustado para produzir orientações de fibras entre 5° e 90° , sendo este último denominado de enrolamento circunferencial. Diversos enrolamentos de ida e volta são necessários para ter uma camada completa cobrindo o mandril. Este método é tipicamente aplicado para confecção de vasos de pressão cilíndricos. O enrolamento polar por sua vez é recomendado para a produção de vasos esféricos ou cilíndricos com relação entre comprimento e diâmetro menor do que dois. Esse método é mais simples, portanto menos oneroso, mais rápido que o helicoidal, e consiste em um braço que rotaciona em torno de um mandril estacionário em uma trajetória plana. Conforme Tita (2004), um detalhe importante que deve ser levado em conta é a confecção do mandril, que poderá ser de difícil remoção se formas complexas são desejadas. Nesse caso, o projeto deve considerar que possam ser facilmente desmontados ou removidos, ou então, construídos em gesso ou sílica. Para casos em que não

há controle das dimensões internas das peças, utiliza-se sílica para que possam ser dissolvidas por solventes, ou então em cera para que possam derreter quando aquecidas. Em alguns casos, mandris metálicos desmontáveis são utilizados para garantir a precisão das dimensões internas durante a ação da pressão no processo de cura da resina. Em algumas situações é interessante que os mandris sejam mantidos como parte integrante do compósito estrutural no qual estabelece uma camada impermeabilizante ou superfície de barreira na superfície interna do compósito evitando o vazamento de gás comprimido ou líquidos contidos no vaso de pressão (Sanjay, 2002).

Figura 15 - Processo de moldagem filament winding

(Adaptado de Barbero, 1999)

2.2.4 Mecânica de Compósitos

Segundo Daniel e Ishai (2006), os materiais compósitos podem ser vistos e analisados em diferentes níveis e a diferentes escalas, dependendo das características particulares e comportamento em consideração. Conforme Figura 16, um diagrama esquemático de vários níveis de consideração e os tipos correspondentes de análise são apresentados.

No nível de Micromecânica – lâmina, estudam-se detalhes da interação dos materiais constituintes do compósito (fibra e matriz) em nível microscópico, ou seja, trata do estado de deformação e tensão nos constituintes e falhas locais tais como falha da fibra (tensão de flambagem, divisão), falha da matriz (tração, compressão, cisalhamento), e falha da interface/interfase (descolamento).

No nível de Macromecânica, a lâmina é tratada como um material quase homogêneo e anisotrópico em que nas propriedades de rigidez e resistência são considerados por valores médios, assim como os critérios de falhas também podem ser expressos em termos de valores médios de tensões e resistência geral da lâmina sem que haja uma referência a um mecanismo de falha em particular. No laminado, é aplicado na forma da teoria da laminação que trata do comportamento geral como uma função das propriedades da lâmina e seqüência de empilhamento de lâminas.

Por fim, no nível estrutural ou do componente em si, análise numéricas tipo MEF em conjunto com a teoria dos laminados podem prever o comportamento geral da estrutura assim como o estado de tensão de cada lâmina.

Figura 16 - Materiais compósitos em diferentes níveis de consideração e análise

(Adaptado de Daniel e Ishai, 2006)

Após a definição dos diferentes níveis de análise, torna-se importante a definição de lâmina e laminado, como segue:

Lâmina (do idioma inglês: *ply* ou *layer*): é uma camada plana ou curva de fibras unidirecionais em uma matriz, referido também como lâmina unidirecional (do idioma inglês: *unidirectional* – UD). Conforme a Figura 17, a lâmina é um material ortotrópico com os eixos das direções principais na direção das fibras (1 – longitudinal), normal às fibras no plano do laminado (2 – transversal no plano) e normal ao plano da lâmina (3).

Figura 17 - Lâmina com os eixos de direções principais

(Adaptado de Daniel e Ishai, 2006)

Laminado: é constituído de duas ou mais lâminas empilhadas juntas em diversas orientações (Figura 18). As lâminas podem ser de várias espessuras e materiais diferentes. Uma vez que a orientação dos eixos principais são diferentes para cada lâmina, torna-se conveniente analisar os laminados conforme um sistema fixo de coordenadas comum (x , y , z) – global. A orientação de uma lâmina é definida por meio do ângulo entre o eixo de referência $\underline{x}$ e o eixo principal $\underline{1}$ do material da lâmina, medido no sentido anti-horário no plano x - y .

Figura 18 - Laminado multidirecional em sistema de referência global

(Fonte: Daniel e Ishai, 2006)

Os laminados seguem uma notação, Codificação Padrão de Laminados – SLC (do idioma inglês: *Standard Laminate Code*), conforme a sequência de deposição orientada de fibras nas lâminas:

Seis lâminas unidirecionais:	$[0/0/0/0/0/0] = [0_6]$
Lâminas cruzadas simétricas:	$[0/90/90/0] = [0/90]_S$
	$[0/90/0/90/90/0/90/0] = [0/90]_{2S}$
	$[0/90/0] = [0/\overline{90}]_S$
Lâminas anguladas simétricas:	$[+45/-45/-45/+45] = [\pm 45]_S$
	$[30/-30/30/-30/-30/30/-30/30] = [\pm 30]_{2S}$
Lâminas anguladas assimétricas:	$[30/-30/30/-30/30/-30/30/-30] = [\pm 30]_4$
Multidirecional:	$[0/45/-45/-45/45/0] = [0/\pm 45]_S$
	$[0/0/45/-45/0/0/0/0/-45/45/0/0] = [0_2/\pm 45/0_2]_S$
	$[0/15/-15/15/-15/0] = [0/\pm 15/\pm 15/0]_T =$
	$= [0/(\pm 15)_2/0]_T$

sendo que:

- número subscrito: múltiplo de lâminas ou grupo de lâminas;
- S = sequência de simetria;
- T = número total de lâminas;
- $\overline{}$ (barra sobrescrita) = laminado simétrico em relação a camada no plano médio.

A lâmina unidirecional é considerada o bloco básico de qualquer laminado ou compósito estrutural, sendo que as propriedades necessárias do material básico para análise e projeto são as médias das propriedades das lâminas. Portanto, as seguintes propriedades caracterizam as lâminas:

-
- E_1, E_2, E_3 = módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young, ao longo das direções principais (1, 2, 3) da lâmina;
 - G_{12}, G_{23}, G_{13} = módulo de cisalhamento nos planos 1-2, 2-3 e 1-3, respectivamente, e que são iguais a G_{21}, G_{32}, G_{31} respectivamente;
 - $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$ = coeficiente de Poisson nos planos 1-2, 2-3 e 1-3, respectivamente (o primeiro subscrito refere-se à direção de carregamento e o segundo subscrito refere-se à direção da deformação, e por sua vez, são diferentes de $\nu_{21}, \nu_{32}, \nu_{31}$);
 - F_{1t}, F_{2t}, F_{3t} = resistência a tração ao longo das direções principais da lâmina;
 - F_{1c}, F_{2c}, F_{3c} = resistência a compressão ao longo das direções principais da lâmina;
 - F_{12}, F_{23}, F_{13} = resistência a cisalhamento nos planos 1-2, 2-3 e 1-3, respectivamente;
 - $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ = coeficiente de expansão térmica ao longo direções principais da lâmina;
 - $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = coeficiente de expansão de umidade ao longo direções principais da lâmina;
 - $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ = coeficiente de condutividade térmica ao longo direções principais da lâmina;
 - proporção de volume de fibra: $V_f = \frac{\text{volume das fibras}}{\text{volume do compósito}}$ (2.15)

- proporção de peso de fibra: $W_f = \frac{\text{peso das fibras}}{\text{peso do compósito}}$ (2.16)

- proporção de volume de matriz: $V_m = \frac{\text{volume da matriz}}{\text{volume do compósito}}$ (2.17)

- proporção de peso de matriz: $W_m = \frac{\text{peso da matriz}}{\text{peso do compósito}}$ (2.18)

- proporção de volume de vazio: $V_v = 1 - V_f - V_m = \frac{\text{volume de vazios}}{\text{volume do compósito}}$ (2.19)

- volume do compósito: $V_c = V_f + V_m + V_v$ (2.20)

2.2.4.1 Micromecânica

A micromecânica é o estudo dos materiais compósitos que leva em conta a interação dos materiais constituintes em detalhe, e também permite a representação de um material heterogêneo como um material homogêneo equivalente (geralmente anisotrópico) – Figura 19. Ela é usada para a previsão de propriedades de uma lâmina baseada na análise das propriedades conhecidas (testadas) dos materiais constituintes (fibra e matriz) e da geometria da microestrutura (proporção de volume de fibra e parâmetros geométricos) . Utiliza-se o conceito de elemento de volume representativo – RVE (do idioma inglês: *Representative Volume Element*) a fim de evitar considerar todas as fibras incluídas em uma lâmina durante a derivação de equações. O RVE é a menor porção do material que contém todas as peculiaridades do material, ou seja, representa o material como um todo. As tensões e deformações não são uniformes sobre o RVE pelo fato do compósito ser

um material heterogêneo, entretanto o volume ocupado por ele pode ser substituído por um material homogêneo equivalente sem afetar o estado de tensão em torno dele, Figura 20 e 21 (Barbero, 1999; Daniel e Ishai, 2006).

Figura 19 - Processo da micromecânica

(Adaptado de Barbero, 1999)

Figura 20 - RVE típico para uma distribuição retangular (a) e hexagonal (b)

(Adaptado de Barbero, 1999)

Figura 21 - (a) RVE equivalente a um material homogêneo e (b) estrutura final com o RVE substituído pelo material equivalente

(Adaptado de Barbero, 1999)

Segundo Daniel e Ishai (2006), há uma relação funcional entre a proporção de volume de fibra com a propriedade elástica média do compósito, na qual baixas proporções de volume de fibra tendem a ter uma distribuição aleatória de fibras, ao passo que altas proporções tendem a formar um empacotamento de forma hexagonal. Essa relação funcional de rigidez, pode ser expressa na forma:

$$C^* = f(C_f, C_m, V_f, S, A) \quad (2.21)$$

sendo que:

- C^* = rigidez média do compósito;
- C_f, C_m = rigidez da fibra e matriz, respectivamente;
- V_f = proporção do volume de fibra;
- S, A = parâmetros geométricos que descrevem a forma e disposição do reforço, respectivamente.

Na Micromecânica, a combinação de dois materiais isotrópicos (fibra e matriz) é representado como um material equivalente, homogêneo e anisotrópico. A rigidez do material equivalente é representada por cinco propriedades elásticas: $E_1, E_2, G_{12}, G_{23}, \nu_{12}$, sendo que todas elas são funções da proporção de volume (Barbero, 1999).

- Módulo de elasticidade longitudinal: propriedade associada ao carregamento longitudinal na direção das fibras a que elas, por sua vez, são resistentes, rígidas e possuem deformações máximas bem baixas. Essa propriedade pode ser prevista pela fórmula da regra das misturas – ROM (do idioma inglês: Rule of Mixtures), quando a lâmina é tensionada na direção longitudinal da fibra (Figura

22), na qual a principal suposição adotada é que as deformações nas direções da fibra são uniformes e iguais na matriz e fibra, o que implica que a ligação entre matriz e fibra seja perfeita (Barbero, 1999; Daniel e Ishai, 2006).

Figura 22 - Compósito sob tensão de tração longitudinal

(Fonte: Daniel e Ishai, 2006)

Por meio da regra da misturas, o módulo de elasticidade longitudinal pode ser expresso como:

$$E_1 = E_{1f}V_f + E_mV_m \quad (2.22)$$

ou

$$E_1 = E_{1f}V_f + E_m(1 - V_f) \quad (2.23)$$

sendo que:

- ✓ E_{1f} = módulo de elasticidade da fibra ao longo da direção longitudinal principal 1;
- ✓ E_m = módulo de elasticidade da matriz.

- Módulo de elasticidade transversal: nesta propriedade, o carregamento na lâmina é normal à direção longitudinal das fibras (Figura 23), sendo que o estado de tensão na matriz que envolve as fibras é não-uniforme e é influenciado pela interação com as fibras ao redor. Entretanto, pela mecânica dos materiais, a

principal suposição a ser adotada é de que a lâmina unidirecional pode ser idealizada como uma placa consistindo de fibras de seção retangular e faixas de matriz em série, ou seja, a maioria das formulações da micromecânica (exceto formulações avançadas) não representa a real geometria das fibras.

Figura 23 - Compósito sob tensão de tração transversal

(Fonte: Daniel e Ishai, 2006)

Também deve ser assumido que a ligação entre matriz e fibra seja perfeita (Barbero, 1999; Daniel e Ishai, 2006). Através da regra da misturas, o módulo de elasticidade transversal pode ser expresso como:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_{2f}} + \frac{V_m}{E_m} \quad (\text{equação inversa ROM}) \quad (2.24)$$

ou

$$E_2 = \frac{E_{2f} E_m}{V_f E_m + V_m E_{2f}} \quad (2.25)$$

onde:

E_{2f} = módulo de elasticidade da fibra ao longo da direção longitudinal principal 2;

Conforme a equação inversa ROM (2.24), as fibras não contribuem consideravelmente na rigidez na direção transversal, a não ser que a proporção de fibras (V_f) seja bastante alta, portanto o E_2 é dito como uma propriedade dominante da matriz. Nesse caso, a equação inversa ROM (2.24) é uma equação qualitativa para avaliação de possibilidades em uma seleção de materiais, mas não para um cálculo analítico de projeto. Uma melhor previsão pode ser obtida através de uma fórmula semi-empírica conhecida como Halpin-Tsai, como segue:

$$E_2 = E_m \left[\frac{1 + \zeta \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right] \quad (2.26)$$

o

$$\eta = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + \zeta} \quad (2.27)$$

sendo que:

ζ = parâmetro obtido por ajuste de curva com os resultados de uma solução analítica. O valor $\zeta = 2$ geralmente fornece um bom ajuste para o caso de fibras circulares ou quadradas. E para fibras retangulares, uma boa estimativa é $\zeta = 2a/b$, na qual a e b são as dimensões do retângulo na direção de carregamento e perpendicular a isto, respectivamente (Barbero, 1999).

- Módulo de cisalhamento no plano: o comportamento de um compósito unidirecional sob carregamento de cisalhamento no plano é também dominado pelas propriedades da matriz e as distribuições de tensões locais. A tensão de cisalhamento no plano $\sigma_6 = \tau_{12} = \tau_{21}$ deforma o compósito (Figura 24), e

conforme a mecânica dos sólidos, a resposta de uma lâmina de compósito unidirecional sob cisalhamento paralelo às fibras pode ser idealizada como a de um modelo de série consistido de matrizes e camadas de fibras alternantes sob tensão de cisalhamento constante τ_{12} .

Figura 24 - Compósito sob carregamento de cisalhamento no plano

(Fonte: Daniel e Ishai, 2006)

Cada elemento de matriz e fibra está sujeito à mesma tensão de cisalhamento, mas com diferentes deformações γ_m e γ_{12f} . A deformação de cisalhamento média de um RVE é a média de volumes das deformações por cisalhamento individuais como segue (Barbero, 1999; Daniel e Ishai, 2006).:

$$\gamma_{12} = \gamma_{12f} V_f + \gamma_m V_m \quad \Rightarrow \quad \frac{\tau_{12}}{G_{12}} = \frac{\tau_{12}}{G_{12f}} V_f + \frac{\tau_{12}}{G_m} V_m \quad (2.28)$$

que leva a uma equação inversa ROM:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_{12f}} + \frac{V_m}{G_m} \quad (2.29)$$

ou

$$G_{12} = \frac{G_m}{\frac{V_f G_m}{G_{12f}} + V_m} \quad (2.30)$$

sendo que:

G_{12f} e G_m são o módulo de cisalhamento da fibra e matriz, respectivamente.

Se as fibras são muito mais rígidas que a matriz ($G_m \ll G_{12f}$), módulo de cisalhamento no plano pode ser aproximado para:

$$G_{12} \approx \frac{G_m}{1 - V_f} \quad (2.31)$$

A equação inversa ROM acima, fornece uma equação simples, mas não uma precisa para a previsão do módulo de cisalhamento no plano. A relação semi-empírica de Halpin-Tsai neste caso fornece:

$$G_{12} = G_m \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (2.32)$$

sendo que:

$$\eta = \frac{G_{12f} - G_m}{G_{12f} + \xi G_m} \quad (2.33)$$

Através de resultados experimentais, foi atribuído que $\xi = 1$, então a relação torna-se:

$$G_{12} = G_m \frac{(1 + V_f) G_{12f} + V_m G_m}{V_m G_{12f} + (1 + V_f) G_m} \quad (2.34)$$

- Módulo de cisalhamento interlaminar: a tensão interlaminar $\sigma_4 = \tau_{23} = \tau_{32}$

ocorre no plano (2-3) seccional das fibras (Figura 25) e o módulo de cisalhamento interlaminar pode ser obtido através da técnica empírica conhecida como parâmetro de particionamento de tensão (Barbero, 1999), então tem-se que:

$$G_{23} = G_m \frac{V_f + \eta_{23} (1 - V_f)}{\eta_{23} (1 - V_f) + V_f G_m / G_f} \quad (2.35)$$

sendo que:

$$\eta_{23} = \frac{3 - 4 \nu_m + G_m / G_f}{4 (1 - \nu_m)} \quad (2.36)$$

Figura 25 - Compósito sob tensão interlaminar no plano 2-3

(Adaptado de Barbero, 1999)

- Coeficientes de Poisson: de uma forma geral, quaisquer dos coeficientes de Poisson é definido como o quociente negativo de deformação resultante sobre a deformação aplicada:

$$\nu_{ij} = - \frac{\delta_j}{\delta_i} \quad (2.37)$$

na qual, i é a direção de aplicação do carregamento e j é a direção perpendicular em que a deformação é induzida pelo efeito de Poisson (Figura 26).

Figura 26 - RVE sujeito a deformação longitudinal uniforme

(Adaptado de Barbero, 1999)

A mecânica de materiais fornece uma equação ROM para o coeficiente de Poisson no plano como:

$$\nu_{12} = \nu_{12f} V_f + \nu_m V_m \quad (2.38)$$

Considerando que os coeficientes de Poisson da fibra e da matriz são próximos, o compósito também apresentará um valor bem semelhante. Os coeficientes de Poisson são difíceis de obter por medidas com precisão, então valores aproximados por estimativa são geralmente suficientes para projetos (Barbero, 1999).

2.2.4.2 Macromecânica

Compósitos estruturais são construídos a partir de laminados com diversas camadas (empilhamento) e várias orientações (multi-direcional) de fibras, Figura 27.

Figura 27 - Laminado com três camadas e suas direções principais

(Adaptado de Barbero, 1999)

Tais orientações são definidas a fim de fornecer rigidez e resistência adequada na direção de aplicação de carregamentos, na qual considera-se que o material compósito é muito mais resistente e rígido na direção da fibra do em qualquer outro. Portanto, o comportamento de um laminado multi-direcional é função de propriedades e seqüências de empilhamento de camadas individuais. Além de que a maior parte das aplicações de compósitos envolve o uso de placas laminadas finas ou cascas, sob a ação de momentos fletores e carregamentos de alongamento, ou seja, o bloco básico de construção de um compósito estrutural é um elemento de placa.

