



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro

---

Escola Politécnica

## ANÁLISE ESTRUTURAL DE CILINDROS REVESTIDOS DE COMPÓSITOS PARA ARMAZENAMENTO DE GNV.

Fernando F. M. C. de Guamá

Projeto de Graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Lavinia Maria Sanabio Alves  
Borges D.Sc.

Rio de Janeiro  
Setembro de 2012

ANÁLISE ESTRUTURAL DE CILINDROS REVESTIDOS DE COMPÓSITOS  
PARA ARMAZENAMENTO DE GNV.

Fernando F. M. C. de Guamá

PROJETO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO.

Examinado por:

---

Profa. Lavinia Maria Sanabio Alves Borges, D.Sc.

---

Prof. Nestor Alberto Zouain Pereira, D.Sc.

---

Prof. Fernando Pereira Duda, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2012

F. M. C. de Guamá, Fernando

Análise Estrutural de Cilindros Revestidos de Compósitos para Armazenamento de GNV./Fernando F. M. C. de Guamá. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politecnica, 2012.

XIV, 91 p.: il.; 29,7cm.

Orientadora: Lavinia Maria Sanabio Alves Borges

D.Sc.

Projeto (graduação) – UFRJ/Escola Politecnica/Curso de Engenharia Mecânica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 84 – 84.

1. Primeira palavra-chave. 2. Segunda palavra-chave.
3. Terceira palavra-chave. I. D.Sc., Lavinia Maria Sanabio Alves Borges. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Título.

# Dedicatoria

Dedico esse trabalho a minha mãe,  
pelo amor e dedicação para comigo,  
por ter me ensinado tudo o que sou e  
por ser a pedra fundamental da pessoa  
que me tornei. Obrigado mãe.

Dedico também a minha irmã, Evelyn,  
por ter me erguido quando estava sem rumo,  
por ter me ensinado a enfrentar a vida  
como encaro hoje e me ajudado a me  
tornar quem sou agora.

# Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no contexto do Programa de Recursos Humanos da ANP que forma profissionais especializados para a indústria de petróleo e gás natural.

A participação dos alunos bolsistas em seminários, simpósios e congressos foi muito importante no sentido de aumentar o contato dos bolsistas com os reais atributos e dificuldades das indústrias de petróleo e gás natural.

Gostaria de agradecer ao Programa de Recursos Humanos da ANP, em especial ao PRH-37, por auxiliar o desenvolvimento dos conhecimentos relativos às indústrias de hidrocarbonetos, e a conclusão desta dissertação.

*”Por que o SENHOR dá a sabedoria,  
e da sua boca vem a inteligência e o entendimento.”*

*Proverbios 2:6*

*”A coisa mais bela que o homem pode experimentar é o mistério.  
É esta a emoção fundamental que está na raiz de toda ciência e arte.*

*O homem que desconhece esse encanto, incapaz de sentir admiração  
e estupefação, esse já está, por assim dizer, morto e tem os olhos extintos.”*

*Albert Einstein*

Resumo da Projeto apresentada à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico

## ANÁLISE ESTRUTURAL DE CILINDROS REVESTIDOS DE COMPÓSITOS PARA ARMAZENAMENTO DE GNV.

Fernando F. M. C. de Guamá

Setembro/2012

Orientadora: Lavinia Maria Sanabio Alves Borges D.Sc.

Curso: Engenharia Mecânica

Neste trabalho são analisados os aspectos relacionados à projeto e otimização estrutural de cilindros de alta pressão, recobertos parcialmente e integralmente com compositos termoplásticos fibrosos, para gás natural veicular (GNV). Este estudo foi realizado a partir da análise comparativa com um cilindro convencional metálico com outros dois modelos, com as mesmas proporções geométricas internas, revestidos de compósitos. O processo de modelagem dos equipamentos foi tanto através de cálculos analíticos como também por procedimentos baseados em análise numérica pelo método dos Elementos Finitos.

Os cilindros analisados são projetados conforme a norma ISO 11439, que admite 4 tipos de cilindros para armazenamento de GNV. Dentre estas, os tipos II (recobertos por compósitos somente na região anular) e o tipo III (recobertos integralmente por compósitos) são analisadas conforme as condições de serviço e segurança que a norma admite, e modelados conforme as normas técnicas ASME seção VIII div I e seção X. A análise numérica emprega o elemento de casca multicamada do código ANSYS versão 14.0 para a análise das tensões principais em cada camada de compósito. O critério de falha de Hill-Tsai, para materiais compósitos laminados, foi empregado para análise de falha dos mesmos.

Por fim, após a análise computacional individual de cada caso, foram realizadas as comparações dos resultados obtidos e, verificadas as características individuais de cada tipo, ao que se refere ao comportamento mecânico destes.

### **Palavras chave:**

materiais compósitos, gás natural veicular, método dos elementos finitos, critérios de falha

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

## STRUCTURAL ANALYSIS OF COMPOSITE CYLINDERS FOR CNG STORAGE.

Fernando F. M. C. de Guamá

September/2012

Advisor: Lavinia Maria Sanabio Alves Borges D.Sc.

Department: Mechanical Engineering

In this work the aspects related to the structural design and optimization of high pressure cylinders, hoop and fully wrapped with thermoplastic fibers composites for natural gas vehicles (NGV), are analyzed. This study was conducted based on the comparative analysis with a conventional cylinder made of a CrMo metallic alloy. The modeling process of the equipment was done to both analytical calculations and procedures based on numerical analysis by finite element method.

The analyzed cylinders are designed according to ISO 11439, which supports 4 types of natural gas storage vehicles. Among these, types II (hoop-wrapped cylinder) and type III (fully-wrapped cylinder) are analyzed according the service conditions and safety pressure that the rule admits, and modeled according to the technical standards ASME section VIII division I and section X. The numerical analysis use the multilayer shell element by ANSYS version 14.0 to obtain the principal stress in each layer of the composite. The failure criterion of Tsai-Hill for composite laminates was used for failure analysis of each of the layers.

At last, after a computer analysis of each individual case, a comparative analyses were performed and the results obtained, verified the individual characteristics of each type, which refers to the mechanical behavior of these.

### **Keywords:**

composite materials, natural gas vehicles, failure criteria and finite element method

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações Iniciais . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .	2
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1 Compósitos . . . . .	3
2.1.1 Introdução . . . . .	3
2.1.2 Materiais e Processos . . . . .	6
2.1.2.1 Matriz . . . . .	6
2.1.2.2 Fibra . . . . .	8
2.1.2.3 Manufatura . . . . .	13
2.1.3 Estudo do Comportamento Mecânica dos Compósitos . . . . .	17
2.1.3.1 Princípio Básico da Micromecânica dos Matérias Compósitos . . . . .	20
2.1.3.2 Princípio Básico da Macromecânica dos Matérias Compósitos . . . . .	24
2.1.3.3 Teoria cinemática de camadas de compósitos em mo- delo de cascas . . . . .	31
2.1.3.4 Análise de Falhas em Materias Compósitos . . . . .	36
2.2 Vasos de Pressão . . . . .	42
2.2.1 Aplicação . . . . .	42
2.2.2 Projeto de Vasos de Pressão . . . . .	43
2.2.2.1 Normas e Códigos . . . . .	44
2.2.2.2 Projeto de Vaso de Pressão para GNV . . . . .	48
2.2.2.3 Projeto de Cilindro Tipo 1 . . . . .	49
2.2.2.4 Projeto de Cilindro Tipo 2 e 3 . . . . .	51

2.2.2.5	Fabricação . . . . .	57
<b>3</b>	<b>Estudo de Caso</b>	<b>61</b>
3.1	Introdução . . . . .	61
3.2	Análise Numérica . . . . .	63
3.2.1	Parâmetros da modelagem em MEF . . . . .	65
3.2.2	Estudo de Caso: Cilindro Tipo I . . . . .	67
3.2.3	Estudo de Caso: Cilindro Tipo II . . . . .	71
3.2.4	Estudo de Caso: Cilindro Tipo III . . . . .	76
<b>4</b>	<b>Discursão dos Resultados</b>	<b>79</b>
4.1	Comparação dos Resultados . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>82</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>84</b>
<b>A</b>	<b>Dimensionamento dos Cilindros</b>	<b>85</b>
A.1	Métodologia . . . . .	85
A.2	Dimensionamento para o Cilindro tipo I . . . . .	86
A.3	Dimensionamento para o Cilindro tipo II . . . . .	87
A.4	Dimensionamento para o Cilindro tipo III . . . . .	89

# Lista de Figuras

2.1	Fases de um material compósito. (adaptado de Daniel e Ishai, 2006) .	4
2.2	Tipo de materiais compósitos. . . . .	5
2.3	Esquema do processo de deposição de vapor químico utilizado na fabricação de fibras de boro. (adaptado de PIGGOTT, 2002) . . . . .	9
2.4	Algumas formas alotrópicas do carbono: ‘a’ - diamante, ‘b’ - grafite, ‘c’ - lonsdaleite, ‘d’ - fulereno $C_{60}$ , ‘e’ - fulereno $C_{540}$ , ‘f’ - fulereno $C_{70}$ , ‘g’ - carbono amorfo, ‘h’ - nanotubo de carbono. (Emanuel, 2009)	11
2.5	Imagens por MEV de seções transversais de fraturas de fibras de carbono com um tratamento de térmico a $2500^{\circ}\text{C}$ : ‘a’ - tipo radial, ‘b’ - tipo aleatório, ‘c’ - tipo estrias circunferenciais, ‘d’ - tipo estrias circunferenciais com estruturas aleatórias. ( Emanuel, 2009) . . . . .	12
2.6	Esquema do processo produtivo da fibra de vidro. ( Piggott, 2002) . .	13
2.7	Conjunto de deposição por moldagem a autoclave. (adaptado de Daneiel e Ishai, 2006) . . . . .	15
2.8	Conjunto de molde por transferência de resina. (Emanuel, 2009) . . .	16
2.9	Esquema do processo produtivo da fibra de vidro. (Piggott, 2002) . .	17
2.10	Materiais compósitos em diferentes níveis de consideração e análise. (adaptado de Daneil e Ishai, 2006) . . . . .	18
2.11	Lâmina com os eixos de direções principais. (adaptado de Daniel e Ishai, 2006) . . . . .	19
2.12	Laminado multidirecional em sistema de referência global. (adaptado de Daniel e Ishai, 2006) . . . . .	19
2.13	(a) RVE equivalente a um material homogêneo e (b) estrutura final com o RVE substituído pelo material equivalente. (adaptado de Barbero, 1999) . . . . .	21
2.14	Compósito sob tensão de tração transversal. (Daniel e Ishai, 2006) .	22
2.15	Compósito sob carregamento de cisalhamento no plano. (Daniel e Ishai, 2006) . . . . .	23
2.16	Compósito sob tensão interlaminar no plano 2-3. (adaptado de Barbero, 1999) . . . . .	24