Antes de apresentar as relações entre as propriedades estruturais do compósito ou laminado final e as camadas ou lâminas, é importante descrever as propriedades das camadas ou lâminas individuais, ou seja, o ponto inicial pode ser considerado com o estudo de deformação de um pequeno elemento qualquer retirado do material de uma camada individual. Esse estudo, resposta tensão-deformação, para uma camada individual é equivalente a determinar as relações entre as tensões aplicadas nas faces das bordas da camada e as deformações da

camada como um todo. Não há nenhum tipo de consequência neste nível de análise quanto à deformação de uma fibra individual ou um elemento da matriz. O efeito do reforço de fibra é espalhado sobre o volume de material, e é assumido que o sistema fibra-matriz é substituído por um material homogêneo único, conceito que facilita a análise do compósito. Esse material único não possui a mesma propriedade em todas as direções (Hyer, 1998; Daniel e Ishai, 2006).

Para o desenvolvimento das relações, um sistema de coordenadas ortogonais 1-2-3 – também conhecido como sistema principal de coordenadas do material, é definido para cada lâmina, na qual o eixo 1 está alinhado com a direção da fibra, o eixo 2 está no plano da lâmina e perpendicular às fibras, e o eixo 3 está perpendicular ao plano da lâmina e às fibras. O termo “direção perpendicular às fibras” também é conhecido como “direção transversal”. Na Figura 28, um elemento de volume infinitesimal retirado de uma lâmina de material reforçado com fibras sob um estado de tensão e deformações nas seis faces é representado, como segue:

Figura 28 - Estado de tensão em um elemento de volume

- σ_i ($i = 1, 2, 3$) = tensão normal em uma face – direção alinhada com um dos eixos principais. Três tensões normais são encontradas no elemento de volume: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$

sendo que:

$$\sigma_1 = \sigma_{11}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{22}$$

$$\sigma_3 = \sigma_{33}$$

- $\sigma_{ij} = \tau_{ij}$ ($i, j = 1, 2, 3$) = tensão de cisalhamento transversal à direção i e alinhado com a direção j . Três tensões de cisalhamento são encontradas no elemento de volume:

$$\sigma_{23} = \tau_{23} = \sigma_4 = \tau_4$$

$$\sigma_{31} = \tau_{31} = \sigma_5 = \tau_5$$

$$\sigma_{12} = \tau_{12} = \sigma_6 = \tau_6$$

- $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} = \varepsilon_i$ ($i, j = 1, 2, 3$) = deformação longitudinal na direção i .

Três respostas de deformações longitudinais são encontrados na direção i no elemento de volume:

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_2$$

$$\varepsilon_{33} = \varepsilon_3$$

E três respostas de deformações de cisalhamento (alteração no ângulo reto no plano indicado) são encontrados nos planos ij no elemento de volume:

$$2\varepsilon_{23} = \gamma_{23} = \varepsilon_4 = \gamma_4$$

$$2\varepsilon_{31} = \gamma_{31} = \varepsilon_5 = \gamma_5$$

$$2\varepsilon_{12} = \gamma_{12} = \varepsilon_6 = \gamma_6$$

Através das definições:

- lei de Hooke: $\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_i}$ (2.39)

- coeficiente de Poisson: $\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}$ (2.40)

- tensão de cisalhamento: $\gamma_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{G_{ij}}$ (2.41)

e considerando o material ortotrópico (nove constantes elásticas), pode-se expressar as relações de tensão – deformação sob a forma de duas matrizes:

- Matriz de Conformidade

$$\{\varepsilon_i\} = [S_{ij}] \{\sigma_j\} \quad (i, j = 1, 2, 3 \dots, 6) \quad (2.42)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (2.43)$$

Usando-se constantes de engenharia (módulos de elasticidade e cisalhamento e coeficiente de Poisson), a matriz de conformidade também pode ser expressa como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (2.44)$$

- Matriz de Rigidez ou Matriz de Módulo ou Matriz de Elasticidade – também conhecido como a matriz inversa da matriz de conformidade

$$\{\sigma_i\} = [C_{ij}] \{\varepsilon_j\} \quad (i, j = 1, 2, 3 \dots, 6) \quad (2.45)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (2.46)$$

sendo que:

$$C_{11} = \frac{S_{22}S_{33} - S_{23}^2}{S} \quad (2.47)$$

$$C_{22} = \frac{S_{33}S_{11} - S_{13}^2}{S} \quad (2.48)$$

$$C_{33} = \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}{S} \quad (2.49)$$

$$C_{12} = \frac{S_{13}S_{23} - S_{12}S_{33}}{S} \quad (2.50)$$

$$C_{23} = \frac{S_{12}S_{13} - S_{23}S_{11}}{S} \quad (2.51)$$

$$C_{13} = \frac{S_{12}S_{23} - S_{13}S_{22}}{S} \quad (2.52)$$

$$C_{44} = \frac{1}{S_{44}} \quad (2.53)$$

$$C_{55} = \frac{1}{S_{55}} \quad (2.54)$$

$$C_{66} = \frac{1}{S_{66}} \quad (2.55)$$

$$S = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{vmatrix} \quad (2.56)$$

Usando constantes de engenharia (módulos de elasticidade e cisalhamento e coeficiente de Poisson), os elementos C_{ij} da matriz de rigidez também podem ser expressos como:

$$C_{11} = \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} \quad (2.57)$$

$$C_{22} = \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} \quad (2.58)$$

$$C_{33} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} \quad (2.59)$$

$$C_{12} = \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{13}\nu_{32}}{E_1 E_3 \Delta} \quad (2.60)$$

$$C_{23} = \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_2 \Delta} \quad (2.61)$$

$$C_{13} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_1 E_2 \Delta} = \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} \quad (2.62)$$

$$C_{44} = G_{23} \quad C_{55} = G_{13} \quad C_{66} = G_{12}$$

$$\Delta = \frac{1}{E_1 E_2 E_3} \begin{vmatrix} 1 & -\nu_{21} & -\nu_{31} \\ -\nu_{12} & 1 & -\nu_{32} \\ -\nu_{13} & -\nu_{23} & 1 \end{vmatrix} \quad (2.63)$$

Em aplicações estruturais os materiais compósitos são usados na forma de laminados finos sob carregamento no plano do laminado, ou seja, estado plano de tensão – todos os componentes de tensão fora do plano do laminado, direção 3, são nulos, assim:

$$\sigma_3 = 0$$

$$\tau_{23} = \tau_4 = 0$$

$$\tau_{13} = \tau_5 = 0$$

obtém-se a matriz reduzida de rigidez:

$$\{\sigma\}_{1,2} = [Q]_{1,2} \{\varepsilon\}_{1,2} \quad (2.64)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (2.65)$$

sendo que:

$$Q_{ij} = C_{ij} - \frac{C_{i3}C_{j3}}{C_{33}} \quad (i, j = 1, 2, 6) \quad (2.66)$$

E a relação inversa, matriz de conformidade, é reescrita sob a forma:

$$\{\varepsilon\}_{1,2} = [S]_{1,2} \{\sigma\}_{1,2} \quad (2.67)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (2.68)$$

Geralmente, os eixos principais (1 e 2) da lâmina em um estado plano de tensão não coincidem com os eixos do sistema global de coordenadas (x e y) – Figura 29, então torna-se necessário referenciar as tensões e deformações dos eixos principais (1 e 2) em relação aos eixos de carregamentos (x e y) por relações de transformação, como segue:

Figura 29 - Componentes de tensão nas direções principais e globais de coordenadas

$$\{\sigma\}_{1,2} = [T] \{\sigma\}_{x,y} \quad (2.69)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} \quad (2.70)$$

e

$$\{\varepsilon\}_{1,2} = [T] \{\varepsilon\}_{x,y} \quad (2.71)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_6 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{Bmatrix} \quad (2.72)$$

sendo $[T]$, matriz de transformação, é:

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad m = \cos \theta \quad ; \quad n = \sin \theta \quad (2.73)$$

e o ângulo θ é positivo o sentido anti-horário do eixo x p/ o eixo 1.

Na relação inversa das relações acima, têm-se:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (2.74)$$

e

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (2.75)$$

sendo $[T]^{-1}$, a inversa da matriz de transformação, é:

$$[T]^{-1} = [T(-\theta)] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

Se a lâmina é carregada ao longo dos eixos x e y, então as relações de tensão – deformação tornam-se:

$$\{\sigma\}_{x,y} = [Q] \{\varepsilon\}_{x,y} \quad (2.77)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{Bmatrix} \quad (2.78)$$

após as devidas substituições, obtém-se:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2Q_{66} \end{bmatrix} [T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{Bmatrix} \quad (2.79)$$

e

$$\begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2Q_{66} \end{bmatrix} [T] \quad (2.80)$$

onde obtêm-se as rigidez reduzidas transformadas como função das rigidez principal da lâmina :

$$Q_{xx} = m^4 Q_{11} + n^4 Q_{22} + 2m^2 n^2 Q_{12} + 4m^2 n^2 Q_{66} \quad (2.81)$$

$$Q_{yy} = n^4 Q_{11} + m^4 Q_{22} + 2m^2 n^2 Q_{12} + 4m^2 n^2 Q_{66} \quad (2.82)$$

$$Q_{xy} = m^2 n^2 Q_{11} + m^2 n^2 Q_{22} + (m^4 + n^4) Q_{12} - 4m^2 n^2 Q_{66} \quad (2.83)$$

$$Q_{xs} = m^3 n Q_{11} - mn^3 Q_{22} - mn(m^2 - n^2) Q_{12} - 2mn(m^2 - n^2) Q_{66} \quad (2.84)$$

$$Q_{ys} = mn^3 Q_{11} - m^3 n Q_{22} + mn(m^2 - n^2) Q_{12} + 2mn(m^2 - n^2) Q_{66} \quad (2.85)$$

$$Q_{ss} = m^2 n^2 Q_{11} - m^2 n^2 Q_{22} - 2m^2 n^2 Q_{12} + (m^2 - n^2)^2 Q_{66} \quad (2.86)$$

E também podem ser obtida através da inversão direta, como segue:

$$\{\varepsilon\}_{x,y} = [S] \{\sigma\}_{x,y} \quad (2.87)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xs} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{ys} \\ \frac{1}{2}S_{sx} & \frac{1}{2}S_{sy} & \frac{1}{2}S_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} \quad (2.88)$$

após as devidas substituições, obtém-se:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{Bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}S_{66} \end{bmatrix} [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \gamma_s \end{Bmatrix} \quad (2.89)$$

e

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xs} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{ys} \\ S_{sx} & S_{sy} & S_{ss} \end{bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}S_{66} \end{bmatrix} [T] \quad (2.90)$$

obtém-se a rigidez reduzida transformada como função da rigidez principal da lâmina :

$$S_{xx} = m^4 S_{11} + n^4 S_{22} + 2m^2 n^2 S_{12} + m^2 n^2 S_{66} \quad (2.91)$$

$$S_{yy} = n^4 S_{11} + m^4 S_{22} + 2m^2 n^2 S_{12} + m^2 n^2 S_{66} \quad (2.92)$$

$$S_{xy} = m^2 n^2 S_{11} + m^2 n^2 S_{22} + (m^4 + n^4) S_{12} - m^2 n^2 S_{66} \quad (2.93)$$

$$S_{xs} = 2m^3 n S_{11} - 2mn^3 S_{22} - 2mn(m^2 - n^2) S_{12} - mn(m^2 - n^2) S_{66} \quad (2.94)$$

$$S_{ys} = 2mn^3 S_{11} - 2m^3 n S_{22} + 2mn(m^2 - n^2) S_{12} + mn(m^2 - n^2) S_{66} \quad (2.95)$$

$$S_{ss} = 4m^2 n^2 S_{11} - 4m^2 n^2 S_{22} - 8m^2 n^2 S_{12} + (m^2 - n^2)^2 S_{66} \quad (2.96)$$

Uma vez definidas as relações de tensão-deformação para uma lâmina, o comportamento elástico geral de um laminado multi-direcional é função das propriedades e sequência de empilhamento das camadas individuais. Portanto as relações de tensão-deformação para um laminado podem ser apresentadas através de uma teoria conhecida como a “Teoria Clássica dos Laminados” – CLT (do idioma inglês: *Classical Lamination Theory*). Ela prevê o comportamento de laminados conforme as seguintes suposições e restrições para um laminado multi-direcional (Figura 30) de espessura h com um empilhamento de N camadas, como segue (Barbero, 1999; Daniel e Ishai, 2006):

- cada camada (lâmina) do laminado é quase-homogênea e ortotrópica;
- o laminado é fino com suas dimensões laterais muito maiores do que sua espessura e é carregado no seu plano somente, i.e., o laminado e suas camadas (exceto suas bordas) estão em um estado plano (2-D) de tensão ($\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$);
- todos os deslocamentos são infinitesimais se comparados com a espessura do laminado ($|u|, |v|, |w| \ll h$);
- os deslocamentos são contínuos ao longo do laminado;
- os deslocamentos em plano variam linearmente através da espessura do laminado, i.e., os deslocamentos u e v nas direções x e y são funções lineares de z ;
- linhas retas normais ao plano médio permanecem retas e normais à este plano após a deformação, na qual implica que as deformações transversais de cisalhamento γ_{xz} e γ_{yz} são zero;

- as relações deslocamento – deformação e tensão – deformação são lineares;
- distâncias normais ao plano médio permanecem constantes, i.e., a deformação normal transversal ε_z é zero, o que implica que o deslocamento transversal w é independente da coordenada de espessura z .

Figura 30 - Geometria de um laminado de N camadas

(Adaptado de Barbero, 1999)

A teoria em si pode ser resumida como: procede-se diretamente a partir do bloco básico de construção, a lâmina, um meio consistente de obtenção do resultado final que é o laminado estrutural. O processo é um meio efetivo e de suposições simplificadoras de precisão razoável que possibilitam a redução de uma solução complicada de um problema de elasticidade tri-dimensional para uma mecânica bi-dimensional (estado plano) solucionável de problemas de deformação de corpos (Jones, 1999). Então, há duas relações a se considerar, como segue:

1. Relações de deformação-deslocamento

Conforme Jones (1999), seja um corte transversal normal ao eixo y de um laminado antes e após a deformação, conforme a Figura 31. Sendo o plano x - y equidistante (plano médio de simetria) entre as faces superior e inferior do laminado, têm-se que o deslocamento na direção x do ponto B a partir do plano de simetria não-deformado até o plano de simetria deformado é u_o , e a linha ABCD permanece reta (normal ao plano de simetria) sob deformação do laminado, o deslocamento no ponto C é expressado como: $u_C = u_o - z_C \beta$ (2.97)

sendo β a inclinação do plano de simetria do laminado na direção x

$$\beta = \frac{\partial w_o}{\partial x} \quad (2.98)$$

Figura 31 - Geometria de deformação no plano x - z

(Adaptado de Jones, 1999)

Considerando que a linha AD, perpendicular ao plano do laminado, permaneça perpendicular após a deformação (hipótese de Kirchhoff), então o deslocamento u de qualquer ponto z através da espessura do laminado é:

$$u = u_o - z \frac{\partial w_o}{\partial x} \quad (2.99)$$

de mesma forma, o deslocamento v na direção y é:

$$v = v_o - z \frac{\partial w_o}{\partial y} \quad (2.100)$$

as deformações são reduzidas a $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ e $\gamma_{xy} = \gamma_s$ ($\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$).

Então, para pequenas deformações (elasticidade linear), as deformações são expressas em função dos deslocamentos:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.101)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.102)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_s = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.103)$$

e substituindo-os nas equações derivadas dos deslocamentos 2.99 e 2.100, tem-se que:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_o}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_o}{\partial x^2} \quad (2.104)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v_o}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_o}{\partial y^2} \quad (2.105)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_s = \frac{\partial u_o}{\partial y} + \frac{\partial v_o}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_o}{\partial x \partial y} \quad (2.106)$$

ou na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_s^\circ \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (2.107)$$

na qual as deformações do plano médio são:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_s^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_o}{\partial x} \\ \frac{\partial v_o}{\partial y} \\ \frac{\partial u_o}{\partial y} + \frac{\partial v_o}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2.108)$$

e as curvaturas do plano médio são:

$$\begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w_o}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_o}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_o}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (2.109)$$

Para uma camada individual k em um laminado multi-direcional cujo plano médio esteja a uma distância $\bar{z}_k$ do plano de referência do laminado, conforme Figura 32, as relações de tensão-deformação para esta camada em relação aos eixos principais podem ser expressos como:

Figura 32 - Camada k em um laminado

(Adaptado de Daniel e Ishai, 2006)

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \quad (2.110)$$

e após a transformação para o sistema de coordenadas do laminado:

$$[\sigma]_{x,y}^k = [Q]_{x,y}^k [\varepsilon^\circ]_{x,y} + z [Q]_{x,y}^k [\kappa]_{x,y} \quad (2.111)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_s^\circ \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (2.112)$$

2. Forças e Momentos Resultantes

Em um laminado, devido à variação descontínua de tensões de camada para camada, torna-se mais conveniente lidar com o efeito integrado dessas tensões, através de expressões que relacionam forças e momentos com a deformação do laminado. Para um laminado, as tensões que atuam em uma camada k podem ser substituídas por forças e momentos resultantes (Figura 33 e 34) e pela integração

de tensões em cada camada ao longo da espessura do laminado (Jones, 1999; Daniel e Ishai, 2006) têm-se:

Figura 33 - Forças no plano em um laminado plano

(Fonte: Jones, 1999)

Figura 34 - Momentos fletores em um laminado plano

(Fonte: Jones, 1999)

$$\bullet \quad N_x^k = \int_{-1/2}^{1/2} \sigma_x dz \quad (2.113)$$

$$\bullet \quad N_y^k = \int_{-1/2}^{1/2} \sigma_y dz \quad (2.114)$$

$$\bullet \quad N_s^k = N_{xy}^k = N_{yx}^k = \int_{-1/2}^{1/2} \tau_s dz \quad (2.115)$$

$$\bullet \quad M_x^k = \int_{-1/2}^{1/2} \sigma_x z dz \quad (2.116)$$

$$\bullet \quad M_y^k = \int_{-1/2}^{1/2} \sigma_y z dz \quad (2.117)$$

$$\bullet \quad M_s^k = M_{xy}^k = M_{yx}^k = \int_{-1/2}^{1/2} \tau_s z dz \quad (2.118)$$

sendo que:

- z = coordenada de um ponto em um corte transversal ao longo da espessura
- t = espessura da camada
- N_x^k, N_y^k = força normal por comprimento de unidade
- N_s^k = força de cisalhamento por comprimento de unidade
- M_x^k, M_y^k = momento fletor por comprimento de unidade
- $M_s^k = M_{xy}^k = M_{yx}^k$ = momento torsor pr comprimento de unidade

Para um laminado multi-camadas, a força total e resultantes de momentos são obtidos pela soma dos efeitos para todas as camadas. Assim, conforme a Figura 35, para um laminado de n camadas, a força e momento fletor resultantes são:

Figura 35 - Laminado multi-direcional com as coordenadas das laminas individualmente

(Fonte: Daniel e Ishai, 2006)

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k dz \quad (\text{força resultante}) \quad (2.119)$$

e

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k z dz \quad (\text{momento fletor resultante}) \quad (2.120)$$

sendo que:

z_k e z_{k-1} são as coordenadas z superior e inferior das superfícies de uma camada k

Rigidez de um laminado: relações gerais de deformação-carregamento

Relação força-deformação

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{ys} \\ A_{sx} & A_{sy} & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_s^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} \\ B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (2.121)$$

Relação momento-deformação

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} \\ B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_s^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{ys} \\ D_{sx} & D_{sy} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (2.122)$$

sendo que:

- $A_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (z_k - z_{k-1}) \quad (\text{matriz A})$

- $B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (z_k^2 - z_{k-1}^2)$ (matriz B)
- $D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$ (matriz D)

$i, j = x, y, s$

Pela combinação das duas matrizes acima, obtém-se a expressão geral (matriz ABBD) que relaciona as forças e momentos no plano do laminado com as curvaturas e deformações no plano de referência:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \\ M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} & B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{ys} & B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} \\ A_{sx} & A_{sy} & A_{ss} & B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} \\ B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} & D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} & D_{yx} & D_{yy} & D_{ys} \\ B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} & D_{sx} & D_{sy} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \varepsilon_s^\circ \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (\text{matriz ABBD}) \quad (2.123)$$

ou na forma reduzida:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^\circ \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (2.124)$$

nota-se que as matrizes são simétricas, então:

$$A_{ij} = A_{ji}$$

$$B_{ij} = B_{ji}$$

$$D_{ij} = D_{ji}$$

$$(i, j = x, y, s)$$

As relações acima são expressas a partir de três matrizes de rigidez, $[A]$, $[B]$ e $[D]$, que são funções da geometria, propriedades dos materiais e

seqüência de empilhamento das camadas individuais, e são parâmetros elásticos médios de um laminado multi-direcional.

2.2.4.3 Análise de Falhas e Tensões

Em um projeto típico de uma placa laminada, perguntas básicas são feitas como segue (Jones, 1999):

- fornecido: carregamentos (no plano, transversais) e freqüências de excitação
- requisito: obter a configuração estrutural do laminado necessária para suportar os carregamentos fornecidos
 - espessura das lâminas?
 - número de lâminas?
 - orientação das lâminas?
 - seqüência de empilhamento do laminado?

As respostas podem ser obtidas por meio de um processo de projeto estrutural básico conforme a Figura 36:

Figura 36 - Processo de projeto estrutural

(Adaptado de Jones, 1999)

No processo, um conjunto de requisitos define o objetivo, ou seja, o que a estrutura deve desempenhar. Uma configuração inicial é escolhida conforme o conhecimento das cargas a serem suportadas, os materiais são escolhidos, apesar de ser uma configuração inicial, será o ponto inicial do processo de projeto iterativo. Com essa configuração, consistido de um material particular ou de vários, na etapa de análise e análise de falhas, com os carregamentos pré-estabelecidos, uma série de análises estruturais são efetuados a fim de obter os vários parâmetros de respostas estruturais tais como tensões, deslocamentos, carregamentos de flambagem, resposta em frequência etc. Tais análises são do tipo determinística, ou seja, dentro das limitações de precisão das técnicas de análise disponíveis, é

possível se prever um conjunto de respostas para uma configuração estrutural particular. Na próxima etapa, a análise por falhas é efetuado nas quais os diversos parâmetros de respostas obtidos são comparados com os valores admissíveis ou especificados, como segue:

Os parâmetros de resposta estrutural estão dentro dos limites do projeto?

- deflexões muito altas?
- carregamentos de flambagem muito próximos?
- frequências de vibração muito próximas da ressonância?
- tensões muito altas? Menores do que a resistência?

Os fatores de seguranças para os diversos tipos de falha podem ser muito diferentes uns dos outros, dependendo se o projeto é para um evento de falha catastrófico ou um evento de falha segura. A natureza da falha é refletida de acordo com o valor do fator segurança, i.e., o quão pode estar distante daquele tipo de evento. Um fator de segurança é geralmente um número sob legislação obtido através de um comitê que avalia as diversas conseqüências de um tipo de falha em um tipo particular de estrutura. Na prática, os fatores de segurança, por diversas razões, são diferentes para estruturas de compósitos do que de estruturas de metal. Como conclusão, a análise de falhas é o processo de se comparar o desempenho real com o desejado (função desejada), portanto o torna uma etapa não-trivial (complexa) no processo de projeto estrutural.

Nos compósitos estruturais, os danos e fraturas podem ocorrer em uma variedade de modos de falhas (Barbero, 1999), Figura 37 e 38, como segue:

- rompimento de fibra: ocorre sob carregamentos de tensão de tração, no qual pode ocorrer em níveis de tensão bem abaixo do limite de ruptura do material;

- micro-fissura na matriz: surgimento de micro-fissuras no polímero, que podem ser causadas por carregamento mecânico, tensões residuais de cura induzida, tensões térmicas, penetração de umidade ou envelhecimento;
- fissuras na matriz: similar ao de micro-fissuras, mas com fissuras maiores, com dimensões da ordem de magnitude do diâmetro da fibra ou maior;
- descolamento da fibra: ocorre quando a adesão fibra-matriz falha;
- delaminação: separação entre as camadas em um laminado;
- outros.

Figura 37 - Modos de falha

(Adaptado de Gay, Hoa e Tsai, 2003)

Figura 38 - Modos de dano

(Adaptado de Gay, Hoa e Tsai, 2003)

A falha em um laminado pode ser causada por falha de uma lâmina individual ou camadas dentro de um laminado (falha intra-laminar) ou pela separação de lâminas contíguas ou camadas (falha inter-laminar). Assim a falha de um laminado pode ser definida como a falha inicial ou final conforme o grau de conservadorismo aplicado (Daniel e Ishai, 2006). Na primeira definição, falha inicial, ou, falha da primeira camada – FPF (do idioma inglês: *First Ply Failure*), em que um laminado é considerado com falha quando a primeira camada (ou grupo de camadas) falha. Isto é determinado ao efetuar a análise de tensão de um laminado sob condições de carregamento dado, determinando o estado de tensão em cada camada individual, e avaliando-se a resistência de cada camada pela aplicação de um critério de falha selecionado. Nesse caso há a presunção de que cada lâmina (camada) em um laminado possui as mesmas propriedades e comporta-se da mesma maneira como uma lâmina unidirecional isolada. O enfoque dado pelo FPF é bastante conservador,

mas pode ser utilizado com fatores de segurança baixo, ou seja, na prática, no projeto procura-se que a estrutura trabalhe em cargas de trabalho bem abaixo de se produzir o FPF.

Na segunda definição, falha final do laminado – ULF (do idioma inglês: *Ultimate LaminatE Failure*), não há uma definição geral aceita de o que constitui essa falha. É geralmente aceito que o laminado é considerado com falha quando o nível máximo de carregamento é atingido. Outras definições para essa falha incluem uma degradação da rigidez prescrita, falha das camadas carregadas com o carregamento principal (camadas de zero grau), falhas em todas as camadas. A previsão de falha em laminado torna-se necessário em complemento à teoria de falha de uma lâmina, em que um esquema de avaria progressiva acompanha cada falha de camada. A influência da camada avariada nas camadas restantes deve ser avaliada até a falha final do laminado conforme o esquema de avaria progressiva adotado. O enfoque dessa falha é considerado mais avançado e requer um conhecimento mais preciso das condições de carregamento e distribuição de tensão, e portanto mais utilizado com fatores de segurança maiores.

E um terceiro modo de falha, falha inter-laminar, que é um tipo especial que consiste na separação de camadas contíguas, mesmo quando as camadas em si permanecem intactas. É um tipo comum de falha nas bordas livres ou em regiões de descontinuidade geométrica ou de carregamento, e a previsão desse tipo de falha requer uma tensão tri-axial e análise de falha incluindo resistência inter-laminar e propriedades de tenacidade do laminado.

Há uma dificuldade em incorporar os diversos modos de falha em projeto, sendo que uma forma mais simples é de fazer uso de critérios de falha empíricos,

similares aos critérios de falha utilizados em projetos de metais, mas modificados para compósitos. Critérios de falhas são equações com parâmetros ajustados para adaptar dados experimentais de falhas de compósitos de camada única. São usados em situações em que o projeto não dispõe de dados experimentais incluindo o projeto de laminados. Além disso, os critérios de falhas são complementados com técnicas de análise de falhas de laminados para a previsão de falha de laminado a partir de dados de uma camada única. Os critérios de falha são ajustados usando dados experimentais em testes simples de um compósito de camada única. A resistência de uma camada única de um material compósito é definida pelos seguintes valores de resistência:

- resistência à tração na direção da fibra, F_{1t}
- resistência à compressão na direção da fibra, F_{1c}
- resistência à tração na direção transversal a fibra, F_{2t}
- resistência à compressão na direção transversal a fibra, F_{2c}
- resistência ao cisalhamento no plano, F_6
- resistência ao cisalhamento interlaminar, F_4, F_5
- coeficiente de interação biaxial, f_{12}

Entre os critérios mais utilizados existentes, podem-se destacar:

- Critério de tensão máxima
- Critério de deformação máxima
- Critério de falha de Tsai-Hill
- Critério de falha de Tsai-Wu

- ✓ **Critério de tensão máxima:** prevê a falha de uma camada quando ao menos uma das tensões nas coordenadas do material $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_6, \sigma_4, \sigma_5)$ excede o valor experimental correspondente de resistência, ou seja, a falha ocorre se qualquer um dos comparativos é verdadeiro:

$$\sigma_1 > F_{1t} \quad \text{se } \sigma_1 > 0$$

$$abs(\sigma_1) > F_{1c} \quad \text{se } \sigma_1 < 0$$

$$\sigma_2 > F_{2t} \quad \text{se } \sigma_2 > 0$$

$$abs(\sigma_2) > F_{2c} \quad \text{se } \sigma_2 < 0$$

$$abs(\sigma_4) > F_4$$

$$abs(\sigma_5) > F_5$$

$$abs(\sigma_6) > F_6$$

As quantidades $F_{1t}, F_{1c}, F_{2t}, F_{2c}, F_4, F_5, F_6$ são valores de ruptura, sendo que essas quantidades poderiam ser substituídas pelos valores admissíveis. Caso os de ruptura sejam utilizados, um fator de segurança deve ser usado em projeto, ao passo que se os admissíveis são empregados, eles já contêm um fator de segurança embutido.

- ✓ **Critério de deformação máxima:** atualmente é o mais popular na indústria. Utiliza o conceito de proporção de resistência, como segue:

$$R_1 = \varepsilon_{1t} / \varepsilon_1 \quad \text{se } \varepsilon_1 > 0$$

$$R_1 = -\varepsilon_{1c} / \varepsilon_1 \quad \text{se } \varepsilon_1 < 0$$

$$R_2 = \varepsilon_{2t} / \varepsilon_2 \quad \text{se } \varepsilon_2 > 0$$

$$R_2 = -\varepsilon_{2c} / \varepsilon_2 \quad \text{se } \varepsilon_2 < 0$$

$$R_4 = \gamma_{4u} / \text{abs}(\varepsilon_4)$$

$$R_5 = \gamma_{5u} / \text{abs}(\varepsilon_5)$$

$$R_6 = \gamma_{6u} / \text{abs}(\varepsilon_6)$$

sendo que: ε_{1t} , ε_{1c} , ε_{2t} , ε_{2c} , γ_{4u} , γ_{5u} , γ_{6u} são deformações para falha.

Se o material é elástico linear até a falha, as deformações são relacionadas com os valores de resistência à ruptura:

$$\varepsilon_{1t} = F_{1t} / E_1$$

$$\varepsilon_{1c} = F_{1c} / E_1$$

$$\varepsilon_{2t} = F_{2t} / E_2$$

$$\varepsilon_{2c} = F_{2c} / E_2$$

$$\gamma_{4u} = F_4 / G_{23}$$

$$\gamma_{5u} = F_5 / G_{13}$$

$$\gamma_{6u} = F_6 / G_{12}$$

Nos dois casos, tensão máxima e deformação máxima, fornecem previsões próximas, mas não idênticas. Entretanto, valores reais de elongação para falha são geralmente maiores do que os previstos exceto na direção da fibra devido ao comportamento não-linear. Além disso, esses dois critérios separam os modos de falha no modo de fibra, representado pelas resistências na direção de fibra, e modo de matriz, representado pelas resistências transversais, e não consideram a interação entre os componentes de tensão.

- ✓ **Crterio de Tsai-Hill:** critrio adaptado para materiais ortotrpicos a partir do critrio de von Mises, originalmente para plasticidade de metais. Como os critrios de falhas so meios de se verificar se um dado experimental est ajustado a uma curva, a seguinte equao usada:

$$\frac{(\sigma_1^f)^2}{(F_1)^2} - \frac{(\sigma_1^f \sigma_2^f)}{(F_1)^2} + \frac{(\sigma_2^f)^2}{(F_2)^2} + \frac{(\sigma_6^f)^2}{(F_6)^2} + \frac{(\sigma_4^f)^2}{(F_4)^2} + \frac{(\sigma_5^f)^2}{(F_5)^2} - 1 = 0$$

(2.125)

sendo que o sobrescrito f indica que qualquer estado de tenso $(\sigma_1^f, \sigma_2^f, \sigma_6^f, \sigma_4^f, \sigma_5^f)$ um estado de tenso que produz falha (no envoltrio de falha). Todas as tenses de estados de falha obtidos pelas combinaes dos cinco componentes de tenso geram uma superfcie fechada (envoltrio de falha) que separa a regio de no-falha e a de falha. Se somente dois componentes de tenso so zero, o envoltrio gerado pela equao apresenta o formato de uma elipse. Para um dimensionamento em projeto, se um conjunto de tenses em questo, caso ele esteja dentro do envoltrio, este material no ir falhar, mas por outro lado no mostra o quanto o projeto conservador. Se o ponto estiver fora do envoltrio, o material falhar sendo que alteraes so necessrias, mas a magnitude de alteraes necessrias desconhecida. Para que se tenha um critrio de falha til, a equao reescrita utilizando-se o conceito de proporo de resistncia (R). Substituindo-se os componentes de tenso no envoltrio de falha σ_i^f por $R\sigma_i$, a condio por falha torna-se:

$$\left[\frac{(\sigma_1)^2}{(F_1)^2} - \frac{(\sigma_1 \sigma_2)}{(F_1)^2} + \frac{(\sigma_2)^2}{(F_2)^2} + \frac{(\sigma_6)^2}{(F_6)^2} + \frac{(\sigma_4)^2}{(F_4)^2} + \frac{(\sigma_5)^2}{(F_5)^2} \right] R^2 - 1 = 0 \quad (2.126)$$

ou

$$R = 1 / \sqrt{\left[\frac{(\sigma_1)^2}{(F_1)^2} - \frac{(\sigma_1 \sigma_2)}{(F_1)^2} + \frac{(\sigma_2)^2}{(F_2)^2} + \frac{(\sigma_6)^2}{(F_6)^2} + \frac{(\sigma_4)^2}{(F_4)^2} + \frac{(\sigma_5)^2}{(F_5)^2} \right]} \quad (2.127)$$

sendo que:

σ_i são os componentes de tensões para um carregamento de referência aplicado

$R = \frac{\sigma_{ruptura}}{\sigma_{aplicado}}$ é proporção de resistência. Essa proporção é similar a um

fator de segurança, se $R > 1$ o nível de tensão está abaixo da resistência do material, ao passo que se $R < 1$ o valor de tensão é maior do que o da resistência do material é um indicador de falha.

Este critério possui uma desvantagem que é o modo de falha não é mais identificado como nos critérios de deformação máxima e de tensão máxima, além de que também não leva em consideração comportamento diferente em tensão e compressão que é muito importante para os componentes de matriz polimérica.

- ✓ **Crterio de Tsai-Wu:** este crterio usa uma expresso quadrtica completa para esboar o envoltrio de falha, e pode ser expresso atravs de uma equao:

$$f_1\sigma_1^f + f_2\sigma_2^f + f_{11}(\sigma_1^f)^2 + f_{22}(\sigma_2^f)^2 + 2f_{12}(\sigma_1^f\sigma_2^f)^2 + f_{66}(\sigma_6^f)^2 + f_{44}(\sigma_4^f)^2 + f_{55}(\sigma_5^f)^2 - 1 = 0 \quad (2.127)$$

sendo que:

$$f_1 = \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} \quad (2.128)$$

$$f_2 = \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}} \quad (2.129)$$

$$f_{11} = \frac{1}{F_{1t}F_{1c}} \quad (2.130)$$

$$f_{22} = \frac{1}{F_{2t}F_{2c}} \quad (2.131)$$

$$f_{66} = \frac{1}{(F_6)^2} \quad (2.132)$$

$$f_{44} = \frac{1}{(F_4)^2} \quad (2.133)$$

$$f_{55} = \frac{1}{(F_5)^2} \quad (2.134)$$

$\sigma_1^f, \sigma_2^f, \sigma_6^f, \sigma_4^f, \sigma_5^f$ so componentes de tenso em qualquer ponto do envoltrio de falha.

Este critério, conforme pode ser visto nos coeficientes, considera comportamento diferente em tensão e compressão. Esse critério pode ser reescrito de uma forma que seja conveniente para projeto, considerando que desde o comportamento elástico linear até a falha seja presumido, os componentes de tensão na falha σ_i^f possam ser substituídos pelo produto da proporção de resistência vezes a tensão nominal $R\sigma_i$, obtido pela efetuação de análise com um carregamento de referência, então a equação torna-se:

$$(f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}\sigma_2^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 + f_{66}\sigma_6^2 + f_{44}\sigma_4^2 + f_{55}\sigma_5^2) R^2 + (F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2) R - 1 = 0 \quad (2.135)$$

sendo que:

$$f_{12} \cong -\frac{1}{2\sqrt{F_{1t}F_{1c}F_{2t}F_{2c}}} \quad (2.136)$$

é o coeficiente independente aproximado de interação entre as duas tensões normais

Novamente o critério pode ser reescrito como:

$$aR^2 + 2bR - 1 = 0 \quad (2.137)$$

sendo que:

$$a = f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}\sigma_2^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 + f_{66}\sigma_6^2 + f_{44}\sigma_4^2 + f_{55}\sigma_5^2 \quad (2.138)$$

$$b = \frac{1}{2}(F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2) \quad (2.139)$$

na qual, obtendo-se as raízes, chega-se a:

$$R = \frac{1}{a} (-b + \sqrt{b^2 + a}) \quad (2.140)$$

Conforme nota-se, o critério de Tsai-Wu ajusta melhor os dados experimentais, além de obter um valor único de proporção de resistência com uma simples equação quadrática, e considerar comportamentos diferentes em tração e compressão.

2.3 Vasos de Pressão em Compósitos

2.3.1 Aplicação

Uma das mais importantes aplicações de compósitos são os vasos de pressão, que por serem geralmente de formato circular axi-simétrico, são manufaturados a partir do processo de *filament winding* ou enrolamento filamenar. Neste processo, como já descrito, fibras contínuas de reforço pré-impregnadas com resina são enroladas em um mandril em um ângulo desejado, por meio de um carro transversal até que se obtenha uma malha fechada sobre a superfície do mandril. O processo de *filament winding* é o único processo de fabricação que atende os requisitos de estruturas especializadas como os vasos de pressão. O processo ao ser automatizado, possibilita alto volume de produção e torna-se viável em termos de custo para compósitos de alto desempenho, além da utilização de matérias-primas de baixo-custo e ferramental também de baixo-custo (Mazumdar, 2003).

Entre os diversos tipos de vasos de pressão pode-se destacar os cilindros de alta pressão para armazenamento de oxigênio denominados SCBA (do idioma inglês: Self-contained Breath Apparatus) e sistemas de oxigênio de emergência em

aeronaves da aviação comercial. O tipo SCBA é um equipamento, conforme Figura 39, utilizado por equipes de resgate, bombeiros e outros para fornecimento de ar respirável em um ambiente hostil, e não depende de um fornecimento externo de oxigênio (Wikipédia: <http://en.wikipedia.org/wiki/SCBA>).