2.17	Laminado com três camadas e suas direções principais. (adaptado de Barbero, 1999)	25
2.18	Estado de tensão em um elemento de volume (Taniguchi, 2008)	26
2.19	Componentes de tensão nas direções principais e globais de coordenadas (Daniel e Ishai, 2006)	29
2.20	Geometria de uma lâmina em casca. (a) Geometria da casca. (b) Posição vetorial de pontos na superfície neutra e acima dela. (c) Um elemento diferencial de uma casca (Daniel e Ishai, 2006).	32
2.21	Resultante das tensões em um elemento de casca. (modificado de Reddy, 2003)	33
2.22	Ruptura de uma estrutura laminar em sandwich (adaptado de Gay, Hoa e Tsai 2003).	36
2.23	Vaso de pressão horizontal em aço (Taniguchi, 2003)	43
2.24	Representação genérica de um vaso de pressão (Taniguchi, 2003)	43
2.25	Esquema do cilindro GNV tipo I. (a) Vista Isométrica. (b) Vista em corte. (Villena, 2004)	50
2.26	Diagrama de tensões no reservatório cilíndrico.	50
2.27	Geometria de um domo semielíptico	51
2.28	Esquema do cilindro GNV tipo 3. (a) Vista Isométrica (b) Vista em corte. (Villena, 2004)	52
2.29	Esquema do cilindro GNV tipo 3. (a) Vista Isométrica (b) Vista em corte. (Villena, 2004)	52
2.30	Cilindro de alta pressão em <i>Filament winding</i> - enrolamento helicoidal (Gay, Hoa e Tsai, 2003).	53
2.31	Elemento de camada helicoidal - direção axial (Taniguchi, 2003)	54
2.32	Cilindro de alta pressão em <i>Filament winding</i> - enrolamento helicoidal e circunferencial (Gay, Hoa e Tsai, 2003).	55
2.33	Elemento de camada helicoidal - direção circunferencial (Taniguchi, 2003).	55
2.34	Processo de <i>filament winding</i> para cilindros. (a) Visão geral do equipamento (b) Detalhe esquemático da impregnação dos feixes de fibra (Adaptado de Neto, 2011)	59
2.35	Processo de <i>Tipos de ângulo de enrolamento</i> . (a) <i>Helicoidal</i> (b) <i>Circunferencial (hoop)</i> (c) <i>Polar</i> (neto, 2011)	60
3.1	Representação completa do cilindro de GNV adotado.	63
3.2	Fluxograma de uma análise por MEF.	64
3.3	Representação de um elemento Shell 281.	66
3.4	Modelo analisado do cilindro tipo I, com malha.	67

3.5	Critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo I, submetido à pressão interna de 200 bar. . . . .	69
3.6	Critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo I, submetido à pressão interna de 300 bar. . . . .	69
3.7	Critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo I, submetido à pressão interna de 450 bar. . . . .	70
3.8	Modelo analisado do cilindro tipo II, com malha. . . . .	71
3.9	Critério de tensões de Von Mises (Psi) do cilindro tipo II, com revestimento helicoidal de compósito , submetido à pressão interna de 200 bar. . . . .	73
3.10	Distribuição no critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo II, com revestimento helicoidal de compósito, submetido à pressão interna de 300 bar. . . . .	74
3.11	Deformações do cilindro tipo II, para espessura de compósito de 5,3 mm, sob pressão de teste. . . . .	74
3.12	Distribuição no critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo II, com revestimento helicoidal de compósito, submetido à pressão interna de 500bar. . . . .	75
3.13	Modelo analisado do cilindro tipo III, com malha. . . . .	76
3.14	Critério de tensões de Von Mises (Psi) do cilindro tipo III, com revestimento helicoidal e circunferencial de compósito , submetido à pressão interna de 200 bar. . . . .	77
3.15	Critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo III com revestimento helicoidal e circunferencial de compósito, submetido à pressão interna de 300 bar. . . . .	78
3.16	Critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo III com revestimento helicoidal e circunferencial de compósito, submetido à pressão interna de 500bar. . . . .	78
A.1	Modelo de dimensionamento para o corpo de cilindro. . . . .	86
A.2	Modelo de dimensionamento para o domo eliptico. . . . .	87
A.3	Cilindro em <i>filament winding</i> - enrolamento helicoidal (Gay, Hoa e Tsai, 2003). . . . .	88
A.4	Estado plano de tensões - enrolamento helicoidal(Gay, Hoa e Tsai, 2003). . . . .	88
A.5	Cilindro em <i>filament winding</i> - enrolamento helicoidal e circunferencial (Gay, Hoa e Tsai, 2003). . . . .	89
A.6	Estado plano de tensões - enrolamento helicoidal e circunferencial(Gay, Hoa e Tsai, 2003). . . . .	90

# Lista de Tabelas

2.1	Propriedades físicas e mecânicas de fibras. (adaptado de Daniel e Ishai, 2006) . . . . .	10
2.2	Exemplo da variação do Peso e Preço em função do tipo de cilindro de pressão. (Disponível em: <a href="http://www.metal-mate.com/web/dinsorweb/en/product.php?name=ngv_cylinder">www.metal-mate.com/web/dinsorweb/en/product.php?name=ngv_cylinder</a> , acessado em 08 set. 2012) . . . . .	52
3.1	Características do cilindro tipo I . . . . .	68
3.2	Propriedades do aço 30CrMo usado no corpo do cilindro (Obtidas em: <a href="http://www.keytometals.com">www.keytometals.com</a> ) . . . . .	68
3.3	Características do cilindro tipo II . . . . .	71
3.4	Propriedades do compósito usado no corpo do cilindro (Daniel e Ishai, 2003) . . . . .	72
3.5	Características do cilindro tipo III . . . . .	76
4.1	Comparação dos resultados obtidos para os casos analisados . . . . .	81

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações Iniciais

O uso do gás natural como fonte de combustível veicular é largamente associado à uma fonte menos poluente e mais econômica que os tradicionais combustíveis do mercado. Todavia, sua aplicação é muito mais vasta, indo da industrial, residencial e abastecimento automotivo. Nesse último, o gás natural tem sido uma alternativa para amenizar problemas ambientais e econômicos relacionados ao petróleo. Isso se deve, principalmente, ao fato dele ser um hidrocarboneto de fácil queima, não liberar partículas nocivas na atmosfera, baixo custo e ser de fácil adaptação aos motores convencionais.

No entanto, apesar dos benefícios que o uso do gás natural proporciona, a sua estocagem veicular apresenta algumas desvantagens quando analisada sob o ponto de vista do espaço e peso ocupado pelo cilindro de armazenamento. Devido a sua volatilidade e necessidade de armazenamento a alta pressão, os reservatórios comerciais possuem grandes dimensões e disposições geométricas. Além disso, o elevado peso do tanque, devido as condições de pressão submetidas por projeto, diminuem a potência do veículo e aumenta o trabalho dos arnotecedores.

Portanto, o problema da correta estocagem do gás natural, mediante as condições de segurança e limitações de desempenho veicular, torna a questão de otimização do vaso de essencial importância no processo de desenvolvimento e uso do gás natural. Assim, a motivação deste trabalho é estudar os diversos itens de dimensionamento considerados para este equipamento, levando principalmente em foco a seleção do material de construção do vaso, visando entender as tecnologias e mecanismos utilizados para otimizar o armazenamento do gás natural veicular.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho traz por objetivo analisar a estrutura de cilindros de alta pressão em compósitos, tanto a partir da metodologia aplicada pelos cálculos analíticos quanto aos procedimentos analíticos numéricos e computacionais aplicados em método dos elementos finitos. Serão considerados cilindros fabricados pelo processo de enrolamento filamentar (*filament winding*) e comparados a um cilindro de referência, confeccionados em uma liga de aço, quanto ao que confere suas características e limitações.

Como contribuição significativa deste trabalho destaca-se o estudo, baseado em método analítico e no método dos elementos finitos, para o projeto de vasos de pressão revestidos em materiais compósitos.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

O Capítulo 1 apresenta aspectos gerais do trabalho: 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: Teoria dos materiais compósitos, vasos de pressão, normas e regulamentações de projeto de vasos de pressão. O Capítulo 3 apresenta um estudo comparativo através de um cilindro de referência (tipo I), com dois outros modelos, tipo II e III, projetados para serem fabricados com uma liga de 30 CrMo e revestidos por fibra de vidro/epóxi. Posteriormente esses dados são sintetizados e analisados para discussão das características de cada modelo.

No Capítulo 4, conclui-se quanto à aplicabilidade de compósitos em cilindros de armazenamento de gás natural veicular e sugere-se por uma complementação ou continuidade futura do trabalho em questão. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as referências bibliográficas do trabalho.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica da mecânica envolvendo os elementos para a composição do conjunto deste trabalho. Na primeira parte é apresentada uma breve definição dos materiais compósitos, focando na constituição mecânica dos compósitos poliméricos termoplásticos fibrosos. Faz-se também menção das particularidades do comportamento mecânico no que diz respeito à sua constituição micro e macromecânica e, uma análise das características de falha para o mesmo. Em seguida é apresentado o escopo teórico do uso de vasos de pressão para cilindros de GNV, sua classificação, normas, projeto e fabricação. Por fim, é mostrada uma formulação teórica analítica, pela teoria das cascas, aplicados à materiais compósitos em camadas.

### 2.1 Compósitos

#### 2.1.1 Introdução

Um compósito é um material estrutural cuja composição consiste em uma combinação, à nível macroscópico, de duas ou mais partes que possuem propriedades físicas e químicas distintas, não são solúveis entre si e possuem propriedades mecânicas complementares. Assim, de acordo com o **princípio da ação combinada**, melhores combinações de propriedades são criadas por uma combinação judiciosa de dois ou mais materiais distintos. As propriedades de um compósito dependem das propriedades dos materiais componentes, suas geometrias e a distribuição das fases.

Devido aos seus elevados valores de resistência e módulo de elasticidade, os compósitos encontram várias aplicações na construção de estruturas mecânicas, aeroespaciais, marinhas e automotivas. Previsões de falhas de estruturas em compósitos e as cargas máximas que as mesmas podem suportar se tornam um importante tópico de pesquisa para garantia de confiabilidade (DANIEL; ISHAI, 2006).

Acentuadamente nos últimos trinta anos, materiais compósitos, polímeros e cerâmicas surgiram como materiais emergentes dominantes (BARBERO, 1999). As razões que levam ao crescente uso dos compósitos residem no fato destes apresentarem adaptabilidade para funções desejáveis de projeto, ou seja, são materiais que podem ter suas características mecânicas projetadas – alta-rigidez específica, alta-resistência específica, vida longa à fadiga, baixa-densidade.

Assim, a principal utilidade dos compósitos é promover combinações de propriedades que dificilmente são obtidas com materiais convencionais. Isso é especialmente verdade para os materiais que são necessários em aplicações aeroespaciais, subaquáticas e de transporte. Por exemplo, os engenheiros da indústria aeronáutica buscam cada vez mais materiais estruturais que possuem baixa massa específica, sejam resistentes, rígidos, com resistência à abrasão e ao impacto e que não sejam corroídos com facilidade. Essa é uma combinação de características formidável. Com frequência, os materiais mais resistentes são relativamente densos; além disso, o aumento da resistência ou rigidez resulta, em geral, em uma diminuição na resistência ao impacto (CALISTER, 2008).

Uma das fases é denominada matriz, que representa o componente de menor rigidez e fragilidade estrutural, porém, confere a forma à estrutura e serve de elemento de coesão para o material. A outra fase, denominada material de reforço, ou fase dispersa, confere as propriedades mecânicas e estruturais do material. Em alguns casos, devido principalmente à interações químicas ou efeitos de processos por tratamento químico pela aplicação de agentes aderentes, uma terceira fase distinta existe entre a matriz e o reforço, denominada como interface. A finalidade da interface é promover uma melhor interação mecânica na superfície de contato entre a matriz e o reforço. A Figura 2.1 ilustra a organização estrutural exemplificada acima.

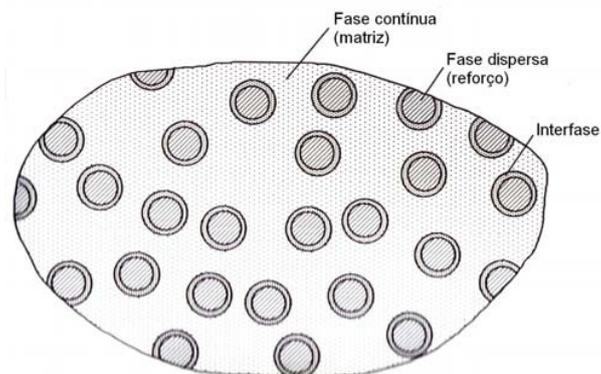


Figura 2.1: Fases de um material compósito. (adaptado de Daniel e Isahi, 2006)

De uma forma Os materiais compósitos podem ser classificados conforme o tipo de material de reforço e matriz ao qual ele é fabricado. Todavia, essa classificação

pode ser interpretada de diferentes formas e varia de autor para autor na literatura da matéria. Conforme o tipo de material de reforço, os materiais compósitos podem ser divididos em três grupos:

- Reforço com partícula;
- Reforço com fibra;
- Estrutural.

Segundo a classificação pelo tipo de matriz, os compósitos podem ser classificados como:

- Matriz polimérica;
- Matriz metálica;
- Matriz cerâmica;
- Matriz híbrida.

A Figura 2.2 mostra em um fluxograma as formas de classificação e subdivisão dos compósitos conforme o tipo de reforço.

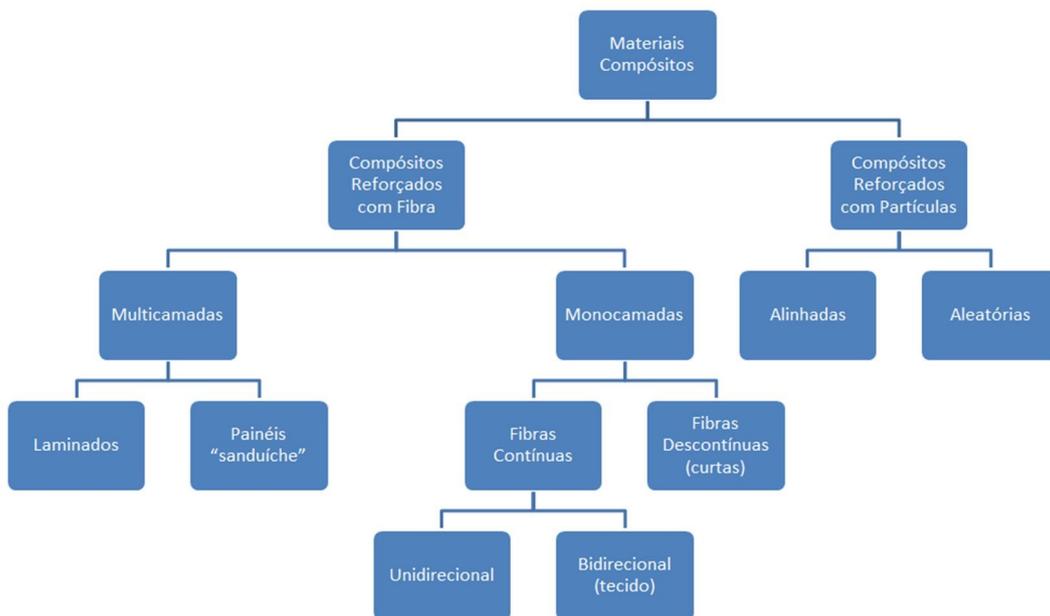


Figura 2.2: Tipo de materiais compósitos.

Por fim, a anisotropia peculiar à esses materiais, torna possível o desenvolvimento de um projeto otimizado, capaz de conciliar as características geométricas e funcionais necessárias para um componente estrutural com as propriedades mecânicas

desejadas. No entanto, esses materiais estão sujeitos a danos na medida em que são utilizados, apresentando elevada complexidade dos modos de falha, tais como:

- Arrancamento das fibras da matriz;
- Formação de pontes da fibra na matriz, ou seja, descolamento de partes das fibras na matriz;
- Fratura das fibras;
- Falhas da matriz, etc.

Isso faz com que não exista ainda um critério de resistência de uso global apto a prever o desempenho de um componente em operação. (SIQUEIRA, 2009)

## **2.1.2 Materiais e Processos**

### **2.1.2.1 Matriz**

A Fase Matriz pode ser polimérica, metálica ou cerâmica. Esta fase destaca-se por sua capacidade de coesão, ligando as fibras entre si, e servem como meio pelo qual o fluxo de tensão se transmite e é distribuído às fibras. Além disso, deseja-se que o material da matriz apresente boa ductilidade. No entanto, sua resistência mecânica à aplicação de cargas costuma ser extremamente baixa.

A segunda função da matriz é proteger as fibras individuais em relação aos danos superficiais como um resultado da abrasão mecânica ou reações químicas com o ambiente. Tais interações podem introduzir falhas (defeitos) superficiais capazes de formar trincas, que podem conduzir à falhas, mesmo sob baixos níveis de tensão de tração.

Uma vez analisando a matriz separadamente das fibras, em virtude de sua relativa maciez e plasticidade, esta serve como meio de prevenção à propagação de trincas frágeis de fibra para fibra, que poderia resultar numa falha catastrófica. Sendo assim, a fase matriz serve como uma barreira à propagação de trinca.

A seleção de materiais para as matrizes deve levar em conta as propriedades mecânicas, resistência à corrosão e flambagem 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).

Outra importante propriedade a ser considerada é a capacidade de combinação matriz-fibra. O limite de resistência à ruptura do compósito é diretamente dependente da qualidade dessa interação. Adequar essa ligação é essencial para maximizar a transmissão da tensão da matriz para as fibras.

Os compósitos com matrizes poliméricas podem ser feitos de resinas termofixas ou termoplásticas. Uma matriz de resina de polímero termofixa é obtida por

uma transformação química irreversível de um polímero em uma matriz polimérica amorfa. As matrizes de resinas termofixas possuem baixa viscosidade, que permitem uma alta capacidade de impregnação da fibra de reforço com grande facilidade de processamento, o que garante que esta seja o tipo mais comum dessa família. Poliésteres, epóxis e fenólicos são os materiais mais usados dessa família.