Figura 39 - Conjunto típico de SCBA

(Adaptado de Monroe Corp Center – USA: Air-Pak 75 SCBA)

Geralmente opera com pressões entre 2.200 psi (15 MPa) e 4.500 psi (31 MPa) e é constituído por um cilindro de armazenamento de alta pressão, um regulador de pressão e uma conexão de inalação (máscara e bocal), todos conectados em uma estrutura de transporte a ser alojada nas costas do operador. Os cilindros de aviação comercial são bem semelhantes aos SCBA, porém com menos componentes (cilindro e conjunto de inalação), encontram-se nos

compartimentos de emergência, e são utilizados na situação em que há necessidade de oxigênio pelos tripulantes e passageiros, seja pela pressurização do interior da aeronave atingir o equivalente a altitude de 14.000 pés (condições normais são 8.000 pés) ou pela despressurização no interior da aeronave, na iminência de hipoxia (Wikipédia: http://en.wikipedia.org/wiki/Emergency_oxygen_system).

2.3.2 Regulamentações

Existem diversas regulamentações para esses tipos de sistemas de armazenamento, como por exemplo nos Estados Unidos da América:

- SCBA no combate a incêndios: *NFPA Standard 1981*;
- SCBA em ambientes químicos, biológicos, radiológicos e nucleares: *NIOSH approved SCBA's*;
- Sistemas de oxigenação na aviação comercial: DOT-E 10945, DOT-E 7277 e outros.

Entretanto, as regulamentações norte-americanas não especificam informações de dimensionamento, materiais, manufatura, inspeção e requisitos de teste para cilindros em compósitos, mas apenas para cilindros metálicos (*Title 49 CFR*). Então, o uso de cilindros em compósitos é autorizado pelo DOT através da emissão de exceções ou isenções (*DOT exemptions*) de especificações para cada empresa que se habilite a fornecê-los, e que podem ser renovadas ou não (Shen, 1995).

Uma parte importante do conjunto a ser considerado é o cilindro de armazenamento de oxigênio, pelo fato de altas pressões estarem envolvidas no engarrafamento do oxigênio. Conforme Shen (1995), cilindros em compósitos com

selantes (do idioma inglês: *liners*) metálicos foram inicialmente introduzidos pela NASA em 1970 para aplicações aeroespaciais, e desde então os cilindros são fabricados conforme dois enfoques:

- fibras são usadas para reforçar uma estrutura de parede (casca) metálica de alta resistência com enrolamento filamentar circunferencial (vide glossário) na parte cilíndrica do cilindro ou enrolamento filamentar (circunferencial e helicoidal cobrindo a parte cilíndrica do cilindro e helicoidal nas extremidades – calotas) cobrindo o cilindro todo;
- o enrolamento filamentar é usado para reforçar um selante metálico de parede bem delgada, na qual uma espessura mínima é necessária para impermeabilização e fabricação. O selante carrega somente uma pequena parcela do carregamento estrutural. Os materiais usados para esses selantes são os metais dúcteis de baixa resistência tais como o alumínio, aço inoxidável e titânio. Os não-metais também podem ser utilizados como os termoplásticos do tipo polietileno de alta densidade, que é uma membrana de alta flexibilidade, e teria como função evitar vazamentos e não adicionar nenhum carregamento ao cilindro (Barbero, 1999).

Considerando os cilindros em compósitos com enrolamento total, com ou sem selantes, em contrapartida às regulamentações norte-americanas, na Europa há uma norma, *BS EN 12245 – transportable gas cylinders – fully wrapped composite cylinders*, que especifica desde os mínimos requisitos dos materiais, a construção do cilindro, teste de protótipos até as rotinas de inspeção em manufatura, ou seja, uma norma completa. Aplica-se para cilindros com capacidade de volume de água até

450 litros para gases comprimidos, liquefeitos e dissolvidos e de selantes metálicos ou não-metálicos e cilindros sem selantes.

2.3.3 Fator de Segurança

De acordo com Norton (2006), em dimensionamentos estruturais de qualquer tipo, é sempre necessário calcular um ou mais fatores de segurança para estimar a possibilidade de falhas. O fator de segurança pode tanto significar uma fração da capacidade estrutural requerida, ou um multiplicador aplicado ao carregamento máximo previsto (força, torque, momento fletor ou uma combinação desses esforços), ao qual um componente ou um conjunto estará sujeito (http://en.wikipedia.org/wiki/Factor_of_safety). Os dois modos descritos diferem entre si:

- o primeiro significa uma medida de confiabilidade de um projeto em particular;
- o segundo é um requisito imposto por lei, norma, especificação ou contrato.

Entretanto, devido a uma inconsistência e confusão quanto ao uso, define-se o primeiro como fator de segurança e é fornecido ao engenheiro como um requisito, enquanto que o segundo defini-se como fator de projeto e é calculado pelo engenheiro.

Os fatores de segurança baseiam-se em diversas considerações, sendo as principais: a precisão do carregamento, resistência, estimativa de desgaste, e também falhas de engenharia e super-dimensionamento de componentes. As conseqüências das falhas de um componente podem levar a uma perda financeira substancial devido a danos físicos ou a morte. Geralmente quando os carregamentos são bem definidos e conhecidos e as estruturas são redundantes,

aplica-se um fator de segurança baixo, como dois (2,0). O fator de segurança um (1,0) implica que o projeto satisfaz os requisitos, mas não excede os mínimos requisitos necessários, ou seja, sem margem a variação ou erro. Um alto fator de segurança, quatro (4,0) ou superior, implica em super-dimensionamento que resulta em peso excessivo e custo.

Os materiais metálicos dúcteis usam fatores mais baixos que os materiais frágeis (alto fator de segurança). Os metais dúcteis sob carga estática são projetados contra a resistência ao escoamento e espera-se por sinais de falha antes da fratura, como fissuras que indiquem a possibilidade de uma falha mecânica por fratura, ao passo que os materiais frágeis são projetados contra a resistência máxima à tração, ou seja, nesse caso a falha significa fratura (Norton, 2006).

Os vasos de pressão, e em particular os cilindros de pressão, usualmente adotam fator de segurança entre dois e quatro, dependendo do material a ser confeccionado, sendo que leva-se em consideração a relação pressão de serviço e a pressão *burst* ou de estouro, carregamento usado para dimensionamento, como segue:

- pressão interna de serviço: p_s
- pressão *burst* ou de estouro: $p_b = \text{fator} \times p_s$ (2.141)

fator: valor conforme o material de construção

Para a obtenção dos fatores a serem usados para a obtenção de pressão *burst* nos cilindros SCBA ou de aviação, pela similaridade de características de pressões e geometrias entre esses cilindros com os de armazenamento gás GNV (gás natural veicular), adota-se um dos requisitos de projetos da norma ISO 11439, que é a classificação de cilindros conforme o material de construção do cilindro. No

presente trabalho são estudados dois tipos de construção de cilindros: metálicos em alumínio e em compósitos :

- CNG-1: cilindro metálico sem costura (não-soldado) em aço (exceto aço inoxidável) ou alumínio, sendo a pressão *burst*:

$$p_b = 2,5 \times p_s \text{ (mínimo)} \quad (2.142)$$

- CNG-4: cilindro todo em compósito (filamento contínuo impregnado com resina e com selante não-metálico), sendo a pressão *burst* conforme o tipo de fibra empregado:

✓ fibra de vidro: $p_b = 3,65 \times p_s \text{ (mínimo)}$ (2.143)

✓ fibra de carbono: $p_b = 2,35 \times p_s \text{ (mínimo)}$ (2.144)

2.3.4 Cilindros Metálicos

Comercialmente também são utilizados cilindros metálicos sem reforços de fibra. O Alumínio 6061-T6 é o material mais utilizado para fabricação desses cilindros e também dos selantes (Shen, 1995). Esses cilindros, sem costura ou emenda, são fabricados a partir de um blanque circular, o qual o formato cilíndrico é obtido através de várias etapas de repuxo profundo. Após tratamento térmico adequado, o pescoço é obtido através de conformação circular para fechamento (Figura 40).

Figura 40 - Confecção de um cilindro sem costura

(Fonte: Shen, 1995)

Para a obtenção da espessura total através de cálculo analítico, um dos métodos que pode ser utilizado é a teoria de falha de materiais dúcteis, na qual tais materiais sob carga estática redistribuem as tensões por escoamento sem fratura (Adams e Askenazi, 1999). E entre várias teorias, há a teoria da energia de distorção, mais conhecido como teoria de von Mises-Hencky ou critério de resistência de von Mises. Esta teoria prevê que a falha por escoamento ocorrerá quando o valor von Mises (σ_{vm}) for igual à resistência de escoamento (σ_e) do material.

A equação do critério de escoamento de von Mises possui a característica de mostrar o estado de tensão completo, e é representado por:

$$\sigma_{vm} = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2.145)$$

sendo que: σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais.

Um cilindro ou vaso de pressão cilíndrico de parede fina carregado somente sob uma pressão interna, pela teoria de membranas, o estado de tensão em uma pequena porção de parede se resume na tensão longitudinal e tensão circunferencial, sendo que a tensão radial é desprezível para efeito de dimensionamento. E essas tensões são também as tensões nas direções principais pela característica isotrópica do material alumínio (Figura 41).

Figura 41 - Cilindro isotrópico de parede fina sob pressão interna

Seja:

$$\sigma_1 = \sigma_y = \sigma_h = \sigma_c = \frac{p_b \cdot r_m}{t} \quad (\text{tensão circunferencial ou hoop}) \quad (2.146)$$

$$\sigma_2 = \sigma_x = \sigma_l = \sigma_m = \frac{p_b \cdot r_m}{2t} \quad (\text{tensão longitudinal ou meridional ou axial}) \quad (2.147)$$

$$\sigma_3 = \sigma_z = \sigma_r = 0 \quad (\text{tensão radial})$$

sendo que:

p_b é a pressão de estouro (do idioma inglês: *burst*)

r_m é o raio médio entre o raio externo e o raio interno do cilindro

t é a espessura total de parede do cilindro

Então:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \Rightarrow \sigma_1 = 2 \sigma_2 \quad \therefore \quad \sigma_2 = \frac{1}{2} \sigma_1$$

$$r_m = \frac{D_e - t}{2} \quad (2.148)$$

sendo que D_e é o diâmetro externo do cilindro

2.3.5 Cilindros em Compósitos

Para a obtenção da espessura total do laminado através de cálculo analítico, um dos métodos que pode ser utilizado é através do método *netting analysis* (análise de rede) conforme Gay, Hoa e Tsai (2003) e MIL-HDBK-17-3F (1997). Esse método assume que as tensões induzidas para a estrutura são todas transferidas para as fibras de reforços, as quais são tensionadas por tração. A parcela de tensão na matriz (resina) é desprezada, e sua única função é manter geometricamente a posição das fibras. E não pode ser utilizado para se obter flexão, cisalhamento ou tensões de descontinuidade ou resistência à flambagem. É um método conservador que somente considera a resistência da fibra de reforço, entretanto quando utilizado experimentalmente com a capacidade de tração determinada, torna-se uma excelente ferramenta preliminar de projeto, que ainda é muito utilizado atualmente pelas indústrias de *filament winding*.

Para aplicação da análise de rede para um típico vaso ou cilindro de alta pressão de parede fina (casca de revolução), manufaturado pelo processo de *filament winding*, com enrolamento helicoidal, conforme a Figura 42, os seguintes itens são considerados:

- r_m é o raio médio entre o raio externo e o raio interno do cilindro;
- espessura t de parede na parte cilíndrica é pequena se comparado com o raio médio r_m do cilindro;
- espessura t_f de fibras;
- pressão interna de serviço: p_s ;
- pressão burst ou de estouro: $p_b = \text{fator} \times p_s$

fator: valor conforme material de fibra de reforço a ser utilizado, conforme requisito de projeto da ISO 11439;

- tensões nas paredes σ_x e σ_y nas direções longitudinal e transversal (direções globais), respectivamente;
- o enrolamento helicoidal na parte cilíndrica é constituído de camadas (lâminas) alternadas a $\pm \alpha$ graus em relação ao eixos longitudinal;
- tensão na direção da fibra: σ_l

Figura 42 - Cilindro de alta pressão em *filament winding* - enrolamento helicoidal

(fonte: Gay, Hoa e Tsai, 2003)

Novamente pela teoria de membranas, o estado de tensão em uma pequena porção de parede se resume na tensão longitudinal e tensão circunferencial, nas direções globais x e y respectivamente, sendo que a tensão radial é desprezível para efeito de dimensionamento. Entretanto, considera-se essa pequena porção como sendo ortotrópica (Figura 43), ou seja, existência da tensão de tração na direção da fibra σ_l .

Figura 43 - Elemento de camada helicoidal - direção axial

(Adaptado de MIL-HDBK-17-3F, 1997)

Essa tensão pode ser expressa em termos das tensões circunferencial e longitudinal presentes na parede – teoria de membranas, como segue:

$$\text{tensão longitudinal: } \sigma_x = \frac{p_b \cdot r_m}{2t} \quad (2.149)$$

$$\text{tensão circunferencial: } \sigma_y = \frac{p_b \cdot r_m}{t} \quad (2.150)$$

As tensões circunferencial e longitudinal nas fibras podem ser representadas pelo círculo de tensões de Mohr, no qual o ponto inicial é de tensão normal pura σ_l na face normal ao eixo l , conforme Figura 44.

Figura 44 - Círculo de Mohr com as tensões circunferencial e longitudinal

(Fonte: Gay, Hoa e Tsai, 2003)

Geometricamente obtém-se que:

$$\sigma_x = \sigma_l \cdot \cos^2 \alpha \quad (2.151)$$

e

$$\sigma_y = \sigma_l \cdot \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \sigma_l \cdot \sin^2 \alpha \quad (2.152)$$

igualando-se com as tensões circunferencial e longitudinal presentes na parede

$$\sigma_l \cdot \cos^2 \alpha = \frac{p_b \cdot r_m}{2t_f} \quad (2.153)$$

$$\sigma_l \cdot \sin^2 \alpha = \frac{p_b \cdot r_m}{t_f} \quad (2.154)$$

e dividindo-se uma pela outra, resulta:

$$\tan^2 \alpha = 2 \Rightarrow \alpha = 54,7 \text{ graus}$$

ângulo em que o estado de tensão é uniaxial, pura tensão de tração nas fibras.

Portanto, a tensão nas fibras é:

$$\sigma_l = \frac{3}{2} \frac{p_b \cdot r_m}{t_f} \quad (2.155)$$

Para se obter a espessura mínima de fibras, deve-se considerar a tensão nas fibras

igual a resistência de tração da fibra, portanto a equação anterior torna-se:

$$t_{f \min} = \frac{3}{2} \frac{p_b \cdot r_m}{\sigma_t} \quad (2.156)$$

E conseqüentemente a espessura mínima do laminado é obtida a partir da relação de fração de volume da fibra:

$$t_{lam} = \frac{t_{f \min}}{v_f} \quad (2.157)$$

A outra possibilidade de configuração de enrolamento das fibras em um cilindro é o enrolamento helicoidal e circunferencial, na qual o enrolamento helicoidal tem ângulo de enrolamento de $\pm \alpha_1$ graus e o circunferencial de $\alpha_2 = 90$ graus, e as tensões nas fibras helicoidais σ_{l1} e nas fibras circunferenciais σ_{l2} , conforme Figura 45.

Figura 45 - Cilindro de alta pressão em filament winding - enrolamento helicoidal e circunferencial

(Fonte: Gay, Hoa e Tsai, 2003)

Adotando-se as mesmas suposições na situação de somente enrolamento helicoidal, considerando uma pequena porção de parede do cilindro (Figura 46), o estado de tensão devido a pressão interna de serviço é o de que todas as fibras suportam os carregamentos sob tensão de tração e a matriz nenhum carregamento.

Figura 46 - Elemento de camada helicoidal - direção circunferencial

(Adaptado de MIL-HDBK-17-3F (1997))

O estado de tensão no plano x e y pode ser obtido através do círculo de tensões de Mohr (Figura 47), na qual:

Figura 47 - Círculo de Mohr com as tensões circunferencial e longitudinal

(Fonte: Gay, Hoa e Tsai, 2003)

para as camadas helicoidais (α_1):

t_{1f} é a espessura da camada de fibras helicoidais

$$\sigma_{x1} = \sigma_{l1} \cdot \cos^2 \alpha_1 \quad (2.158)$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_{l1} \cdot \sin^2 \alpha_1 \quad (2.159)$$

$$\tau_{xy1} = \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sigma_{l1} \quad (2.160)$$

para as camadas circunferenciais ($\alpha_2 = 90$ graus):

t_{2f} é a espessura da camada de fibras circunferenciais

$$\sigma_{x2} = 0$$

$$\sigma_{y2} = \sigma_{l2}$$

$$\tau_{xy2} = 0$$

No cálculo de resultante de forças nas seções de largura unitária e normais x e y respectivamente:

na direção x (longitudinal):

$$\sigma_{x1} \cdot t_{1f} \cdot 1 + \sigma_{x2} \cdot t_{2f} \cdot 1 = \sigma_x \cdot t \cdot 1$$

então:

$$t_{1f} \cdot \cos^2 \alpha_1 \cdot \sigma_{l1} = t \cdot \sigma_x = t \cdot p_b \cdot \frac{r_m}{2e}$$

$$t_{1f} = \frac{p_b}{\sigma_{l1}} \cdot \frac{r_m}{2 \cos^2 \alpha_1} \quad (2.161)$$

na direção y (circunferencial):

$$\sigma_{y1} \cdot t_{1f} \cdot 1 + \sigma_{y2} \cdot t_{2f} \cdot 1 = \sigma_y \cdot t \cdot 1$$

então:

$$t_{1f} \cdot \sin^2 \alpha_1 \cdot \sigma_{l1} + t_{2f} \cdot \sigma_{l2} = t \cdot \sigma_y = t \cdot p_b \cdot \frac{r_m}{e}$$

$$t_{2f} = \frac{p_b}{\sigma_{l2}} \cdot r_m \left(1 - \frac{\tan^2 \alpha_1}{2} \right) \quad (2.162)$$

Portanto a espessura mínima de fibras pode ser escrito como:

$$t_{f \min} = t_{1f} + t_{2f} = p_b \cdot r_m \left(\frac{1}{2\sigma_{l1} \cdot \cos^2 \alpha_1} + \frac{2 - \tan^2 \alpha_1}{2\sigma_{l2}} \right)$$

e considerando que a tensão nas fibras seja igual a resistência à tração ($\sigma_{l1} = \sigma_{l2} = \sigma_t$), então:

$$t_{f \min} = \frac{p_b \cdot r_m}{2\sigma_t} \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha_1} + 2 - \tan^2 \alpha_1 \right)$$

$$t_{f \min} = \frac{3}{2} \frac{p_b \cdot r_m}{\sigma_t} \quad (2.163)$$

Em termos de proporção entre as espessuras:

$$\frac{t_{1f}}{t_{f \min}} = \frac{1}{3 \cos^2 \alpha_1}$$

e

$$\frac{t_{2f}}{t_{f \min}} = \frac{2 - \tan^2 \alpha_1}{3}$$

A espessura do mínima do laminado é obtido levando-se em conta a proporção de volume de fibras:

$$t_{lam \min} = \frac{t_{f \min}}{v_f} \quad (2.164)$$

2.4 Método dos Elementos Finitos

2.4.1 Introdução

No ciclo de vida de um produto, uma etapa a ser destacada é o processo de desenvolvimento de produto. Existem dois tipos de processos que podem ser mencionados: processo de desenvolvimento de produto tradicional e o processo de desenvolvimento que utiliza a engenharia preditiva (Adams e Askenazi, 1999).

No processo de desenvolvimento tradicional que é usado em grande parte das empresas, devido ao reduzido tempo de colocação do produto no mercado, há uma tendência de que as avaliações de engenharia sejam bastante reduzidas para uma determinada configuração. Ou seja, procura-se favorecer a elaboração de um protótipo mais cedo possível para avaliações de engenharia a fim de reduzir o número de testes e protótipos posteriores; e também há uma tendência de que mesmo com um grau de incerteza o projeto funcionará – baseado em projetos similares anteriores, na qual há um grande risco de retrabalho no projeto. Na Figura 48 pode-se observar o fluxo de etapas de um processo tradicional. Como se observa pelo diagrama, quando uma funcionalidade estrutural é claramente identificada à frente, ela é então calculada e analisada ou redimensionada no projeto. O real desempenho de um componente ou sistema não é tipicamente conhecido até as fases de prototipagem e testes. Caso nenhum problema surja durante essas fases, o projeto é considerado aceitável; e se o cronograma e orçamento permitirem, um certo nível de otimização é efetuado.

Figura 48 - Processo de desenvolvimento de produto tradicional

(Adaptado de Adams e Askenazi, 1999)

Por outro lado, o processo de desenvolvimento baseado na engenharia preditiva (Figura 49) segue um enfoque contrário ao do tradicional, o do desenvolvimento de produto rápido – RPD (do idioma inglês: *Rapid Process Development*) e ciclo de testes e retrabalho de projetos efetuados em protótipos via modelos gráficos. O RPD está diretamente relacionado com o custo e velocidade dos computadores, ou seja, à medida que eles tornam-se mais rápidos e baratos, novos e poderosos usos são desenvolvidos. A implementação da estratégia RPD procura tirar o máximo proveito das aplicações computacionais para fornecer três atividades fundamentais: comunicação, visualização e simulação. A comunicação se reflete na melhoria da engenharia colaborativa e simultânea, na qual o projeto em detalhes pode ser compartilhado entre o grupo de projeto, fornecedores, clientes, outras áreas da empresa que participam do projeto. A visualização permite aos

engenheiros melhor entendimento da geometria e interação dos componentes, ou seja, produzirá uma melhor clareza na tomada de decisões para relações de causa e efeito. E também fornecedores de ferramentas (moldes, matrizes de corte etc) poderão ter uma melhor visualização de áreas de difícil entendimento. As aplicações de simulação reduzem sensivelmente o ciclo de desenvolvimento de produtos em verificações tais como: níveis de tensão ou comportamento dos deslocamentos de um componente ou sistema sob condições de operação e também em condições de extremo uso; falhas em potencial e redução de custos significativos podem ser identificados na fase inicial do projeto a fim de minimizar os custos de manutenção em campo.

Figura 49 - Processo de desenvolvimento de produto rápido - RPD

(Adaptado de Adams e Askenazi, 1999)

Três tecnologias são identificadas como essenciais que habilitam as três atividades anteriores no processo RPD: modelamento 3-D em sólidos, análise por elementos finitos (MEF) e prototipagem rápida (RP – do idioma inglês: *Rapid Prototyping*). Modelos sólidos de peças e conjuntos permitem que os projetistas rapidamente representem suas idéias em uma maneira simultânea (comunicação e visualização), ao passo que os membros do grupo de desenvolvimento podem qualificar as técnicas de montagem, manufaturabilidade e “olhe e sinta” (simulação). O modelo sólido é definido como o dado fundamental para outras aplicações tais como detalhamento, documentação, prototipagem, análise, manufatura e marketing. A prototipagem rápida faz a interligação entre o virtual e o mundo físico, na qual as possibilidades de uso são vastas tais como uma “impressão” 3-D de uma peça em questão de horas, a área comercial e a engenharia podem testar variações de um conceito e incorporar sugestões em protótipos quase que em tempo-real, além de que uma peça física expressa muito mais coisas do que uma visualização na tela de um monitor para uma apresentação em uma reunião de desenvolvimento. Por fim, a análise por elementos finitos permite que sejam previstos, no estágio inicial do desenvolvimento do produto, níveis de tensão, deformação, temperaturas, e resposta a vibração ou características do fluxo do fluido em clara representação por meio de simulação. Iterações de projeto na geometria conceitual podem levar a um total replanejamento do produto ou a uma significativa redução na quantidade de protótipos planejados. As aplicações atuais de análise melhoraram bastante a habilidade do engenheiro na visualização e comunicação através de impressões coloridas de resultados de peças sob teste, sendo mais eficazes do que um memorial de cálculo com diversas equações.

Nota-se que nos dois processos de desenvolvimento existe a etapa de análise de engenharia (“verificação” no processo tradicional e “análise” no processo RPD), na qual no processo tradicional a técnica utilizada é o da “técnica clássica de forma fechada” (Norton, 2006). Ou também pode ser denominado como “solução analítica” com as seguintes características (Lirani, 2001):

- aplicável à peças de geometria simples;
- exige hipóteses de difícil ocorrência, tais como homogeneidade, isotropia, linearidade de resposta etc;
- não tem desempenho eficaz, mesmo sendo exato.

Por outro lado, no processo RPD a análise de engenharia usa a técnica de MEF com as seguintes características (Adams e Askenazi, 1999):

- MEF é uma aproximação;
- divide um volume contínuo em partes ou elementos discretos;
- os modelos de teste com as devidas suposições podem qualificar a análise MEF através da correlação com um protótipo físico;
- faz uso de suposições, ou seja, toda variável, que é usado para entrada no sistema é uma suposição e uma fonte de erro.

Independentemente da técnica de análise usada, a precisão da solução é sempre dependente da validade de todas as suposições, ou seja, a solução correta é o resultado esperado em operação. Por outro lado, a solução precisa pela técnica MEF é o melhor resultado que pode ser obtido pelas suposições (propriedades dos materiais, geometria e condições de contorno especificadas) (Adams e Askenazi, 1999).

O MEF aplica-se a sistemas ou meios contínuos – sólidos e fluidos – ou seja, não se limita apenas à análise estrutural (deformações e tensões em sólidos), mas também para mecânica dos fluidos (escoamento de líquidos, distribuição de pressão), transferência de calor (distribuição de temperatura em um corpo), acústica, eletromagnetismo (campo magnético) e outros.

Diversas formulações matemáticas foram propostas e usadas desde 1956, quando o MEF foi codificado por M.J. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin e L.J. Topp. O enfoque foi denominado como “método da rigidez direta” – DSM – do idioma inglês: *Direct Stiffness Method*) e usa a rigidez de um elemento para computar os deslocamentos de nós e forças internas que resultam de um conjunto de carregamentos externos e condições de contorno. As deformações são computadas a partir dos deslocamentos e as tensões a partir das deformações usando a lei de Hooke (Norton, 2006). Este método é o mais utilizado nas aplicações comerciais de MEF, mais conhecidas como aplicações CAE (do idioma inglês: *Computer-aided Engineering*).

Nos problemas estruturais deve-se levar em conta o tipo de carga aplicado, pois isso define o tipo de solução a ser usado, têm-se geralmente dois tipos: estático e dinâmico. O estático presume-se que todas as cargas são aplicadas gradualmente até o seu valor final de magnitude. Perde-se esse pressuposto a partir do momento que se tem uma brevidade da duração do evento combinada com a rigidez da estrutura, ou seja, o carregamento é removido antes que a resposta completa possa ser induzida. Para muitos problemas, simplifica-se como carregamento estático. No dinâmico existem três tipos de carregamentos na qual cada um requer tipo de solução separado para uma resposta própria:

- resposta transiente ou carregamento de dependência de tempo;
- resposta de frequência ou carregamento senoidal;
- resposta aleatória.

Outro aspecto a ser considerado no tipo de solução é se a estrutura é linear ou não-linear, a qual também define o tipo de solução a ser adotada para o problema. É linear baseado no pressuposto de pequenas deformações, materiais elásticos, e o carregamento é estático. A aproximação linear – solução rápida e eficiente – pode fornecer muitas informações sobre o comportamento da estrutura, e pode ser uma boa solução para muitas análises. O mesmo se pode dizer sobre essa solução ser mais popular e disponível na maioria das aplicações CAE de mercado, ao passo que a solução não-linear são módulos CAE que requerem um nível de conhecimento acima da solução linear, além do fator custo. Entretanto, a maioria dos problemas do mundo são não-lineares. O grau de não-linearidade, ou a discrepância entre a solução não-linear e a aproximação linear definirá quão válido os resultados lineares são. Um meio comum de manusear a não-linearidade com uma solução linear é pelo uso do fator de segurança. Caso o fator de segurança seja alto devido a incerteza em um ou mais do que quatro pressupostos primários, o erro não-linear em uma solução quase-linear pode ser desprezado (Adams e Askenazi, 1999).

E por fim a discretização – geração de malha de elementos – tem um papel fundamental, pois será a partir dela que o sistema físico será representado através de modelo matemático discretizado, pelo fato de as tensões serem variáveis ao longo do meio contínuo que forma o componente. Ao se dividir o componente em um número finito de elementos discretos conectados junto aos seus nós, obtém-se

uma aproximação de tensões e deformações em um componente para um conjunto de condições de contorno e esforços aplicados em vários nós da estrutura. A aproximação pode ser melhorada ao se usar elementos menores – refinamento da discretização – ao custo de tempo de processamento computacional, se bem que atualmente isso já não seja mais um problema com os computadores disponíveis se comparado à época de surgimento do MEF. Na otimização do balanceamento entre a precisão do resultado e o tempo de processamento computacional, a definição do elemento apropriado, sua quantidade e distribuição devem ser levados em conta. Elementos maiores podem ser usados em regiões da peça onde o gradiente de tensão varia suavemente, enquanto que em regiões onde o gradiente de tensão varia bruscamente, tais como em concentração de tensão, carregamento e condição de contornos aplicados, uma discretização refinada deve ser utilizada (Norton, 2006).

2.4.2 Etapas de Análise

Um processo típico de MEF (Figura 50), pode ser descrito baseado nos módulos contidos na maioria das aplicações comerciais de CAE disponíveis no mercado e que usualmente contém três componentes essenciais para realização de simulações de engenharia, como segue:

- Pré-processamento;
- *Solver* (Análise);
- Pós-processamento.

O Pré-processamento define o modelo em termos de elementos finitos e fatores de ambiente a serem aplicados. O pré-processador fornece a interface

(gráfica) entre o usuário e a tecnologia de solução (*Solver*), na qual é possível a criação da geometria ou importação da geometria CAD (do idioma inglês: *Computer-aided Design*), discretização (geração de malhas) de geometrias, definição de materiais, propriedades dos elementos, preparação das condições de contorno e compilação dos dados necessários para o *Solver* (Adams e Askenazi, 1999). De uma forma seqüencial ocorre, como segue:

- Construção de um modelo de elementos finitos da estrutura a ser analisada, a partir da leitura da descrição topológica de atributos geométricos, seja ela no formato 1-D, 2-D ou 3-D (mais comum atualmente), para representação mais próxima possível do sistema real com seus atributos e parâmetros.
- O processo de discretização ou geração de malhas divide o modelo em elementos, ou seja, a criação de uma rede na qual é criado um arranjo geométrico de elementos e nós. Os nós são pontos identificados (numerados) e são usados para se obter atributos como deslocamentos. Os elementos são também identificados por números e conectados aos nós a partir dos vértices (elementos lineares) ou vértices e arestas (elementos quadráticos) e definem massa localizada e propriedades de rigidez do modelo.
- Por fim, a entrada das condições de contorno do modelo que representam as condições de operação da estrutura e que não podem ser representadas no modelamento geométrico, geralmente são aplicadas como restrições e carregamentos. Os carregamentos podem ser na forma de forças, momentos, pressões, temperaturas,

acelerações ou deslocamentos. As restrições, por outro lado, são tipicamente reações aos carregamentos aplicados. As condições de contorno podem referenciar um sistema de coordenadas que não sejam sistema global de coordenadas (usualmente o Cartesiano). Um fator essencial na avaliação de um esquema de condição de contorno é a escolha de carregamentos e restrições conforme os elementos usados no modelo ou elementos selecionados localmente em uma região de aplicação. Essa escolha é sempre regida pelos graus de liberdades – DOF (do idioma inglês: *Degrees of Freedom*) disponíveis nesses elementos. No ambiente CAE, o DOF é usado em duas formas: DOF espacial e DOF elementar. O DOF espacial refere-se aos três modos de deslocamentos e três modos de rotação, que são possíveis para qualquer componente ou sistema no espaço tridimensional. A quantidade de graus de liberdade em um modelo rege a quantidade de equações necessárias para defini-lo e é a melhor indicação do tamanho do modelo. O DOF elementar representa a capacidade de cada elemento em transmitir ou reagir aos carregamentos (Adams e Askenazi, 1999).

A próxima etapa de um MEF é a análise (*solving*) na qual uma série de processamentos computacionais resulta em uma solução. O processador (*solver*) usa os nós e dados de conectividade dos elementos fornecidos pelo pré-processador e calcula as respostas solicitadas ou efeitos tais como deformações, solicitações, tensões que são causados pelos carregamentos aplicados a estrutura. Entre os processos computacionais mais comuns do *solving*, tem-se:

-
- cálculo das matrizes parcelas;
 - integração numérica;
 - transformação de coordenadas;
 - cálculo de matrizes elementares;
 - montagem das matrizes globais;
 - aplicação das condições de contorno;
 - uso da solução apropriada (estática ou dinâmica).

Na última etapa, pós-processamento, os resultados do *solving* podem ser visualizados através de saídas gráficas do pós-processador para analisar as implicações dos resultados. Tais saídas são do tipo gráficos coloridos de alta-resolução, arquivos de animação e resultados numéricos. Entre os resultados mais comuns tem-se:

- deslocamentos;
- rotações;
- velocidades e acelerações;
- quantidades de deformação (máxima, média, mínima principal; normal e cisalhamento; cisalhamento de casca de membrana e transversal);
- energia de deformação;
- quantidades de tensão (máxima, média, mínima principal; normal e cisalhamento; Von Mises);
- forças e momentos resultantes e de reação;
- resultados de elementos de linha;
- resultados de elementos de casca.

Figura 50 - Diagrama típico de um processo MEF

(Adaptado de Lirani, 2001)

3. Materiais e Métodos

A seguir são detalhados os materiais que serão utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Em seguida é apresentada a metodologia utilizada visando atingir os objetivos iniciais.

3.1 Recursos Materiais

3.1.1 Sistemas Computacionais

Em termos de aplicação CAD, para modelagem 3-D em sólidos, foi utilizado o Solid Edge. Versão 15 para ambiente operacional PC / Microsoft Windows XP Professional: desenvolvido pela empresa alemã UGS (Grupo Siemens) e aplicado geralmente a projetos mecânicos. Possui ferramentas de modelagem sólida integradas em um ambiente digital com diferentes atividades de desenvolvimento de produtos, tais como projeto conceitual e elaboração de esboços (do idioma inglês: *Sketches*), simulações de montagem e integrações com sistemas de análise cinemática e de engenharia. Como a grande maioria dos sistemas de modelagem sólida, é totalmente parametrizado, possibilitando alterações de maneira rápida e previsível. Foi utilizado neste trabalho para desenvolver a geometria 3-D do cilindro de pressão utilizado nas análises. A interface com o pacote de Elementos Finitos pode ser feita diretamente, a partir da leitura dos arquivos de saída: nativos (.par), ou por meio de padrões neutros como IGES (.igs), STEP (.stp) ou Parasolid (.x_b ou .x_t).

Para análise numérica via elementos finitos, foi utilizado a aplicação CAE o Algor. Versão 16 para ambiente operacional PC / Microsoft Windows XP

Professional: desenvolvido pela empresa americana Algor e aplicado para análises pelo método dos elementos finitos. Possui interface amigável e possibilita a leitura dos arquivos nativos (.par) da aplicação CAD Solid Edge, o que minimiza erros que possam advir da conversão de formatos.

3.1.2 Informações Gerais do Cilindro Virtual de Referência

O cilindro de referência (Figura 51) adotado para dimensionamento e validação, conforme informação de catálogo de um fabricante, possui as seguintes dimensões:

Diâmetro externo: $D_e = 111,2 \text{ mm}$;

Comprimento total: $L_t = 371,5 \text{ mm}$;

Pressão de serviço ou trabalho: $p_s = 3.000 \text{ psi} = 207 \text{ bar} = 20,7 \text{ MPa}$;

Capacidade de oxigênio armazenado: 432,6 litros (aproximadamente);

Mínimo volume interno: 2,2 litros (aproximadamente);

Massa (vazio): variável, conforme o material adotado;

Massa: 3,0 kg (informação de referência de catálogo do fabricante adotado para um cilindro em Alumínio Al 6061-T6);

Espessura total de parede: t (para simplificação de modelamento geométrico 3-D, adota-se constante e uniforme ao longo do cilindro e de diferentes valores conforme o material a ser estudado);

Calotas ou domos: um hemisférico (esférico) na região de abertura para a colocação da válvula reguladora de pressão e de fixação no conjunto SCBA, e na parte inferior um elíptico (torisférico).

Figura 51 - Cilindro de referência para os estudos de casos

3.2 Métodos

A metodologia desenvolvida para este trabalho é baseada no desenvolvimento de técnicas de projeto para um cilindro de pressão com o emprego de compósitos, manufaturado por meio do processo *filament winding*. Aborda aspectos relativos à seleção de materiais, orientação de fibras, seleção de critérios de resistência e viabilidade econômica (massa).

O método utilizado para a comparação entre os diferentes procedimentos de cálculo é constituído das seguintes etapas:

- Inicialmente é escolhido um determinado cilindro de pressão como referência, disponível em catálogo de fabricante, levando-se em conta seu volume e aplicação como cilindro para armazenamento de oxigênio, não necessariamente em compósito, sendo que neste estudo foi considerado um cilindro metálico em Alumínio. Importante notar que a maioria dos catálogos dos fabricantes não fornece informações mais detalhadas sobre espessuras de paredes e processos de fabricação. Esses dados serão estimados em função de análises baseadas inicialmente em procedimentos e posteriormente em elementos finitos. Na verificação do cilindro metálico foi utilizado o critério de resistência de von Mises;
- Para se estimar os níveis de tensões e deformações e conseqüentemente falhas dos cilindros, recorre-se às normas específicas para cada aplicação. Essa tarefa foi dificultada pela falta de acesso a normas e *codes* aplicáveis a cilindros SCBA. Para contornar tal situação recorreu-se a normas aplicáveis a reservatórios utilizados para Gás Natural Veicular (GNV) – ISO 11439 pela similaridade de aplicação;
- Uma vez dimensionado o cilindro metálico, passa-se à etapa de dimensionamento utilizando material compósito, considerando-se *lay-ups* resultantes do processo de *Filament Winding*. Inicialmente são desenvolvidos os cálculos analíticos em *netting analysis* para se ter uma estimativa inicial das espessuras e níveis de tensão e em seguida, adota-se um critério de falha para redimensionar o cilindro de forma a atender os quesitos da norma.

Nesse trabalho foram verificados os critérios de falha baseados em máxima tensão e o critério quadrático de Tsai-Wu. Nessas análises são utilizados dados de materiais retirados da literatura;

- Uma vez que o cilindro não atinja o valor estabelecido pela norma ISO 11439, inicia-se um processo iterativo manual para determinação do laminado adequado;
- Finalmente os resultados obtidos são tabelados e analisados em termos de massa total e critérios de falhas. A partir desses resultados são discutidos aspectos relacionados a fatores de projeto utilizados em cilindros de pressão e propõe-se um ciclo de projeto para seu desenvolvimento.

Maiores detalhes dos modelos gerados, vinculações e cargas consideradas são apresentadas no capítulo seguinte.

4. Estudo de Casos

4.1 Introdução

No presente trabalho, um cilindro de oxigênio comercial é adotado como objeto de estudo de dimensionamento quanto a resistência à pressão de serviço (trabalho) por meio de cálculos analíticos e validados pelo método MEF. Existem diversos fabricantes de cilindros, tais como: Luxfer Cylinders, SCI, Catalina Cylinders, Scott Health & Safety, Prime, Carleton Technologies, Mountain High E&S e outros – vide referência bibliográfica, a maioria localizados no exterior, que possuem na linha de produtos cilindros SCBA e de aviação.