Compósitos de matriz polimérica com reforço constituído de fibras de vidro, tanto contínuas quanto descontínuas, é um tipo de compósito produzido em grande escala. Como propriedades desse material podem citar:

- Facilidade de ser estirado na forma de fibras de alta resistência mecânica a partir do estado líquido (fundido);
- Disponibilidade de matéria-prima barata;
- Relativamente forte como fibra;
- Boa afinidade com matrizes poliméricas, que produz um compósito com alta resistência mecânica específica;
- Alta inércia química, que torna o compósito útil numa variedade de ambientes de corrosão.

Plásticos impregnados com fibras de carbono também são muito utilizados atualmente. Esse tipo de compósito tem excelente resistência às temperaturas e produtos químicos corrosivos, porém, apresenta elevado custo de produção e apenas uma limitada utilização. A indústria aeronáutica está constantemente sintetizando compósitos reforçados com carbono, em componentes estruturais de aeronaves, como uma medida de redução de massa.

Além dessas, várias matrizes poliméricas impregnadas com fibras de boro têm sido utilizadas pela indústria civil e militar (ex.: lâminas de rotor de helicóptero constituídas por fibras de boro numa resina epóxi). Outra utilização na produção de compósitos são as fibras poliméricas de aramidas de alta resistência mecânica. Estas têm sido empregadas em componentes estruturais de baixo peso, tais como equipamentos aeroespaciais, aeronavais, marinhos e esportivos.

Matrizes metálicas também podem ser usadas para formar compósitos, uma vez que as maiorias dos metais possuem boa ductilidade. Contudo, apesar dessa compatibilidade, sua aplicação é limitada nesse âmbito, uma vez que seu preço de manufatura é elevado e não compensa a substituição das ligas convencionais (devido principalmente à escassez de métodos de processamento). Como compósitos, os metais costumam ser usados como matriz de fibra contínua em alumínio, magnésio, cobre e titânio.

As matrizes metálicas reforçadas com fibra podem ser utilizadas em temperaturas maiores do que os compósitos poliméricos. Além disso, apresenta alta resistência mecânica, o que garante elevados módulos específicos ao composto. As propriedades de fluência e de ruptura em altas temperaturas de algumas superligas, baseadas em Ni e Co, podem ser aprimoradas pelo reforço com fibra usando metais refratários como tungstênio. Projetos de compósitos com estas matrizes permitem maiores temperaturas de operação e melhores eficiências para motores a turbina, tendo nesses setores sua principal utilização.

Compósitos híbridos reforçados com fibras são obtidos utilizando-se dois ou mais tipos diferentes de fibras numa mesma matriz. Estes compostos têm uma melhor combinação geral de propriedades do que compósitos contendo apenas um único tipo de fibra. Uma variedade de combinações de fibras e materiais de matriz é usada. Os compósitos híbridos mais comuns são aqueles contendo fibras de vidro e carbono. As fibras de carbono são fortes e relativamente rígidas e fornecem um reforço de baixa densidade; entretanto, são mais caras que os outros tipos.

### 2.1.2.2 Fibra

As Fibras constituem o elemento estrutural que confere as principais características de resistência mecânica de tração e compressão, assim como a isotropia ou anisotropia do compósito.

Essencialmente, esta fase é constituída por um conjunto de filamentos contínuos e longos, nos quais cada filamento tem diâmetro entre cinco e quinze micrômetros. Já uma fibra, formada por filamentos, possui diâmetro entre 0,01 a 0,04 milímetros, com comprimento no mínimo cem vezes o diâmetro.

Os conjuntos de filamentos são agrupados em interfaces (fibras) com cerca de 200 filamentos, apresentados no formato de maço ou cordão (do idioma inglês: *strand* ou *tow*) e enrolados em uma bobina. Esses maços ou cordões também são encontrados na forma torcida, denominados *yarn* (vocábulo técnico do idioma inglês). A forma de distribuição em bobina de cordões (*strand*), onde sessenta cordões estão distribuídos paralelamente, têm a finalidade de fornecer características plenas de resistência unidirecional, principalmente para o enrolamento filamentar (*Filament Winding*) (SCHWARTZ apud TANIGUCHI, 2008, p.30).

Devido às suas características de leveza, rigidez, resistência mecânica, estabilidade térmica e possibilidade de fornecer condutividade ou isolamento elétrico (dependendo do tipo da fibra), as fibras chegam a suportar de 70% a 90% dos carregamentos aplicados nos compósitos. Isso se deve à orientação preferencial de suas moléculas ao longo da direção da fibra e também ao número reduzido de defeitos presentes nas mesmas (BARBERO, 1999).

As fibras são usadas como reforço contínuo em compósitos unidirecionais pelo

alinhamento de uma grande quantidade de filamentos em uma placa fina ou casca denominada 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 para compósitos são de vidro, carbono e orgânico (Kevlar), enquanto para aplicações especiais são utilizados Boro, SiC e Alumínio. A seleção de qualquer uma dessas fibras depende das propriedades mecânicas e ambientais desejadas, assim como o custo delas (BARBERO, 1999).

Na Tabela 2.1, é possível visualizar comparativamente os valores de algumas propriedades mais comuns para alguns dos tipos de fibras disponíveis no mercado.

De acordo com Piggott (2002), dentre as fibras disponíveis no mercado e mais difundidas na indústria, três são mais utilizadas. São elas:

- **Fibra de Boro:** As fibras de boro foram desenvolvidas na década de 60 para aplicações aeronáuticas e aeroespaciais. O boro tem um grande potencial de resistência mecânica, entretanto é um material muito rígido e quebradiço, não sendo adequado em aplicações que necessitam de fibras mais finas. A fabricação das fibras de boro é feita por deposição em fios bem finos ( $1,25 \mu\text{m}$  de diâmetro) de tungstênio, como mostra a Figura 2.3. O fio de tungstênio é aquecido e é necessário um rigoroso controle da temperatura para obtenção de fibras coerentes e em tamanho ideal de cristal. Os cristais devem ser pequenos, de 2nm a 3nm de diâmetro, para que o material seja praticamente amorfo. Os melhores resultados foram obtidos para uma temperatura de  $1100^\circ\text{C}$  e o diâmetro de fibra normalmente produzida é de 0,1mm.

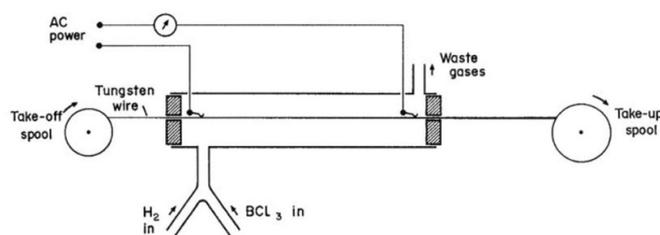


Figura 2.3: Esquema do processo de deposição de vapor químico utilizado na fabricação de fibras de boro. (adaptado de PIGGOTT, 2002)

- **Fibras de Carbono:** As fibras de carbono, também chamadas de fibras de grafite, são normalmente formadas por fibras poliméricas submetidas a intenso tratamento térmico. O carbono, seu material base, ocorre em diversas formas alotrópicas na natureza, como visto na Figura 2.4. Somente as formas cristalinas têm alto módulo de elasticidade e apenas algumas estruturas cristalinas do carbono produzem fibras de forma semelhante ao grafite. As fibras poliméricas

Tabela 2.1: Propriedades físicas e mecânicas de fibras. (adaptado de Daniel e Ishai, 2006)

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

(como exemplo o rayon e a poliacrilonitrina) são primeiramente aquecidas a temperaturas relativamente baixas (aproximadamente 220°C) sob tensão para oxidá-las e estabilizá-las, de modo que possam ser aquecidas a temperaturas mais elevadas sem desintegração. Em seguida são aquecidas a temperaturas superiores a 2000°C e, geralmente, ainda sob tensão. Após a conversão inicial do carbono, ocorrem algumas recristalizações e, com isso, alguns planos do grafite são orientados ao longo do eixo das fibras, como mostra a Figura 2.5 em estruturas de fratura.

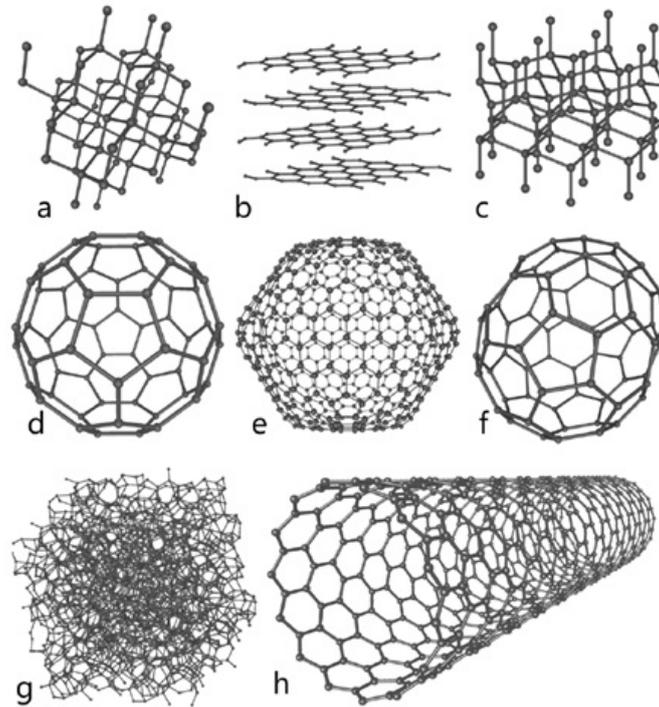


Figura 2.4: Algumas formas alotrópicas do carbono: ‘a’ - diamante, ‘b’ - grafite, ‘c’ - lonsdaleite, ‘d’ - fulereno  $C_{60}$ , ‘e’ - fulereno  $C_{540}$ , ‘f’ - fulereno  $C_{70}$ , ‘g’ - carbono amorfo, ‘h’ - nanotubo de carbono. (Emanuel, 2009)