As dimensões geométricas adotadas, vide sub-capítulo 3.1.2, são de um modelo SCBA de um dos catálogos dos fabricantes acima citados, e a partir dele são conduzidos os estudos. Ressalta-se que, por serem informações de catálogo, muitas dimensões e informações não estão disponíveis por questões proprietárias, e dessa forma algumas suposições serão feitas ao longo das etapas de dimensionamento.

O cilindro adotado de catálogo é em material Alumínio, e a partir de suas dimensões gerais (diâmetro externo, comprimento total, pressão de serviço) obtêm-se uma espessura de parede a ser verificada. O cilindro é então modelado geometricamente em uma aplicação CAD tridimensional a ser exportado a uma aplicação de análise por elementos finitos, utilizado então para validação dos cálculos. Esse mesmo cilindro com as dimensões externas também é utilizado como referência para a obtenção de diferentes espessuras de parede em duas

configurações diferentes em materiais compósitos: Fibra de Vidro/Epóxi e Fibra de Carbono/ Epóxi sob a mesma pressão de serviço, também analisados numericamente. Uma vez validadas as espessuras, os cilindros nas suas versões finais em cada material serão comparadas em termos de leveza (menor massa), uma vez que todos os demais parâmetros são os mesmos (dimensões externas e pressão de serviço).

4.2 Estudo de Caso: EC1 (Alumínio 6061-T6)

Dados das propriedades físicas e mecânicas consideradas:

- Composição química:
 - Alumínio (Al): 95.8 - 98.6 %
 - Cromo (Cr): 0.040 - 0.35 %
 - Cobre (Cu): 0.15 - 0.40 %
 - Ferro (Fe): ≤ 0.70 %
 - Magnésio (Mg): 0.80 - 1.20 %
 - Manganês (Mn): ≤ 0.15 %
 - Silício (Si): 0.40 - 0.80 %
 - Titânio (Ti): ≤ 0.15 %
 - Zinco (Zn): ≤ 0.25 %
 - Outros (cada): ≤ 0.050 %
 - Outros (total): ≤ 0.15 %
- Característica típica: homogêneo isotrópico e dúctil;
- Massa específica: $\rho = 2,70 \text{ g/cm}^3 = 2,70 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$;
- Módulo de elasticidade: 68,9 GPa;

- Módulo de cisalhamento: 26 GPa;
- Coeficiente de Poisson: 0,330;
- Resistência à tração: 310 MPa;
- Resistência ao escoamento: $\sigma_e = 276$ MPa;
- Resistência ao cisalhamento: 207 MPa.

(Fonte: MatWeb – <http://www.matweb.com>)

Por se tratar de material isotrópico, a espessura mínima do cilindro é obtida analiticamente através do critério de resistência de von Mises, equação 2.145, levando-se em conta as suposições da teoria de membranas (a tensão radial, $\sigma_3 = \sigma_z \approx 0$, é desprezível e a tensão circunferencial igual ao dobro da tensão longitudinal, $\sigma_1 = \sigma_y = 2 \sigma_2 = 2 \sigma_x$), têm-se:

$$\sigma_{vm} = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{1/2} = \sigma_e$$

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2}{2} \right]^{1/2} = \sigma_e$$

$$\left[\left(\sigma_1 - \frac{\sigma_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_1}{2} \right)^2 + \sigma_1^2 \right]^{1/2} = \sqrt{2} \sigma_e$$

$$\sqrt{\frac{3}{2}} \sigma_1 = \sqrt{2} \sigma_e$$

sendo σ_1 conforme a equação 2.146, obtem-se:

$$\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{p_b \cdot r_m}{t} = \sqrt{2} \sigma_e$$

para p_b aplica-se a equação 2.142, sendo $p_s = 20,7$ MPa, obtem-se

$$\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2,5 \cdot 20,7}{t} \cdot \left(\frac{111,2 - t}{2} \right) = \sqrt{2} \cdot 276$$

$$t = 8,35 \text{ mm}$$

No modelamento geométrico 3-D ao se aplicar a espessura mínima de parede obtida analiticamente, por meio de utilitário de propriedades físicas, e considerando a densidade do material, obtém-se a massa do cilindro de aproximadamente 2,80 quilogramas.

Na etapa de validação através de uma análise numérica, com o uso do Método dos Elementos Finitos, o processo de discretização é realizado com os seguintes parâmetros:

- tipo de malha: *mid-plane* (plano médio);
- refinamento de malha: fino (30%)

há uma predominância, tanto no corpo cilíndrico como nos domos, elementos tipo *plate* (placa) com dimensões de 5,20 mm x 5,60 mm, e em menor quantidade 5,00 mm x 5,00mm;

- máxima espessura dos elementos: 8,35 mm;
- variação de espessura dos elementos: 0,2 mm.

Uma vez obtido o modelo discretizado, passa-se para a etapa de análise (*Solving*), na qual são definidos os seguintes parâmetros:

- tipo de elemento: *plate* (placa);
- definição do elemento: isotrópico e deformação linear;
- material do cilindro: alumínio 6061-T6;
- tipo de análise: tensão estática em material linear;

- condições de contorno:
 - ✓ carregamento (pressão interna uniforme):
 - aplicação da pressão de serviço $p_s = 20,7$ MPa;
 - aplicação da pressão *burst*. Aplicando-se o fator 2,5 sobre a pressão de serviço p_s , conforme requisito para cilindros CNG-1 em Alumínio (norma ISO 11439), obtém-se:
$$p_b = 2,5 \times p_s = 2,5 \times 20,7 = 51,75 \text{ MPa};$$
 - ✓ vinculação da estrutura: engastamento fixo no pescoço (fixação no conjunto SCBA).

Após o processamento da etapa de *Solving*, conforme os carregamentos de pressão interna, obtêm-se os seguintes resultados gráficos:

- Pressão de serviço: $p_s = 20,7$ MPa

Nos resultados obtidos (Figuras 52 e 53), observa-se um valor máximo de 230 N/mm² (230 MPa) no centro da calota do fundo do cilindro. Esse valor está dentro de um fator de segurança de aproximadamente de 16% do valor de tensão de escoamento do material alumínio 6061-T6 (276 N/mm²), o cilindro resiste à tensão circunferencial (mais crítica) devida a pressão de serviço, ou seja, a espessura mínima calculada está validada pelo MEF.

Figura 52 - Tensões (critério de von Mises) na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão de serviço (parte interna)

Figura 53 - Tensões (critério de von Mises) na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão de serviço (parte externa)

As deformações, conforme as Figuras 54 e 55, atingem um valor máximo de 0,31%, na região do domo inferior, devido às transições de geometria encontradas ao longo desta região. Na parte cilíndrica encontram-se valores de deformação em 0,19%, ou seja, deformações muito pequenas. No cilindro todo, considera-se que os valores são satisfatórios.

Figura 54 - Deformações na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão de serviço (parte interna)

Figura 55 - Deformações na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão de serviço (parte externa)

- Pressão *burst*: $p_b = 51,75 \text{ MPa}$

Ao se aplicar a pressão *burst* de 51,75 MPa, o cilindro apresenta falhas de ruptura devido ao alto fator de segurança conforme o requisito CNG-1 (norma ISO 11439) – Figuras 56 e 57 , ou seja, na parte cilíndrica a tensão atinge 345 N/mm^2 (345 MPa), no domo inferior 518 N/mm^2 (518 MPa) na curvatura e 575 N/mm^2 (575

MPa) no centro. Após diversas iterações manuais obtêm-se uma espessura de parede de 10,00 mm, e uma massa de 3,29 kg, pelo critério de falha de Von Mises conforme nota-se nas Figuras 58 e 59. Na parte cilíndrica a tensão máxima que se alcança está em 266 N/mm^2 (266 MPa), o que corresponde a um fator de segurança de 3,6% do valor de tensão de escoamento do material alumínio 6061-T6 (276 N/mm^2). Na região de curvatura do domo inferior, a tensão atinge um valor de 354 N/mm^2 (354 MPa), e no centro do domo inferior, a tensão está com um valor máximo de 443 N/mm^2 (443 MPa), as quais excedem 76 MPa e 167 MPa em relação à tensão de escoamento, respectivamente. Vale lembrar, contudo, que esse resultado é decorrência da simplificação da modelagem geométrica do cilindro, na qual foi adotada espessura do cilindro constante ao longo do perfil dos domos. Na prática sabe-se que, em termos de manufatura, o fundo da calota é mais espesso que a parte cilíndrica. Poder-se-ia simular novamente o vaso considerando uma espessura maior dos domos, contudo como os resultados estão próximos dos desejados, consideraram-se satisfatórios, uma vez que foi garantido que a parede da parte cilíndrica resistirá às tensões circunferenciais (mais críticas) devido à pressão *burst*.

Figura 56 - Tensões (critério de von Mises) na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão *burst* (parte interna)

**Figura 57 - Tensões (critério de von Mises) na espessura analítica de 8,35 mm sob pressão
burst (parte externa)**

**Figura 58 - Tensões (critério de von Mises) na espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão
burst (parte interna)**

**Figura 59 - Tensões (critério de von Mises) na espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão
burst (parte externa)**

As deformações, conforme as Figuras 60 e 61, também atingem valores satisfatórios como no caso da aplicação da pressão de serviço para a espessura de 10 mm. Um valor máximo de 0,54%, na região do domo inferior. Na parte cilíndrica encontram-se valores de deformações em torno 0,38%. No cilindro todo, considera-se que os valores são satisfatórios.

Figura 60 - Deformações para espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão *burst* (parte interna)

Figura 61 - Deformações para espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão *burst* (parte externa)

4.3 Estudo de Caso: EC2 (Compósito unidirecional de fibra de vidro tipo E com matriz de resina epóxi)

Dados das propriedades físicas e mecânicas consideradas para o material compósito:

- Característica típica: material ortotrópico
- Fração volumétrica de fibra: $v_f = 0,55$;
- Massa específica: $\rho = 1,97 \text{ g/cm}^3 = 1,97 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$;
- Módulo de elasticidade longitudinal: $E_1 = 41 \text{ GPa}$;
- Módulo de elasticidade transversal: $E_2 = 10,4 \text{ GPa}$;
- Módulo de cisalhamento no plano: $G_{12} = 4,3 \text{ GPa}$;
- Coeficientes de Poisson: $\nu_{12} = 0,28$ e $\nu_{21} = 0,06$;
- Resistência à tração longitudinal: $F_{1t} = 1140 \text{ MPa}$;
- Resistência à tração transversal: $F_{2t} = 39 \text{ MPa}$;
- Resistência ao cisalhamento no plano: $F_6 = 89 \text{ MPa}$;
- Resistência a compressão longitudinal: $F_{1c} = 620 \text{ MPa}$;
- Resistência a compressão transversal: $F_{2c} = 128 \text{ MPa}$.

(Fonte: Daniel e Ishai, 2006)

Dados do componente “fibra de vidro E” para algumas propriedades físicas e mecânicas:

- Massa específica: $\rho = 2,54 \text{ g/cm}^3 = 2,54 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$;
- Módulo de elasticidade longitudinal: $E_{1f} = 73 \text{ GPa}$;
- Módulo de elasticidade transversal: $E_{2f} = 73 \text{ GPa}$;
- Módulo de cisalhamento longitudinal: $G_{12f} = 30 \text{ GPa}$;

- Módulo de cisalhamento transversal: $G_{23f} = 30 \text{ GPa}$;
- Resistência à tração: $F_{1ff} = 3450 \text{ MPa}$.

(Fonte: Daniel e Ishai, 2006)

No presente estudo de caso, o dimensionamento leva em conta o enrolamento helicoidal e o circunferencial de fibras no cilindro.

No enrolamento helicoidal, considerando o ângulo de enrolamento $\alpha_1 = 54,7^\circ$ (estado uniaxial de tensão), pressão de serviço $p_s = 20,7 \text{ MPa}$, pressão burst (equação 2.143) $p_b = 3,65 \times p_s = 3,65 \times 20,7$, a espessura mínima de fibras t_{1f} , conforme a equação 2.161, é:

$$t_{1f} = \frac{p_b}{\sigma_{1l}} \cdot \frac{r_m}{2 \cos^2 \alpha_1} = \frac{3,65 \times 20,7}{3450} \cdot \frac{111,2 - t_{1f}}{2} \cdot \frac{1}{2 \cos^2 54,7^\circ}$$

$$t_{1f} = t_{1f \min} = 1,792 \text{ mm}$$

portanto, a espessura mínima do laminado referente ao enrolamento helicoidal em função da fração volumétrica de fibras, conforme a equação 2.164, é:

$$t_{lam \min} = t_{1lam \min} = \frac{t_{1f \min}}{v_{1f}} = \frac{1,792}{0,55} \approx 3,26 \text{ mm}$$

No enrolamento circunferencial (fibras a aproximadamente 90 graus em relação ao eixo longitudinal do cilindro) em função de $\alpha_1 = 54,7^\circ$, pressão de serviço $p_s = 20,7 \text{ MPa}$, pressão burst (equação 2.143) $p_b = 3,65 \times p_s = 3,65 \times 20,7$, a espessura mínima de fibras t_{2f} , conforme a equação 2.162, é:

$$t_{2f} = \frac{p_b}{\sigma_{l2}} \cdot r_m \left(1 - \frac{\tan^2 \alpha_1}{2} \right) = \frac{3,65 \times 20,7}{3450} \cdot \frac{111,2 - t_{2f}}{2} \cdot \left(1 - \frac{\tan^2 54,7^\circ}{2} \right)$$

$$t_{2f} = t_{21f \min} = 0,003 \text{ mm}$$

portanto, a espessura mínima do laminado referente ao enrolamento circunferencial em função da fração volumétrica de fibras, conforme a equação 2.164, é:

$$t_{lam \min} = t_{2lam \min} = \frac{t_{2f \min}}{v_{2f}} = \frac{0,003}{0,55} \approx 0,006 \text{ mm}$$

A espessura mínima total do laminado é dimensionada considerando espessuras típicas de lâminas (camadas), então adotando $t_l = 0,125 \text{ m}$:

- enrolamento helicoidal:

$$\frac{t_{1lam \min}}{0,125} = \frac{3,26}{0,125} \approx 26 \text{ lâminas ou camadas de } 0,125 \text{ mm}$$

ou

$$t_{1 \min} = 26 \times 0,125 = 3,25 \text{ mm de laminado helicoidal}$$

- enrolamento circunferencial:

$$\frac{t_{2lam \min}}{0,125} = \frac{0,006}{0,125} = 0,048 \text{ lâmina ou camada (menor do que uma unidade de}$$

lâmina)

nesse caso adotam-se duas lâminas de $0,125 \text{ mm}$, ou seja,

$$t_{2 \min} = 2 \times 0,125 = 0,25 \text{ mm de laminado circunferencial}$$

Então:

$$t_{\min} = t_{1 \min} + t_{2 \min} = 3,25 + 0,25 = 3,50 \text{ mm de laminado}$$

totalizando 28 camadas ou lâminas de $0,125 \text{ mm}$.

A descrição do laminado, conforme a Codificação Padrão de Laminados – SLC, é expressa como segue:

Laminado anti-simétrico: $[\pm 54,7_{13}, 90_2]$ para as paredes do cilindro

sendo as camadas (27 e 28) de 90 graus as mais externas em relação ao eixo de simetria longitudinal do cilindro e as camadas (1 a 26) de $\pm 54,7$ graus as mais internas.

No modelamento geométrico 3-D ao se aplicar a espessura total mínima do laminado ($t_{\min}$), obtém-se através de utilitário de propriedades físicas a massa do cilindro: 0,85 quilogramas.

Na etapa de validação através de uma análise numérica, utilizando o MEF são utilizados os seguintes parâmetros:

- tipo de malha: *plate/shell* (placa/casca);
- refinamento de malha: fino (40%)

Há uma predominância no corpo cilíndrico de elementos tipo *plate* (placa) com dimensões de 7,40 mm x 7,40 mm, e nos domos predominância de elementos tipo *plate* com dimensões de 6,60 mm x 7,20 mm;

Uma vez obtido o modelo discretizado, passa-se para a etapa de análise (*Solving*), na qual são definidos os seguintes parâmetros:

- tipo de elemento: *thin composite* (compósito delgado);
- definição de elemento:
 - ✓ critérios de falha aplicados: “tensão máxima” e “Tsai-Wu”;
 - ✓ orientação das fibras nas camadas: inicialmente, conforme o cálculo *netting analysis*, 26 camadas de 0,125mm alternadas a $\pm 54,7$ graus e duas camadas a 90 graus;

- ✓ propriedades físicas: densidade (massa específica);
 - ✓ propriedades elásticas: módulos de elasticidade (nas direções longitudinal e transversal), coeficientes de Poisson;
 - ✓ resistências mecânicas: tração e compressão, nas direções longitudinal e transversal;
 - ✓ coeficiente de interação entre as forças normais (calculado conforme critério de Tsai-Wu): - 0,000008418.
- tipo de análise: tensão estática em material linear;
 - condições de contorno:
 - ✓ carregamento (pressão interna uniforme):
 - aplicação da pressão de serviço $p_s = 20,7$ MPa;
 - aplicação da pressão *burst*. Aplicando-se o fator 3,65 sobre a pressão de serviço p_s , conforme requisito para cilindros CNG-4 em Compósitos (norma ISO 11439), obtém-se:
$$p_b = 3,65 \times p_s = 3,65 \times 20,7 = 75,56 \text{ MPa};$$
 - ✓ vinculação da estrutura: engastamento fixo no pescoço (fixação no conjunto SCBA).

Após o processamento da etapa de *Solving*, conforme os carregamentos de pressão interna, obtêm-se os seguintes resultados gráficos:

- Pressão de serviço: $p_s = 20,7$ MPa
- ✓ Critério de falhas no plano (Tsai-Wu)

Os resultados gráficos obtidos para a 1ª. iteração, conforme os cálculos de *netting analysis* para obtenção de espessura mínima do laminado de 3,50 mm, mostram que o cilindro falha conforme o critério de Tsai-Wu, pois na parte cilíndrica

a maioria das camadas apresentam um valor em torno de 2,50 (> 1) e na parte central e curvatura do domo inferior apresentam um valor em torno de 4,00 ($>> 1$), e nas Figuras 62 e 63 apresenta-se o pior caso em uma camada na parte cilíndrica (3,949) e no domo (5,905).

Figura 62 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte interna)

Figura 63 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte externa)

✓ Critério de tensão máxima

Nesse critério, conforme as Figuras 64 e 65, pelo fato da utilização do enrolamento helicoidal de 54,7 graus, ângulo de otimização máxima, o estado de tensão é axial na direção das fibras, portanto o valor de comparação é em relação a resistência à tração longitudinal de uma lâmina. Observa-se que na parte cilíndrica

atinge-se um valor em torno de 502 N/mm^2 (502 MPa) e no domo inferior, na curvatura e topo, um intervalo de tensão entre 570 e 837 MPa, nas quais são menores que 1140 MPa (resistência à tração longitudinal), portanto o cilindro no todo resiste às tensões devido ao carregamento da pressão interna de serviço.

Figura 64 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte interna)

Figura 65 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte externa)

✓ Deformações

As deformações, conforme as Figuras 66 e 67, atingem um valor máximo de 3,3%, na região do domo inferior, devido às transições de forma encontradas nesta região. Na parte cilíndrica encontram-se valores de deformações em torno 1,3%.

Tais valores permitem considerar que os resultados são satisfatórios em termos de deformações.

Figura 66 - Deformações para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte interna)

Figura 67 - Deformações para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão de serviço (parte externa)

- Pressão *burst*: $p_b = 75,56$ MPa
- ✓ Critério de falhas no plano (Tsai-Wu)

Aplicando a pressão *burst* no cilindro com a espessura mínima de laminado calculado analiticamente, conforme esse critério o laminado apresenta falhas (Figura 68), nas quais os valores estão em torno de 12,00 ($\gg 1$) na parte cilíndrica para as diversas camadas presentes, e entre 10,00 e 24,00 nas regiões de curvatura e

central do domo inferior. Nesse caso o fator de segurança aplicado, 3,65, torna o uso dessa configuração não recomendado.

Figura 68 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão *burst* (parte interna)

Após várias iterações manuais, chega-se a uma espessura de laminado de 8,75 mm, ou seja, 70 lâminas ($[\pm 54,7_{34}, 90_2]$), um cilindro com massa aproximada de 2,13 kg, sendo que os resultados de tensão para o pior caso são apresentados na Figura 69. Nota-se que os valores dos índices de Tsai-Wu na parte cilíndrica ainda permanecem muito altos, entre 2,00 e 5,00, tornando-se totalmente inviável a continuidade por mais iterações até se obter uma configuração aceitável segundo este critério.

Figura 69 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 8,75 mm sob pressão *burst* (parte interna)

✓ Critério de tensão máxima

De mesma forma, aplicando a pressão *burst* para essa configuração de 3,50 mm, as tensões obtidas por esse critério também estão além da resistência à tração longitudinal de uma lâmina (1140 MPa), para a qual pode-se observar na Figura 70 o pior caso. Ao se efetuar algumas iterações, obtêm-se um laminado satisfatório à esse critério com uma espessura de 6,50 mm e massa de 1,63 kg, conforme Figura 71, em que todas as camadas na parte cilíndrica as tensões estão menor que a resistência à tração de uma lâmina (1140 MPa), e em algumas poucas camadas na parte central do domo inferior atingem um valor de 1400 MPa, mas isso em realidade se deve ao fato de que na modelagem geométrica 3-D do cilindro por questões de simplificação, a espessura ao longo do perfil foi considerado uniforme, como já havia sido feito no EC1. Da mesma forma, na manufatura do cilindro em compósito pelo processo de *filament winding* haverá um preenchimento maior de fibras nas regiões dos domos, principalmente na região central, que se tornará bastante espessa. Nessa iteração, o importante a ser considerado é o fato de que as paredes na parte cilíndrica suportam as tensões decorrentes à pressão *burst* em todas as camadas.

Figura 70 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão *burst* (parte interna)

Figura 71 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura iterativa de 6,50 mm sob pressão *burst* (parte interna)

✓ Deformações

As deformações, conforme as Figuras 72 e 73, atingem um valor máximo de 12%, na região do domo inferior, devido às transições de forma encontradas ao longo do perfil, enquanto que na parte cilíndrica encontram-se valores de deformações em torno de 4 %. No cilindro todo, considera-se que os valores não são satisfatórios.

Figura 72 - Deformações para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão *burst* (parte interna)

Figura 73 - Deformações para espessura analítica de 3,50 mm sob pressão *burst* (parte externa)

As deformações para a espessura iterativa de 8,75 mm não são apresentadas, apesar da massa de 2,13 kg, o resultado dessa versão torna inviável a sua confecção conforme o critério de Tsai-Wu.

4.4 Estudo de Caso: EC3 (Compósito unidirecional de fibra de carbono AS4 com matriz de resina epóxi)

Dados de algumas propriedades físicas e mecânicas consideradas para o material compósito:

- Característica típica: material ortotrópico
- Fração (volume) de fibra: $v_f = 0,63$;
- Massa específica: $\rho = 1,60 \text{ g/cm}^3 = 1,60 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$;
- Módulo de elasticidade longitudinal: $E_1 = 147 \text{ GPa}$;
- Módulo de elasticidade transversal: $E_2 = 10,3 \text{ GPa}$;
- Módulo de cisalhamento no plano: $G_{12} = 7,0 \text{ GPa}$;
- Coeficientes de Poisson: $\nu_{12} = 0,27$ e $\nu_{21} = 0,02$;
- Resistência a tração longitudinal: $F_{1t} = 2280 \text{ MPa}$;

- Resistência a tração transversal: $F_{2t} = 57 \text{ MPa}$;
- Resistência ao cisalhamento no plano: $F_6 = 76 \text{ MPa}$;
- Resistência a compressão longitudinal: $F_{1c} = 1725 \text{ MPa}$;
- Resistência a compressão transversal: $F_{2c} = 228 \text{ MPa}$.

(Fonte: Daniel e Ishai, 2006)

Dados do componente “fibra de carbono AS4” para algumas propriedades físicas e mecânicas:

- Massa específica: $\rho = 1,81 \text{ g/cm}^3 = 1,81 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$;
- Módulo de elasticidade longitudinal: $E_{1f} = 235 \text{ GPa}$;
- Módulo de elasticidade transversal: $E_{2f} = 15 \text{ GPa}$;
- Módulo de cisalhamento longitudinal: $G_{12f} = 27 \text{ GPa}$;
- Módulo de cisalhamento transversal: $G_{23f} = 7 \text{ GPa}$;
- Resistência à tração: $F_{1tf} = 3700 \text{ MPa}$.

(Fonte: Daniel e Ishai, 2006)

Nesse estudo de caso, semelhante ao estudo de caso EC2 quanto à obtenção de espessuras, ou seja, o dimensionamento também leva em conta o enrolamento helicoidal e o circunferencial de fibras no cilindro.

No enrolamento helicoidal, considerando o ângulo de enrolamento $\alpha_1 = 54,7^\circ$ (estado uniaxial de tensão), pressão de serviço $p_s = 20,7 \text{ MPa}$, pressão *burst* (equação 2.144) $p_b = 2,35 \times p_s = 2,35 \times 20,7$, a espessura mínima de fibras t_{1f} , conforme a equação 2.161, é:

$$t_{1f} = \frac{p_b}{\sigma_{l1}} \cdot \frac{r_m}{2 \cos^2 \alpha_1} = \frac{2,35 \times 20,7}{3700} \cdot \frac{111,2 - t_{1f}}{2} \cdot \frac{1}{2 \cos^2 54,7^\circ}$$

$$t_{1f} = t_{1f \min} = 1,083 \text{ mm}$$

portanto, a espessura mínima do laminado referente ao enrolamento helicoidal em função da fração volumétrica de fibras, conforme a equação 2.164, é:

$$t_{lam \min} = t_{1lam \min} = \frac{t_{1f \min}}{v_{1f}} = \frac{1,083}{0,63} \approx 1,72 \text{ mm}$$

No enrolamento circunferencial (fibras a aproximadamente 90 graus em relação ao eixo longitudinal do cilindro) em função de $\alpha_1 = 54,7^\circ$, pressão *burst* (equação 2.144) $p_b = 2,35 \times p_s = 2,35 \times 20,7$, a espessura mínima de fibras t_{2f} , conforme a equação 2.162, é:

$$t_{2f} = \frac{p_b}{\sigma_{l2}} \cdot r_m \left(1 - \frac{\tan^2 \alpha_1}{2} \right) = \frac{2,35 \times 20,7}{3700} \cdot \frac{111,2 - t_{2f}}{2} \cdot \left(1 - \frac{\tan^2 54,7^\circ}{2} \right)$$

$$t_{2f} = t_{21f \min} = 0,002 \text{ mm}$$

portanto, a espessura mínima do laminado referente ao enrolamento circunferencial em função da fração volumétrica de fibras, conforme a equação 2.161, é:

$$t_{lam \min} = t_{2lam \min} = \frac{t_{2f \min}}{v_{2f}} = \frac{0,002}{0,63} \approx 0,0031 \text{ mm}$$

A espessura mínima total do laminado é dimensionado considerando-se espessuras típicas de lâminas (camadas), então adotando-se $t_l = 0,125 \text{ m}$:

- enrolamento helicoidal:

$$\frac{t_{1lam \min}}{0,125} = \frac{1,72}{0,125} \approx 14 \text{ lâminas ou camadas de } 0,125 \text{ mm}$$

ou

$$t_{1\min} = 14 \times 0,125 = 1,75 \text{ mm de laminado helicoidal}$$

- enrolamento circunferencial:

$$\frac{t_{2\text{lam min}}}{0,125} = \frac{0,0031}{0,125} = 0,025 \text{ lâmina ou camada (menor do que uma unidade de}$$

lâmina)

nesse caso adotam-se duas lâminas de $0,125 \text{ mm}$, ou seja,

$$t_{2\min} = 2 \times 0,125 = 0,25 \text{ mm de laminado circunferencial}$$

Então:

$$t_{\min} = t_{1\min} + t_{2\min} = 1,75 + 0,25 = 2,00 \text{ mm de laminado}$$

totalizando 16 camadas ou lâminas de $0,125 \text{ mm}$.

A descrição do laminado, conforme a Codificação Padrão de Laminados – SLC, é expressa como segue:

Laminado anti-simétrico: $[\pm 54,7_7, 90_2]$ para as paredes do cilindro

sendo as camadas (15 e 16) de 90 graus as mais externas em relação ao eixo de simetria longitudinal do cilindro e as camadas (1 a 14) de $\pm 54,7$ graus as mais internas.

No modelamento geométrico 3-D ao se aplicar a espessura total mínima do laminado ($t_{\min}$), obtém-se através de utilitário de propriedades físicas a massa do cilindro: 0,43 quilogramas.

Na etapa de validação através de uma análise numérica por elementos finitos (MEF), foram utilizados os seguintes parâmetros:

- tipo de malha: plate/shell (placa/casca);

- refinamento de malha: fino (40%)

Há uma predominância no corpo cilíndrico de elementos tipo *plate* (placa) com dimensões de 7,40 mm x 7,40 mm, e nos domos predominância de elementos tipo *plate* com dimensões de 6,60 mm x 7,20 mm;

Uma vez obtido o modelo discretizado, passa-se para a etapa de análise (*Solving*), na qual são definidos os seguintes parâmetros:

- tipo de elemento: *thin composite* (compósito delgado);
- definição de elemento:
 - ✓ critérios de falha aplicados: “tensão máxima” e “Tsai-Wu”;
 - ✓ orientação das fibras nas camadas: inicialmente, conforme o cálculo *netting analysis*, 16 camadas de 0,125mm alternadas a $\pm 54,7$ graus e duas camadas a 90 graus;
 - ✓ propriedades físicas: densidade (massa específica);
 - ✓ propriedades elásticas: módulos de elasticidade (nas direções longitudinal e transversal), coeficientes de Poisson;
 - ✓ resistências mecânicas: tração e compressão, nas direções longitudinal e transversal;
 - ✓ coeficiente de interação entre as forças normais (calculado conforme critério de Tsai-Wu): - 0,000002212.
- tipo de análise: tensão estática em material linear;
- condições de contorno:
 - ✓ carregamento (pressão interna uniforme):
 - aplicação da pressão de serviço $p_s = 20,7$ MPa;

- aplicação da pressão *burst*. Aplicando-se o fator 2,35 sobre a pressão de serviço p_s , conforme requisito para cilindros CNG-4 em Compósitos (norma ISO 11439), obtém-se:

$$p_b = 2,35 \times p_s = 2,35 \times 20,7 = 48,65 \text{ MPa};$$

- ✓ vinculação da estrutura: engastamento fixo no pescoço (fixação no conjunto SCBA).

Após o processamento da etapa de *Solving*, conforme os carregamentos de pressão interna, obtêm-se os seguintes resultados gráficos:

- Pressão de serviço: $p_s = 20,7 \text{ MPa}$
- ✓ Critério de falhas no plano (Tsai-Wu)

Os resultados gráficos obtidos para a 1ª. iteração, conforme os cálculos de *netting analysis* para obtenção de espessura mínima do laminado de 2,00 mm, mostram que o cilindro falha conforme o critério de Tsai-Wu, pois na parte cilíndrica a maioria das camadas apresentam um valor em torno de 2,60 (> 1) e na parte central e curvatura do domo inferior apresentam um valor em torno de 5,00 ($>> 1$), e nas Figuras 74 e 75 apresenta-se o pior caso em uma camada na parte cilíndrica (3,816) e no domo (6,350). Portanto, por esse critério a espessura de laminado inicial, calculado analiticamente, não pode ser aplicado por riscos altos de falha.

Figura 74 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte interna)

Figura 75 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte externa)

✓ Critério de tensão máxima

Nesse critério, conforme as Figuras 76 e 77, pelo fato da utilização do enrolamento helicoidal de 54,7 graus, ângulo de otimização máxima, o estado de tensão é axial na direção das fibras, portanto o valor de comparação é em relação a resistência à tração longitudinal de uma lâmina. Observa-se que na parte cilíndrica atinge-se um valor em torno de 1227 N/mm^2 (1227 MPa), que é menor que o valor de resistência a tração declarado de uma lâmina individual (2280 MPa). E no domo inferior, no pior caso uma tensão de 2454 MPa apresenta-se apenas em alguns pontos localizados de algumas lâminas, mas a maioria das lâminas apresentam um valor inferior a 2280 MPa, na realidade como descrito em situação semelhante ao EC2, na qual se deve ao fato da espessura ter sido considerado constante ao longo do perfil, que por sua vez na manufatura há um espessamento nas superfícies do domo. Portanto o cilindro, conforme esse critério, no todo resiste às tensões devido ao carregamento da pressão interna de serviço.

Figura 76 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte interna)

Figura 77 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte externa)

✓ Deformações

As deformações, conforme as Figuras 78 e 79, atingem um valor máximo de 3,3%, na região do domo inferior, devido às transições de forma encontradas ao longo dela. Enquanto que na parte cilíndrica encontram-se valores de deformações em torno de 1,3%, ou seja, deformações grandes se considerarmos que o mínimo aceitável seja de 1%. No cilindro todo, considera-se que os valores não são satisfatórios.

Figura 78- Deformações para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte interna)

Figura 79- Deformações para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão de serviço (parte externa)

- Pressão *burst*: $p_b = 48,65 \text{ MPa}$
- ✓ Critério de falhas no plano (Tsai-Wu)

Aplicando a pressão *burst* no cilindro com a espessura mínima de laminado calculado analiticamente, conforme esse critério o laminado apresenta falhas (Figura 80), nas quais os valores estão em torno de 7,50 ($\gg 1$) na parte cilíndrica para as diversas camadas presentes, e entre 10,00 e 15,00 ($\gg 1$) nas regiões de curvatura e central do domo inferior. Nesse caso o fator de segurança aplicado, 2,35, torna o uso dessa configuração não recomendado.

Figura 80 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão *burst* (parte interna)

Após diversas iterações manuais, chega-se a uma espessura de laminado de 10,00 mm, ou seja, 80 lâminas ($[\pm 54,7_{39}, 90_2]$), com um cilindro de massa aproximada de 1,95 kg, e os resultados de tensão para o pior caso são apresentados na Figura 81. Nota-se que os valores na parte cilíndrica estão entre 0,80 e 1,00, o que torna essa configuração aceitável conforme o critério de Tsai-Wu. Apesar de no domo inferior os valores estarem entre 1,00 e 1,625 (pior caso), pode também se considerar aceitável, uma vez que pelas mesmas razões de manufatura, essa região terá um espessamento devido a condição de que todas fibras do enrolamento passarão na mudança de rota do enrolamento.

Figura 81 - Tensões (critério de Tsai-Wu) para espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão *burst* (parte interna)

✓ Critério de tensão máxima

De mesma forma, aplicando a pressão *burst* para a de configuração de 2,00 mm, as tensões obtidas por esse critério também estão além da resistência à tração longitudinal de uma lâmina (1140 MPa), na qual pode-se observar na Figura 82 o pior caso. Ao efetuar algumas iterações, obtêm-se um laminado satisfatório à esse critério com uma espessura de 2,75 mm e massa de 0,58 kg, conforme Figura 83, em que todas as camadas na parte cilíndrica as tensões estão menor que a resistência à tração de uma lâmina (2280 MPa), e em algumas poucas camadas na parte central do domo inferior atingem um valor de 3749 MPa, mas isso em realidade se deve ao fato de que no modelamento geométrico 3-D do cilindro por questões de simplificação, a espessura ao longo do perfil foi considerado uniforme. Na manufatura, pelo processo de *filament winding* haverá um preenchimento maior de fibras passando por tais regiões, principalmente na região central, na qual se tornará bastante espessa. Nessa iteração, o importante a ser considerado é o fato de que as paredes na parte cilíndrica suportam as tensões decorrentes à pressão *burst* em todas as camadas. Entretanto, se formos considerar o critério de Tsai-Wu, essa espessura apresentará falhas, pois está muito próxima da espessa mínima de laminado obtido analiticamente.

Figura 82 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura analítica de 2,00 mm sob pressão *burst* (parte interna)

Figura 83 - Tensões (critério de tensão máxima) para espessura iterativa de 2,75 mm sob pressão *burst* (parte interna)

✓ Deformações

Para a espessura iterativa de 10,00 mm, para conformidade com o critério de Tsai-Wu, Figuras 84 e 85, as deformações atingem um valor máximo em torno de 0,87%, na região do domo inferior, devido às transições de forma encontradas ao longo dela. Enquanto que na parte cilíndrica encontram-se valores de deformações em torno de 0,43%, ou seja, deformações pequenas se considerarmos que o mínimo aceitável seja de 1%. No cilindro todo, considera-se que os valores são satisfatórios.

Figura 84 - Deformações para espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão *burst* (parte interna)

Figura 85 - Deformações para espessura iterativa de 10,00 mm sob pressão *burst* (parte externa)

Para a espessura de 2,75 mm, que atende ao critério de máxima tensão, Figuras 86, as deformações atingem um valor máximo de 5,5 %, na região do domo inferior, devido às transições de forma encontradas ao longo dela. Enquanto que na parte cilíndrica encontram-se valores de deformações em torno de 2,0 %, ou seja, deformações grandes se considerarmos que o mínimo aceitável seja de 1%. No cilindro todo, considera-se que os valores são não satisfatórios.

Figura 86 - Deformações para espessura iterativa de 2,75 mm sob pressão *burst* (parte interna)

4.5 Comparação de Resultados

Tabela 2 - Compilação das principais iterações entre os vários tipos de cilindros

Cilindro	Espessura (mm)	Massa (kg)	Pressão Aplicada (MPa)	Critério de Falha	Tensão Máxima (cilindro) (MPa)	Tensão Máxima (domos) (MPa)	Falha no Plano (cilindro) (Tsai-Wu)	Falha no Plano (domos) (Tsai-Wu)	Resultado
EC1									
Alumínio 6061-T6	8,35	2,80	20,70	von Mises	138	230	-	-	satisfatório
	8,35	2,80	51,75	von Mises	345	575	-	-	falha
	10,00	3,29	51,75	von Mises	266	443	-	-	satisfatório
EC2									
Compósito Fibra de Vidro tipo E / Epóxi	3,50	0,85	20,70	Tsai-Wu	-	-	2,50	4,00	falha
	3,50	0,85	20,70	Tensão Máxima	502	837	-	-	falha
	3,50	0,85	75,56	Tsai-Wu	-	-	12,00	24,00	falha
	3,50	0,85	75,56	Tensão Máxima	1835	3058	-	-	falha
	6,50	1,63	75,56	Tensão Máxima	1087	1359	-	-	satisfatório
	8,75	2,13	75,66	Tsai-Wu	-	-	5,10	8,50	falha
EC3									
Compósito Fibra de Carbono AS4 / Epóxi	2,00	0,43	20,70	Tsai-Wu	-	-	2,60	5,00	falha
	2,00	0,43	20,70	Tensão Máxima	1227	2454	-	-	satisfatório
	2,00	0,43	48,65	Tsai-Wu	-	-	7,50	15,00	falha
	2,75	0,58	48,65	Tensão Máxima	2249	3749	-	-	satisfatório
	10,00	1,95	48,65	Tsai-Wu	-	-	1,00	1,625	satisfatório

Nota: pressão aplicada de 20,7 MPa corresponde à pressão de serviço, e as demais à pressão *burst*

4.6 Discussões

As discussões a seguir se baseiam nos estudos de casos EC1, EC2 e EC3 e na compilação dos resultados na Tabela 2.