- **Fibra de Vidro:** Os vidros cobrem uma vasta gama de materiais, normalmente contendo mais de 50% de sílica ( $SiO_2$ ) com estruturas aleatórias. São muitas vezes considerados como líquidos super-resfriados, denominado de estado vítreo. O vidro comum, utilizado para janelas e garrafas, normalmente contém 14%  $Na_2O$ , 10%  $CaO$ , 2,5%  $MgO$ , e 0,6%  $Al_2O_3$ , o restante constituído por  $SiO_2$ . Este tipo de vidro é relativamente fraco em resistência mecânica e possui alto coeficiente de expansão térmica em comparação com sílica pura, além de possuir uma condutividade térmica muito baixa. Sob temperatura de 700°C é facilmente moldável, embora caibam cuidados para aliviar as tensões desenvolvidas durante os processos moldagem e arrefecimento. Fibras fabrica-

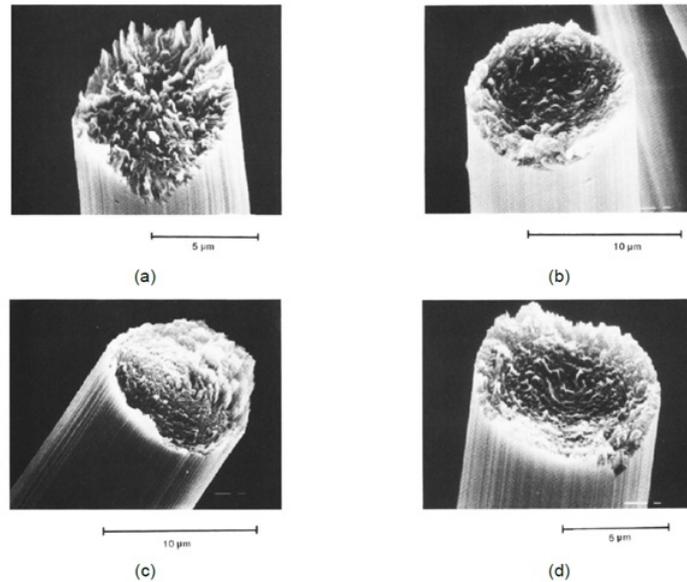


Figura 2.5: Imagens por MEV de seções transversais de fraturas de fibras de carbono com um tratamento de térmico a 2500°C: ‘a’ - tipo radial, ‘b’ - tipo aleatório, ‘c’ - tipo estrias circunferenciais, ‘d’ - tipo estrias circunferenciais com estruturas aleatórias. ( Emanuel, 2009)

das com este tipo de vidro não têm propriedades muito boas, sendo comparativamente fracas e facilmente atacadas pela água.

Os vidros de boro-silicato contêm uma quantidade relativamente grande de  $B_2O_3$  (tipicamente 12,9%) junto com  $Na_2O$  (3,8%), e  $Al_2O_3$  (2,2%) e são consideravelmente mais fortes que o vidro de composição principal de  $SiO_2$  (63%) e  $Na_2O$  (18%). Este último mais resistente à água e produtos químicos e com baixos coeficientes de expansão térmica. Entretanto, eles não formam fibras facilmente. As fibras de vidro, utilizadas para os têxteis, são de uma composição diferente, as mesmas utilizadas como reforço para polímeros. Para fins de reforço, um dos vidros utilizados com mais frequência é o vidro-E, desenvolvido originalmente por ter boas propriedades elétricas, sendo sua composição típica de  $CaO$  (17,5%),  $Al_2O_3$  (14,4%),  $B_2O_3$  (8%),  $MgO$  (4,5%) e a maior parte do restante (54,4%) de  $SiO_2$ . As fibras normalmente são feitas por fusão e os ingredientes agitados. Em seguida, o líquido escorre através de furos de 1 mm a 2 mm de diâmetro em um prato de platina aquecido, como mostra o esquema da Figura 2.5. O vidro é puxado rapidamente, formando as fibras com um diâmetro médio de 10  $\mu m$ . O prato de platina contém centenas de furos e as fibras são todas formadas em conjunto. Para obtenção de fibras fortes é essencial que as superfícies de fibras não toquem em nada, até mesmo em outras fibras. Por fim, as fibras são imersas em uma emulsão oleosa, formando um revestimento especial para garantir boa aderência entre as fibras e a matriz,

quando incorporadas como reforço em um polímero. Existem fibras de vidro desenvolvidas para atingir alta resistência e módulo de elasticidade, fibras com capacidade de transparência eletromagnética e outras com alta resistência a agentes alcalinos. Todas as fibras de vidro são extremamente sensíveis aos danos na superfície. Apenas o contato de uma fibra contra outra é suficiente para causar uma trinca que pode reduzir a resistência para menos da metade de uma fibra ainda intacta. O manuseio das fibras é possível somente se houver uma camada protetora sobre estas e, mesmo assim, pode ocorrer redução considerável de resistência em caso de negligência no manuseio.

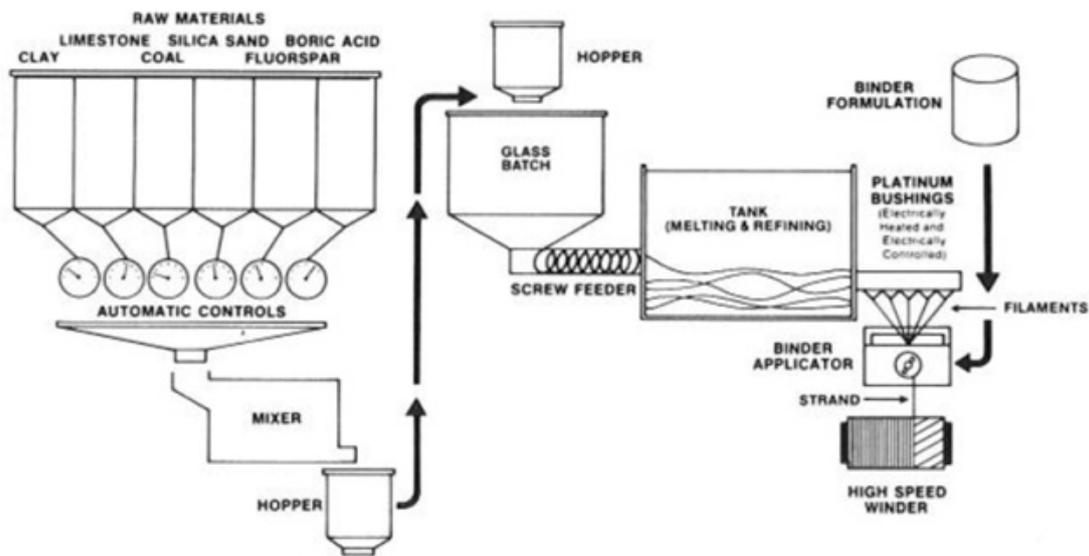


Figura 2.6: Esquema do processo produtivo da fibra de vidro. ( Piggott, 2002)

### 2.1.2.3 Manufatura

O processo de manufatura é uma das etapas mais importantes para se produzir um compósito. Em regra, o tipo de processo de fabricação para o compósito é determinado pelo tipo de matriz a ser empregado. De maneira geral, o processo de manufatura deve ser selecionado simultaneamente com a seleção de materiais e o projeto estrutural, em um ambiente de desenvolvimento integrado, unificado e dinâmico (DANIEL e ISHAI, 2006).

Um dos principais motivos dos materiais compósitos terem uso tão restrito está associado ao elevado custo de produção. Grande parte desse valor é atribuído à falta de metodologia de fabricação automatizada e em grande escala, assim como à necessidade de inspeções pós-fabricação para assegurar a qualidade do material. Em regra geral, as propriedades do produto final estão intimamente relacionadas com os métodos de manufatura.

É esperado que o produto acabado satisfizesse alguns requisitos gerais, como segue:

- Ser livre de defeitos, como vazios, fissuras e/ou ondulação de fibras;
- Possuir propriedades uniformes;
- Passar pelo processo de cura completa, sem o qual as propriedades mecânicas não são alcançadas completamente;

Além dos requisitos de produto, alguns requisitos de manufatura também devem ser satisfeitos, como:

- Controle da orientação e posicionamento das fibras;
- Espessura da camada;
- Proporção do volume de fibras;
- Tensões residuais;
- Dimensões finais;
- Temperatura que não exceda o valor prescrito;
- Distribuição de temperatura uniforme ao longo da peça;
- Cura completa e uniforme em um intervalo de tempo mais curto possível.

De acordo com Barbero (1999), um processamento típico de manufatura 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.

Existe uma inúmera diversidade de processos de fabricação de compósitos em uso na indústria. Entre eles, pode-se citar: centrifugação, moldagem a autoclave, moldes de compressão a vácuo, *filament winding*, posicionamento de fibras, moldes de injeção, pultrusão e moldagem por transferência de resina (Daniel e Ishai, 2006). Dentre estes, conforme Taniguchi (2008), três processos podem ser considerados os mais utilizados na indústria:

- **Moldagem a autoclave:** usado principalmente para processamento de compósitos de alto desempenho em aplicações militares, aeroespaciais, de transportes, marítimas e de infraestrutura. 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, apresenta alto custo. As matrizes empregadas são tanto termofixas quanto termoplásticas e as fibras de reforço são de vidro, carbono e aramida. A forma que este processo utiliza os materiais é denominada como prepreg. Neste processo as fibras estão dispostas em forma de fitas em camadas paralelas ou entrelaçadas como num tecido, estando pré-impregnadas com a resina da matriz parcialmente curada ou endurecida. As fitas de prepreg são cortadas conforme o tamanho, 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.

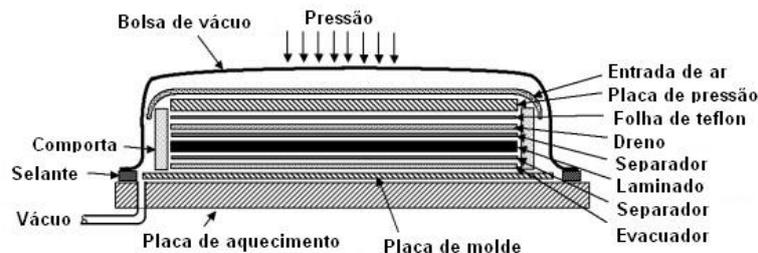


Figura 2.7: Conjunto de deposição por moldagem a autoclave. (adaptado de Daneiel e Ishai, 2006)

- **Moldagem por transferência de resina** (do inglês: *Resin Transfer Moulding* - RTM): usado para altos volumes de produção de peças complexas ou espessas em aplicações militares, aeroespaciais, de transportes, marítimas e de infraestrutura. Os reforços empregados são fibras de vidro, carbono, Kevlar e fibras dispostas em forma de tecidos. 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. Em seguida, 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.

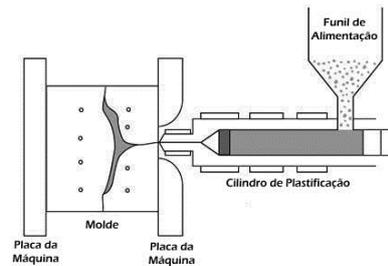


Figura 2.8: Conjunto de molde por transferência de resina. (Emanuel, 2009)

- **Enrolamento filamentar** (do inglês: *Filament Winding*): 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 método de fabricação de baixo custo. A rotação programada do mandril e o movimento horizontal do olhal de injeção 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  $5^\circ$  e  $90^\circ$ , 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 possa ser facilmente desmontado ou removido, ou então, construído em gesso ou sílica. Para casos em que não há controle das dimensões internas das peças, utiliza-se sílica para que o molde possa ser dissolvido por solventes, ou então cera para que possa derreter quando aquecido. 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).

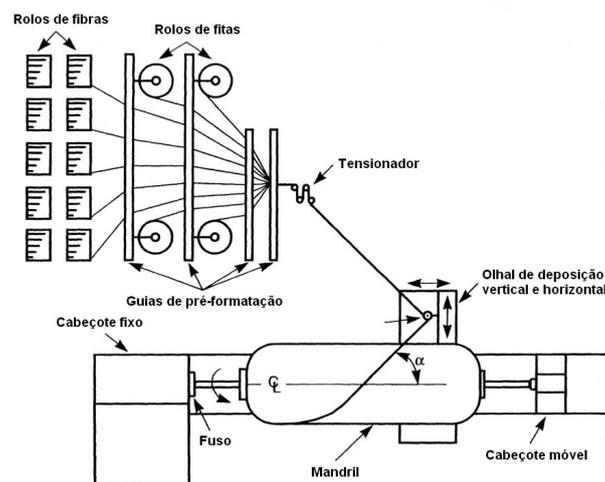


Figura 2.9: Esquema do processo produtivo da fibra de vidro. (Piggott, 2002)

### 2.1.3 Estudo do Comportamento Mecânica dos Compósitos

Os materiais compósitos podem ser analisados em diferentes níveis e a diferentes escalas, dependendo das características particulares e comportamento em consideração. Um diagrama esquemático de vários níveis de consideração e os seus tipos correspondentes de análise são apresentados na Figura 2.10.

No nível constituído da escala da ordem de observação do diâmetro da fibra, conhecido como de Micromecânica laminar, estuda-se os detalhes da interação dos materiais constituintes do compósito (fibra e matriz) em nível microscópico. Em outras palavras, trata do estado de deformação e tensão nos constituintes e falhas locais, tais como falha da fibra (tensão de flambagem, divisão), falha da matriz

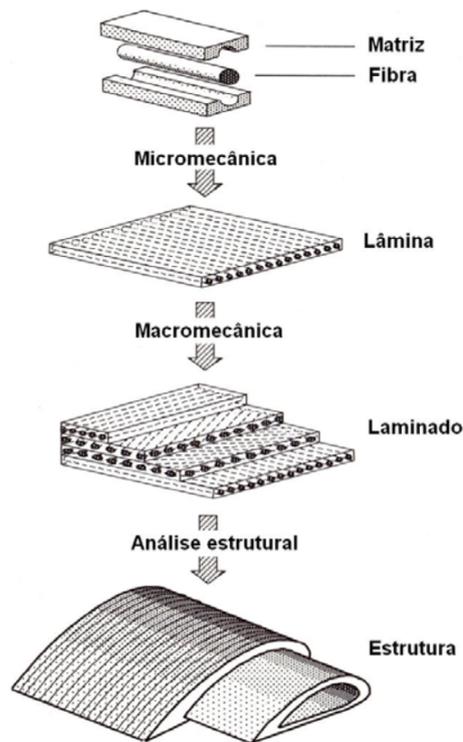


Figura 2.10: Materiais compósitos em diferentes níveis de consideração e análise. (adaptado de Daneil e Ishai, 2006)

(tração, compressão, cisalhamento), e falha da interface/interfase (descolamento).

A micromecânica é particularmente importante no estudo das propriedades como a resistência, a tenacidade à fratura e vida de fadiga, que são fortemente influenciadas pelas características locais que não podem ser integradas ou determinadas por médias. No nível de macromecânica, a lâmina é tratada como um material quase homogêneo e anisotrópico, onde as 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 sequência de empilhamento de lâminas.

Por fim, no nível estrutural ou do componente em si, análises 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.

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

- **Lâmina** é uma camada plana ou curva de fibras unidirecionais em uma matriz, referido também como lâmina unidirecional. Conforme a Figura 2.11, 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).

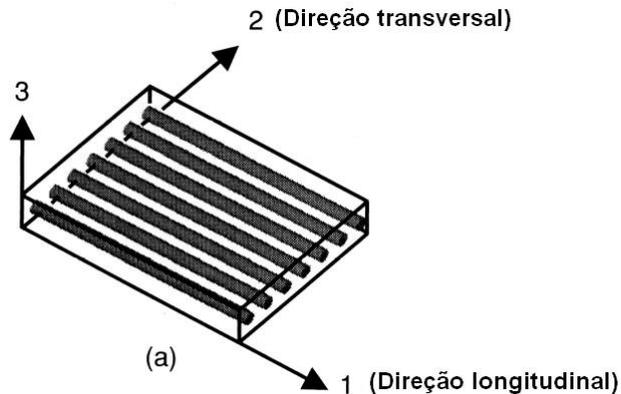


Figura 2.11: Lâmina com os eixos de direções principais. (adaptado de Daniel e Ishai, 2006)

- O **laminado** é constituído de duas ou mais lâminas empilhadas juntas em diversas orientações (Figura 2.12). 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  $x$  e o eixo principal 1 do material da lâmina, medido no sentido anti-horário no plano  $x$ - $y$ .

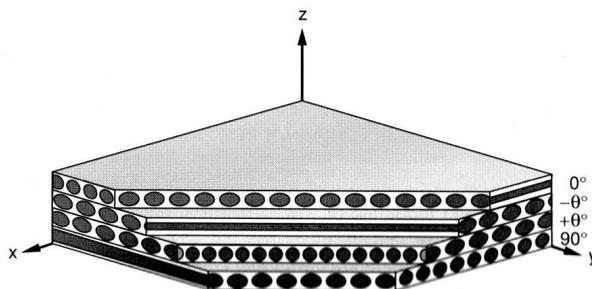


Figura 2.12: Laminado multidirecional em sistema de referência global. (adaptado de Daniel e Ishai, 2006)

A lâmina unidirecional é considerada o bloco básico de qualquer laminado ou compósito estrutural, sendo as propriedades necessárias do material básico para análise e projeto, 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 das direções principais da lâmina;
- $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ : coeficiente de condutividade térmica ao longo das direções principais da lâmina; Em adição as características acima, as lâminas de compósitos podem ser caracterizadas pelas seguintes propriedades:
- Proporção de volume de fibra:  $V_f = \frac{\text{Volume de fibras}}{\text{Volume de compósito}}$ ;
- Proporção de peso de fibra:  $W_f = \frac{\text{Peso das fibras}}{\text{Peso do compósito}}$ ;
- Proporção de volume de matriz:  $V_m = \frac{\text{Volume de matriz}}{\text{Volume de compósito}}$ ;
- Proporção de peso da matriz:  $W_m = \frac{\text{Peso da Matriz}}{\text{Peso do compósito}}$ ;
- Proporção de volume vazio:  $V_v = 1 - V_f - V_m = \frac{\text{Volume de vazios}}{\text{Volume de compósito}}$ ;
- Volume de compósito:  $V_c = V_f + V_m + V_v$ .

### 2.1.3.1 Princípio Básico da Micromecânica dos Matérias Compósitos

O estudo da micromecânica dos materiais compósitos visa determinar e compreender as interações entre os materiais constituintes do compósito em detalhe, como também determinar as propriedades do mesmo de uma forma menos localizada e heterogênea e sim, de uma forma equivalente homogênea, geralmente anisotrópico. É através do estudo das propriedades micromecânicas que se preveem as propriedades de uma

lâmina, baseado na análise das propriedades conhecidas - experimentalmente - dos materiais constituintes, fibra e matriz, e da geometria da microestrutura (volume de fibra e parâmetros geométricos).