Em primeira instância, o presente trabalho conseguiu reproduzir e validar, através de uma modelagem geométrica 3-D e iterações de análise numérica, um cilindro totalmente em metal (Alumínio 6061-T6) conforme informações de catálogo de um fabricante de cilindros SCBA. Como sabido tais informações são as mais básicas conforme o sub-capítulo 3.1.2, em que algumas suposições (espessura uniforme ao longo do perfil e formato dos domos) foram assumidas para se chegar a um resultado. A aceitação de um cilindro com espessura de parede 10,00 mm resistindo a pressão *burst* (requisito da CNG-1, norma ISO 11439), dimensionamento através de cálculo analítico pelo uso do critério de escoamento de von Mises para materiais isotrópicos e dúcteis, se faz pela massa obtida de um cilindro de 3,29 kg que está bem próximo de 3,0 kg de catálogo, além de que esse cilindro terá uma massa um pouco maior devido a consideração, já mencionada nos resultados das simulações, de que nos domos haverá um espessamento da espessura na região central ou topo (processo de fabricação) para que possa suportar as tensões circunferenciais (mais críticas). Portanto, o cilindro é aceitável e atende para fins preliminares de projeto estrutural a ser usado como referência para estudos de viabilidade de cilindros totalmente em compósitos.

Os cilindros em compósitos apresentados no trabalho não estão disponíveis em catálogos dos fabricantes. São encontrados cilindros em compósitos com diferentes carregamentos de pressão interna, volumes (vazio) e características de construção (*liner* em alumínio com enrolamento total ou parcial de fibras). Para

tanto, em termos de estudos comparativos, todos os cilindros estudados foram dimensionados considerando uma única geometria externa e carregamento de pressão interna, conforme o sub-capítulo 3.1.2, portanto tais cilindros são somente para estudos preliminares de viabilidade estrutural conforme já dito anteriormente.

Os cilindros em compósitos “fibra de vidro tipo E com matriz epóxi”, pela característica do fator de segurança (requisito da CNG-4, norma ISO 11439) aplicado ser bastante alto – 3,65 – se comparado com o do compósito “fibra de carbono AS4 com matriz epóxi” – 2,35 – no critério de falha de Tsai-Wu apresenta falhas, o que invalida o seu uso. Entretanto, um ponto a ser discutido seria a validade de aplicação desse critério, pois no dimensionamento usou-se o ângulo de 54,7 graus (resultado de *netting analysis*), em que todo o carregamento é resistido pela fibras na direção principal 1 da lâmina e nenhum carregamento na direção transversal das fibras, 2, em cada lâmina. O critério de Tsai-Wu leva em consideração a interação entre as duas tensões normais na lâmina, ou seja, ajustar-se-ia melhor os dados experimentais, que no presente momento não estão disponíveis uma vez que foram utilizados dados da literatura. O cálculo analítico é válido, baseado em *netting analysis*, contudo o resultado numérico obtido considerando o critério de Tsai-Wu, mostrou-se inadequado devido à dependência de comprovação experimental para a determinação dos coeficientes usados na expressão de cálculo do critério. Por outro lado, o critério de tensão máxima que no caso considera o parâmetro de resistência à tração longitudinal de uma lâmina, F_{1t} , tensões na direção da fibra apenas, é aceitável na configuração de um laminado de espessura 6,50 mm e massa de 1,63 kg, metade da massa do cilindro em Alumínio. Nesse caso o fator predominante para a opção por um ou por outro é o do custo de

fabricação (materiais constituintes do cilindro, ferramental, volume de produção, montagem, mão-de-obra etc), e também se viável em termos de vida útil e inspeção.

As mesmas considerações anteriores podem ser colocadas para o cilindro em compósito “fibra de carbono AS4 com matriz epóxi”, mas ao se considerar o melhor caso de iteração para o critério de falha de Tsai-Wu, um cilindro com espessura de laminado de 10,00 mm e de massa 1,95 kg, 60% da massa do cilindro de Alumínio, torna-se interessante a sua aplicação. Da mesma forma, ao se olhar para o critério de tensão máxima, uma configuração aceitável e válida numericamente é o do laminado com espessura de 2,75 mm e de massa 0,58 kg, o que o torna também bastante atraente se comparados com o de Alumínio e de fibra de vidro, aproximadamente 8,5% da massa do cilindro em Alumínio.

5. Conclusões e Sugestões

A partir dos resultados apresentados, pode-se dizer que os materiais compósitos podem ser aplicados com sucesso em vasos de pressão para armazenamento de oxigênio sob alta pressão, desde que sejam tratados adequadamente diversos parâmetros que são necessários ao projeto estrutural do vaso, conforme segue:

- critério de falha mais adequado à aplicação do componente;
- determinação de dados experimentais necessários à aplicação do critério utilizado;
- normas e códigos utilizados no projeto;
- dados da geometria final do vaso, que dependem do processo utilizado na sua fabricação (região dos domos).

Dessa forma, é proposto o ciclo de projeto em compósitos, Figura 87, proposto por Carvalho (1996), no qual são executadas ao longo do desenvolvimento do produto, atividades de projeto estrutural e fabricação do componente, criando-se assim um ambiente integrado de projeto-fabricação em compósito.

Figura 87 – Ciclo de projeto com materiais compósitos

(Fonte: Carvalho, 1996)

Importante observar neste ciclo, alguns pontos notáveis:

- Projeto preliminar/Reprojeto: ciclo integrado que considera seleção de materiais, processo de fabricação e geometria, como fatores fundamentais

para a determinação das propriedades do material que será “gerado”, isto é, ao contrário do material isotrópico que apresenta propriedades definidas, o material compósito possibilita ao projetista “projetar” as propriedades desejadas em função dos requisitos estruturais.

- Validação experimental: fundamental quando se trabalha em compósitos e deve prever a validação do material e processo (que “geram” as propriedades finais do material) bem como as propriedades relacionadas ao comportamento da estrutura.

O objetivo deste trabalho foi apresentar um estudo amplo sobre projeto estrutural de vasos de pressão, aplicado inicialmente a materiais isotrópicos e posteriormente estendido a materiais compósitos, visando contribuir para a otimização estrutural de cilindros de alta pressão em compósitos. Este estudo foi conduzido em duas abordagens: uma primeira baseada em procedimentos de cálculo analítico e posteriormente em procedimentos baseados no método dos Elementos Finitos.

Como resultados significativos deste trabalho podem-se citar:

- Disponibilização de material bibliográfico específico que trata do projeto e dimensionamento de cilindros de pressão, normas e códigos, teoria de tensões de membranas, análise de tensões e falhas em compósitos aplicados à vasos de pressão e análise numérica;
- Estabelecimento de um procedimento de cálculo, baseado em método analítico e numérico para o cálculo de cilindros de pressão em compósitos;

- Aplicação de critérios de falha em compósitos nas análises e discussão de sua aplicabilidade, baseada em estudos de caso desenvolvidos em cilindro de pressão comercial;
- Análise crítica dos procedimentos utilizados no tocante à aplicação de conceitos baseados em *netting analysis* e aplicação de teoria Clássica dos Laminados;
- Proposição de um procedimento analítico-numérico-experimental, ilustrado por meio de ciclo de projeto, para desenvolvimento e otimização de vasos de pressão em compósitos.

Como continuidade deste trabalho, em função de discussões levantadas no seu decorrer, sugere-se:

- Estudo e desenvolvimento de critérios de falha adequados à aplicação em vasos de pressão em compósitos;
- Construção e validação experimental dos cilindros em compósitos, através do processo de *Filament Winding*;
- Otimização geométrica dos vasos de pressão, visando aplicá-los em armazenamento de GNV;
- Estudo do processo de *Filament Winding* para a construção dos cilindros citados no item anterior, que envolveriam certamente o uso de trajetórias não-geodésicas;
- Desenvolvimento de ferramentas de integração entre os dados de material (ângulos do laminado e seqüências) gerado no processo de *Filament*

Winding e dados de entrada para análise numérica pelo método dos elementos finitos.

6. Referências Bibliográficas

ADAMS, V.C.; ASKENAZI, A. (1999). **Building better products with finite element analysis**. 1ed. Santa Fe: OnWord Press.

ASHBY, M.F.; JONES, D.R.H. (2005). **Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design**. 3ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann.

BARBERO, E.J. (1999). **Introduction to composite materials design**. New York: Taylor & Francis Group.

BEDNAR, H.H. (1986). **Pressure vessel design handbook**. 2ed. Malabar: Krieger Publishing Company.

CALLISTER, W.D. (2001). **Fundamentals of materials science and engineering: an interactive e.text**. 5ed. New York: John Willey & Sons, Inc.

CARVALHO, J (1996). **Computer integrated design optimization and manufacturing of filament wound parts**. 198p. Tese (doutorado) – Faculty of Applied Sciences, Division PMA, K.U. Leuven, Bélgica, 1996.

CHUNG, D.D.L. (1994). **Carbon fiber composites**. Newton: Elsevier Butterworth-Heinemann.

DANIEL, I.M.; ISHAI, O. (2006). **Engineering mechanics of composite materials**. 2ed. New York: Oxford University Press.

GAY, D.; HOA, S.V.; TSAI, S.W. (2003). **Composite materials: design and applications**. 1ed. Boca Raton: CRC Press.

GERE, J.M.; TIMOSHENKO, S.P. (1997). **Mechanics of materials**. 4ed. Boston: PWS Publishing Company.

-
- HIBBELER, R.C. (2000). **Mechanics of materials**. 4ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- HULL, D. (1981). **An introduction to composite materials**. Cambridge: Cambridge University Press.
- HYER, M.W. (1998). **Stress analysis of fiber-reinforced composite materials**. Singapore: WCB/McGraw Hill.
- JONES, R.M. (1999). **Mechanics of composite materials**. 2ed. Philadelphia: Taylor & Francis.
- KOUSSIOS, S.; BERGSMA, O.K.; BEUKERS, A. (2004). Filament winding. Part 1: determination of the wound body related parameters. **Composites Part A: Applied science and manufacturing**, Amsterdam, v.35, n.2 , p.181-195, fev. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/compositesa>>. Acesso em: 16 Set. 2005.
- KOUSSIOS, S.; BERGSMA, O.K.; BEUKERS, A. (2004). Filament winding. Part 2: generic kinematics model and its solutions. **Composites Part A: Applied science and manufacturing**, Amsterdam, v.35, n.2, p.197-212, fev. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/compositesa>>. Acesso em: 09 Nov. 2005.
- KOUSSIOS, S. (2004). **Filament winding: a unified approach**. 400p. Tese (doutorado) – Technische Universiteit Delt, The Netherlands, 2004.
- LIRANI, J. (2001). **Introdução ao método dos elementos finitos**. Notas de Aulas Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MATTHEWS, C. (2001). **Engineers' guide to pressure equipment**. 1ed. London: Professional Engineering Publishing Limited.
- MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. (1994). **Composite materials: engineering and science**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

MOSS, D.R. (2004). **Pressure vessel design manual: illustrated procedures for solving major pressure vessel design problems.** 3ed. Amsterdam: Elsevier Gulf Professional Publishing.

ROARK, R.J. (1965). **Formulas for stress and strain.** 4ed. New York: McGraw Hill.

NORTON, R.L. (2006). **Machine design: an integrated approach.** 3ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.

SANJAY, K.M. (2002). **Composites manufacturing: materials, product and process engineering.** Boca Raton: CRC Press.

SCHOLLIERS, J. (1992). **Robotic filament winding of symmetric composite parts.** 284p. Tese (doutorado) – Faculty of Applied Sciences, Division PMA, K.U. Leuven, Bélgica.

SCHWARTZ, M.M. (2002). **Encyclopedia of materials, parts, and finishes.** 2ed. Boca Raton: CRC Press.

SHEN, F.C. (1995). A filament-wound structure technology overview. **Materials Chemistry and Physics**, Amsterdam , v.42, n.2 , p.96-100, fev. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/02540584>>. Acesso em: 10 Jul. 2008.

TIMOSHENKO, S.P.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. (1959). **Theory of plates and shells.** 2ed. New York: McGraw-Hill.

TIMOSHENKO, S.P.; GOODIER, J.N. (1951). **Theory of elasticity.** 2ed. New York: McGraw-Hill.

TITA, V. (2004). **Projeto e fabricação de estruturas em material compósito polimérico**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

TONG, L.; MOURITZ, A.P.; BANNISTER, M.K. (2002). **3D fibre reinforced polymer composites**. 1ed. Amsterdam: Elsevier Science.

TSAL, S.W. (1992). **Theory of composites design**. [S.l.]: Think Composites.

VASILIEV, V.V.; MOROZOV, E. (2001). **Mechanics and analysis of composite materials**. 1ed. Amsterdam: Elsevier.

Yijun, L. (1995). **Introduction to finite element method**. Lecture Notes – University of Cincinnati - USA.

COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK: Vol1. polymer matrix composites - guidelines for characterization of structural materials (1997). MIL-HDBK-17-1F Volume 1 of 5. USA: Department of Defense.

COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK: Vol2. polymer matrix composites – material properties (1997). MIL-HDBK-17-2F Volume 2 of 5. USA: Department of Defense.

COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK: Vol3. polymer matrix composites – materials usage, design and analysis (1997). MIL-HDBK-17-3F Volume 3 of 5. USA: Department of Defense.

HANDBOOK of composites (1998). London: Chapman & Hall.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2000). ISO 11439: Gas cylinders – High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles. Suíça, Genebra.

Home pages de sites consultados:

Carleton Composites Pressure Vessels. Disponível em: <
<http://resources.carltech.com/PTD>>. Acesso em: 30/06/2008.

Catalina Cylinders: SCUBA Cylinder Specifications. Disponível em: <
<http://www.catalinacylinders.com/index.html>>. Acesso em: 25/07/2008.

Luxfer Gas Cylinders: SCBA / Life Suport. Disponível em:
<<http://www.luxfercylinders.com/products/lifesupport>>. Acesso em: 28/07/2008.

Mountain High E&S Co: Aviation Oxygen Systems. Disponível em: <
<http://www.mhoxygen.com>>. Acesso em: 30/06/2008.

Prime Import and Export Limited Company. Disponível em: < <http://www.sino-prime.com/sino-prime.htm>>. Acesso em: 30/07/2008.

PVEng: Pressure Vessel Engineering. Disponível em: < <http://www.pveng.com>>. Acesso em: 23/10/2007.

Scott Health & Safety – Americas: Supplied Air. Disponível em: <
<http://www.scotthealthsafety.com/Americas/en/Products/SuppliedAir/SuppliedAir.asp>
>. Acesso em: 01/08/2008.

SCI – Structural Composites Industries: SCBA. Disponível em: <
<http://www.scicomposites.com/default.aspx?pageid=62>>. Acesso em: 23/07/2008.

7. Glossário

BS EN: O BSI como membro da CEN e CENELEC é obrigada a adotar todas as normas européias e retirar qualquer norma BS que pudesse conflitar com elas. Elas são publicadas no Reino Unido como BS EN (<http://www.bsigroup.com/en/Standards-and-Publications/About-standards/Product-definitions>).

BS PD: É uma categoria para documentos tipo norma e que não possuem o privilégio de uma BS. Algumas PDs são adoções de publicações CEN, CENELEC, ISO ou IEC que não são normas (ex. Relatórios Técnicos). Outras são derivadas de normas BS que conflitam com normas ENs, mas que ainda são necessários para uso industrial (<http://www.bsigroup.com/en/Standards-and-Publications/About-standards/Product-definitions>).

Cascas: estruturas com formas similares a chapas curvadas, fechadas ou abertas (Bednar. 1986).

Code: Uma norma torna-se um Código (*Code*) ao ser adotado por um ou mais órgãos governamentais e é seguido por força de lei, ou na situação em que é incorporado a um contrato de negócios (http://en.wikipedia.org/wiki/American_Society_of_Mechanical_Engineers#The_ASM_E_Boiler_and_Pressure_Vessel_Code_.28BPVC.29).

Ciclo de vida de um produto: sequência de etapas que um produto segue ao longo de sua existência – desde a sua criação até o final de produção e comercialização (http://en.wikipedia.org/wiki/Product_life_cycle_management).

Enrolamento filamentar circunferencial: também conhecido como hoop winding. Basicamente é o caso em que o ângulo de enrolamento da fibra é próximo a noventa graus, ou seja, a deposição da fibra está quase perpendicular ao eixo longitudinal de enrolamento do mandril.

Enrolamento filamentar helicoidal: também conhecido como helical winding. Basicamente é o caso em que o ângulo de enrolamento da fibra está entre zero e noventa graus, ou seja, a deposição da fibra está a um ângulo de $\pm \alpha$ graus em relação ao eixo longitudinal de enrolamento do mandril.

Enrolamento filamentar circunferencial: também conhecido como hoop winding. Basicamente é o caso em que o ângulo de enrolamento da fibra é próximo a noventa graus, ou seja, a deposição da fibra está quase perpendicular ao eixo longitudinal de enrolamento do mandril.

Enrolamento filamentar polar: também conhecido como polar winding. Basicamente é o caso em que o ângulo de enrolamento da fibra está próximo de zero graus em relação ao eixo longitudinal de enrolamento do mandril.

Filament winding: enrolamento filamentar.

Hipoxia: diminuição das taxas de oxigênio no ar, no sangue arterial ou nos tecidos (Dicionário Eletrônico Houaiss da Língua Portuguesa – v1.0 / Dezembro de 2001).

Hoop: arco, argola, anel.

Liner: forro, revestimento, envoltório interno, selante, impermeabilizante que protege ou isola.

Preditivo: que prediz; que afirma antecipadamente, antes de observação ou comprovação efetiva (Dicionário Eletrônico Houaiss da Língua Portuguesa – v1.0 / Dezembro de 2001).

Plano médio ou de referência: é o plano eqüidistante entre as superfícies superior e a inferior, no caso para a teoria clássica de laminação coincide com o plano x-y e separa a espessura do laminado em duas metades.

Plano médio simétrico ou de simetria: é o plano no laminado em que a partir dele, ambos lados, o empilhamento de lâminas é simétrico.

Ply: camada, lâmina

Pressão burst ou de estouro: a mais alta pressão atingida no teste de aplicação dessa pressão.

Roving: tipo de disposição ou distribuição de fibras.

Sistema ou meio contínuo: corpo que pode ser continuamente sub-dividido em elementos infinitesimais na qual cada elemento possui as mesmas propriedades do material sólido (http://en.wikipedia.org/wiki/Continuum_mechanics).

Soldagem por fusão: processo que não requer alguma pressão para formar a solda. A costura a ser soldada é aquecida, pela queima de gás ou um arco elétrico à temperatura de fusão, e o metal adicional, se requerido, é fornecido pelo derretimento do arame (Bednar, 1986).

Strand: cordão formado por fios. No caso de fibras, também aplica-se para a palavra “**tow**”.

Yarn: cordão formado por fios torcidos.