Para promover esta análise, utiliza-se o conceito de elemento de volume representativo, RVE (*Representative Volume Element*), a fim de evitar considerar todas as fibras de uma lâmina do material durante a formulação de equações. A metodologia RVE usa a menor porção do material que contém todas as peculiaridades e propriedades do material. Em outras palavras, 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.

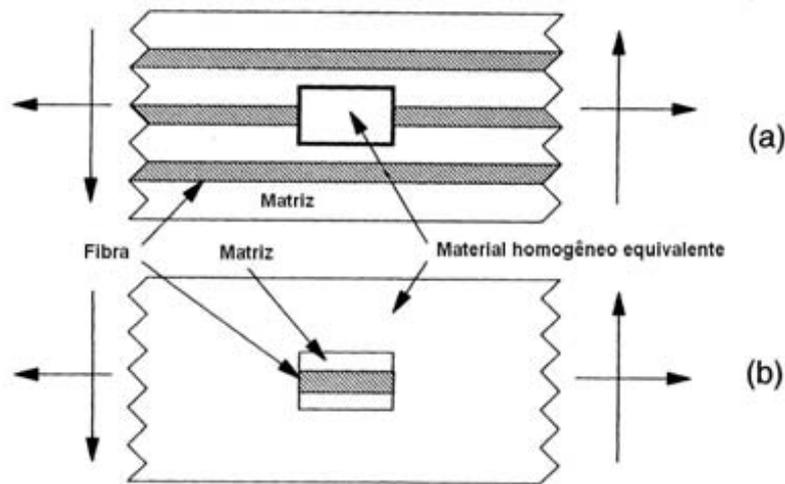


Figura 2.13: (a) RVE equivalente a um material homogêneo e (b) estrutura final com o RVE substituído pelo material equivalente. (adaptado de Barbero, 1999)

Como já mencionado anteriormente, existe uma relação funcional entre as proporções de volume de fibra e matriz com as propriedades mecânicas do compósito. Observa-se que baixas proporções de volume de fibra tendem a ter uma distribuição aleatória da mesma, enquanto altas proporções tendem a formar um empacotamento de forma hexagonal. Segundo Daniel e Ishai (2006) essa relação pode ser expressa na forma:

$$C^* = f(C_f, C_m, V_f, S, A) \quad (2.1)$$

Onde  $C^*$  é a rigidez média do composto,  $C_f$  e  $C_m$  representam, respectivamente, a rigidez da fibra e da matriz,  $V_f$  é a porção de fibra e,  $S$  e  $A$  são parâmetros geométricos que descrevem, o primeiro a forma e, o segundo, a disposição do reforço.

Como mencionado anteriormente, a combinação da fibra e matriz é representada pela micromecânica como um material único, homogêneo e anisotrópico. Assim, a rigidez de um material pode ser representada por cinco propriedades elásticas:  $E_1$ ,

$E_2$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{23}$  e  $\nu_{12}$ , determináveis através da relação de proporção dos elementos no compósito.

Como condição de projeto para os compósitos termoplásticos fibrosos, é de interesse maximizar principalmente o módulo de elasticidade longitudinal. Assim, por sua vez, tem maior resistência, rigidez e possuem deformação máxima bem baixa.

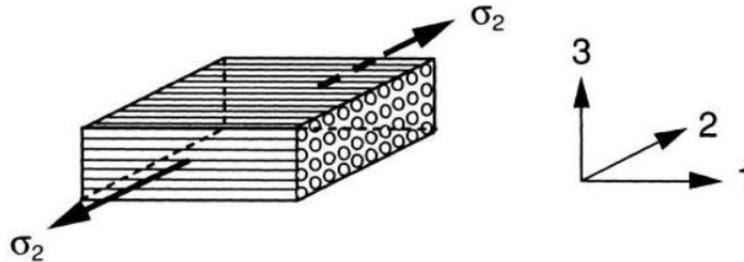


Figura 2.14: Compósito sob tensão de tração transversal. (Daniel e Ishai, 2006)

O módulo de elasticidade longitudinal equivalente ( $E_1$ ) pode ser calculado pelo **princípio da ação combinada**, como segue:

$$E_1 = E_{1f} + E_{1m} \quad (2.2)$$

Essa equação parte da idealização que a lâmina unidirecional é como uma placa, consistindo de fibras alinhadas na seção retangular e alinhadas em série, ou seja, não representa a real condição de geometria da fibra. Tal modelo só é melhorado quando usado teoria de micromecânica mais avançada.

Costuma-se assumir que a ligação entre as fibras e a matriz seja perfeita. Assim, o módulo de elasticidade transversal ( $E_2$ ) pode ser calculado, para um carregamento na direção longitudinal, pela seguinte expressão:

$$E_2 = E_m \left| \frac{1 + \xi \nu V_f}{1 - \nu V_f} \right| \quad (2.3)$$

onde,  $\xi$  = parâmetro obtido por tabelas de ajuste para o caso analítico. Para fibras circulares ou quadradas, um bom valor de  $\xi$  é 2. Para fibras retangulares, uma boa aproximação é  $\xi = \frac{2a}{b}$ , onde  $a$  e  $b$  são dimensões do retângulo na direção de carregamento e perpendicular a elas.

Uma equação menos precisa mas que pode ser usada para se ter um método mais rápido de avaliar o módulo de elasticidade transversal é equação seguinte, calculada pela **regra de misturas**:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_{2f}} + \frac{V_M}{E_m} \quad (2.4)$$

Nessa equação pode-se avaliar como o módulo de elasticidade transversal é radicalmente menor que o longitudinal, uma vez que a fibra praticamente não atua nessa

direção, deixando praticamente toda a resistência decorrente da matriz. Tal qual o módulo de elasticidade, o módulo de cisalhamento plano tem dominância na direção da fibra. A tensão de cisalhamento plano,  $\sigma_6 = \tau_{12} = \tau_{21}$ , deformam o compósito e a reação da lâmina unidirecional sob cisalhamento puro e paralelo às fibras pode ser idealizado como a de um modelo de série de fibras e matriz, como na Figura 2.15.

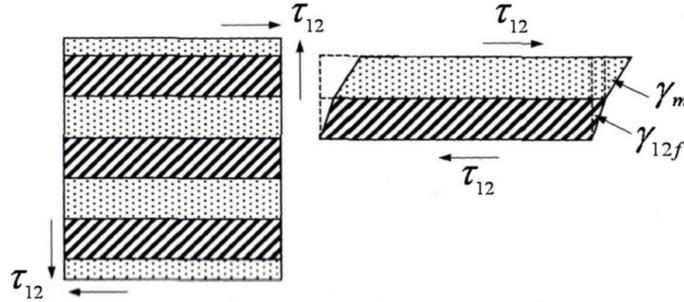


Figura 2.15: Compósito sob carregamento de cisalhamento no plano. (Daniel e Ishai, 2006)

As tensões de cisalhamento das fibras e da matriz estão sujeitas a diferentes deformações  $\gamma_m$  e  $\gamma_{12f}$ . A deformação de cisalhamento média de um volume representativo – RVE, em inglês – é medida pela média do volume das deformações de cisalhamento.

$$\gamma_{12} = \gamma_{12f} + \gamma_m V_m \Rightarrow \frac{\tau_{12}}{G_{12}} = \frac{\tau_{12}}{G_{12f}} V_f + \frac{\tau_{12}}{G_m} V_m \quad (2.5)$$

Ou simplificando:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_{12f}} + \frac{V_m}{G_m} \quad (2.6)$$

Se a fibra possuir um módulo de cisalhamento muito maior que o da matriz, o módulo de cisalhamento plano pode ser aproximado por:

$$G_{12} \cong \frac{G_m}{1 - V_f} \quad (2.7)$$

Para o módulo de cisalhamento interlaminar, a tensão  $\sigma_4 = \tau_{23} = \tau_{32}$  ocorre no plano 2-3, conforme a Figura 2.16 e o módulo de cisalhamento interlaminar pode ser obtido pelo método empírico conhecido como parâmetro de particionamento de tensão. Assim temos:

$$G_{23} = G_m \frac{V_f + \eta_{23}(1 - V_f)}{\eta_{23}(1 - V_f) + V_f \frac{G_m}{G_f}} \quad (2.8)$$

onde,

$$\eta_{23} = \frac{3 - 4\nu_m + \frac{G_m}{G_f}}{4(1 - \nu_m)} \quad (2.9)$$

Por fim, o coeficiente de Poisson pode ser calculado pela equação ROM:

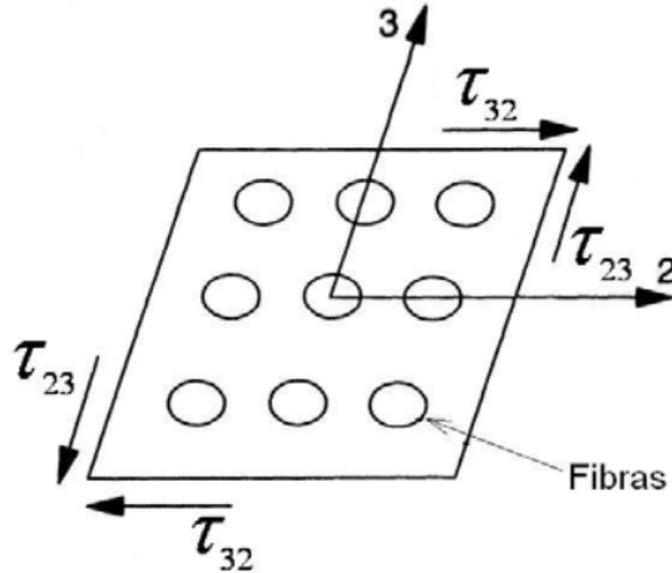


Figura 2.16: Compósito sob tensão interlaminar no plano 2-3. (adaptado de Barbero, 1999)

$$\nu_{12} = \nu_{12_f} V_f + \nu_m V_m \quad (2.10)$$

Considerando que os coeficientes de Poisson da fibra e da matriz são próximos, o compósito também apresenta um valor bem semelhante. Os coeficientes de Poisson são difíceis de se obter por medidas com precisão, então valores aproximados por estimativas são geralmente suficientes para projeto.

### 2.1.3.2 Princípio Básico da Macromecânica dos Matérias Compósitos

Em contraposto ao estudo micromecânico que visa analisar o comportamento do compósito em sua constituição e interação matriz-fibra, o comportamento macromecânico refere-se às propriedades da lâmina apenas quando as propriedades aparentes médias, em sua forma total, são consideradas. Estas propriedades são conhecidas por meio da micromecânica, entretanto com o conhecimento destas propriedades mecânicas, estima-se o comportamento de uma lâmina sob um conjunto de carregamentos combinados, e geralmente aplicados fora das direções principais de ortótropa do material.

Compósitos estruturais são moldados a partir de laminados com diversas camadas empilhadas e em múltiplas orientações de fibras, vide Figura 2.17.

Assim, as orientações das lâminas são definidas a fim de fornecer rigidez e resistência adequadas na direção de aplicação de carregamentos, já que o material compósito é muito mais resistente e rígido na direção da fibra do em qualquer outra. Portanto, o comportamento de um laminado é função das propriedades e da série de empilhamentos das camadas individuais. Como a maior parte das aplicações de

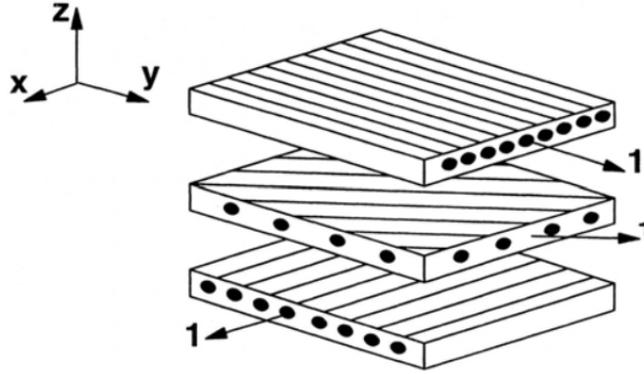


Figura 2.17: Laminado com três camadas e suas direções principais. (adaptado de Barbero, 1999)

compósitos envolvem o uso de placas laminadas finas ou cascas, sob a ação de momentos fletores e carregamentos de alongamento ou compressão, 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. O ponto inicial pode ser considerado o estudo de deformação de um pequeno elemento qualquer retirado do material de uma camada individual. Esse estudo, tensão x 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 (DANIEL e ISHAI, 2006).

Para os materiais isotrópicos, suas propriedades mecânicas podem ser definidas a partir de duas constantes independentes, constar:  $E$  e  $\nu$ . No entanto, para os materiais compósitos de lâminas ortotrópicas, devem ser definidas pelas grandezas elásticas  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$ ,  $\nu_{12}$  e  $\nu_{21}$ , sendo os índices 1 e 2 referentes aos eixos do plano principal do material, conforme Figura 2.18.

Para o desenvolvimento das relações e propriedades macromecânicas, um sistema de coordenadas ortogonais 1-2-3, na Figura 2.18, é definido para cada lâmina. Nesse sistema, o eixo 1 está alinhado com a direção da fibra, o eixo 2 está alinhado ao plano da lâmina e perpendicular às fibras e o eixo 3 está perpendicular ao plano da lâmina e das fibras.

O estado de tensões e deformações nas seis faces do elemento é representado como:

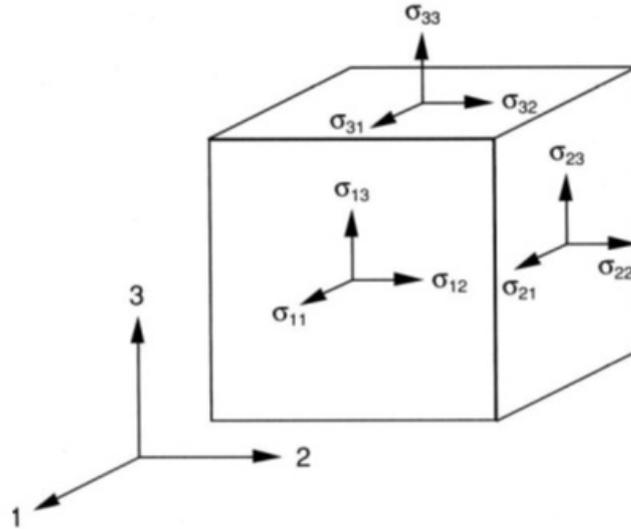


Figura 2.18: Estado de tensão em um elemento de volume (Taniguchi, 2008)

- $\sigma_i = \sigma_{ii}$  (para  $i = 1, 2$  e  $3$ ): tensão normal à uma face e cuja direção é paralela com um dos eixos de coordenada principal.
- $\sigma_{ij} = \tau_{ij}$  (para  $i = 1, 2$  e  $3$ ): tensão de cisalhamento transversal à uma face  $i$  e direção  $j$ .
- $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} = \varepsilon_i$  (para  $i = 1, 2$  e  $3$ ): deformação longitudinal na direção  $i$ .

- Lei de Hooke:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_i}$$

- Coeficiente de Poisson:

$$\nu_{ij} = \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}$$

- Tensão de Cisalhamento:

$$\gamma_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{G_{ij}}$$

Para um material ortótropo com nove constantes elásticas, pode-se expressar as reações de tensão-deformação na forma de matrizes:

► Matriz de Conformidade

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & & & \\ S_{11} & S_{22} & S_{23} & & & \\ S_{11} & S_{11} & S_{33} & & & \\ & & & S_{44} & & \\ & & & & S_{55} & \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

$\{\varepsilon_i\} = [S_{ij}]\{\sigma_j\}$  (para  $i=1, 2, 3, \dots, 6$ ) Substituindo os componentes S's da matriz de flexibilidade pelas propriedades mecânicas dos materiais (coeficiente de Poisson Módulo de elasticidade e cisalhamento), a matriz de conformidade pode ser expressa como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_2} & & & \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & & & \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & -\frac{1}{E_3} & & & \\ & & & \overline{G_{23}} & & \\ & & & & \frac{1}{G_{13}} & \\ & & & & & \frac{1}{G_{21}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

► Matriz de Rigidez

A inversa da Matriz de Flexibilidade [S], a Matriz de Rigidez [C], ou Matriz de Módulo ou Matriz de Elasticidade, pode ser escrita como:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{11} & C_{22} & C_{23} & & & \\ C_{11} & C_{11} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

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

Onde,

$$C_{11} = \frac{S_{22}S_{33} - S_{23}^2}{S} \quad (2.14)$$

$$C_{22} = \frac{S_{33}S_{11} - S_{13}^2}{S} \quad (2.15)$$

$$C_{33} = \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}{S} \quad (2.16)$$

$$C_{12} = \frac{S_{13}S_{23} - S_{12}S_{33}}{S} \quad (2.17)$$

$$C_{13} = \frac{S_{12}S_{23} - S_{13}S_{22}}{S} \quad (2.18)$$

$$C_{23} = \frac{S_{12}S_{13} - S_{23}S_{11}}{S} \quad (2.19)$$

$$C_{44} = \frac{1}{S_{44}} \quad (2.20)$$

$$C_{55} = \frac{1}{S_{55}} \quad (2.21)$$

$$C_{66} = \frac{1}{S_{66}} \quad (2.22)$$

e,

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Ou ainda, usando as constantes do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson , os elementos C's da matriz de rigidez podem ser expressos como:

$$[C_{11} = \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} \quad (2.24)$$

$$[C_{22} = \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} \quad (2.25)$$

$$[C_{33} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} \quad (2.26)$$

$$[C_{12} = \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{13}\nu_{32}}{E_1 E_2 \Delta} \quad (2.27)$$

$$[C_{13} = \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{13}\nu_{32}}{E_1 E_2 \Delta} \quad (2.28)$$

$$[C_{23} = \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{13}\nu_{32}}{E_1 E_2 \Delta} \quad (2.29)$$

$$[C_{44} = G_{23} \quad (2.30)$$

$$[C_{44} = G_{13} \quad (2.31)$$

$$[C_{66} = G_{12} \quad (2.32)$$

e,

$$\Delta = \frac{1}{E_1 E_2 E_3} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_{21} & -\nu_{31} \\ -\nu_{12} & 1 & -\nu_{32} \\ -\nu_{13} & -\nu_{23} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Em aplicações estruturais, os materiais compósitos são submetidos a carregamento no plano do laminado, ou seja, estado plano de tensões. Assim, todas as componentes de tensão na direção 3 são nulos:

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= 0 \\ \tau_{23} &= \tau_4 = 0 \\ \tau_{13} &= \tau_5 = 0 \end{aligned} \quad (2.34)$$

O que leva a matriz de rigidez reduzida:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{21} & 0 & \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (2.35)$$

$\{\sigma\}_{1,2} = [Q]_{1,2}\{\varepsilon\}_{1,2}$  onde:

$$Q_{ij} = C_{ij} - \frac{C_{i3}C_{j3}}{C_{33}} \quad (2.36)$$

(para  $(i,j=1, 2 \text{ e } 6)$  e, cuja matriz de conformidade, a matriz inversa, é escrita como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (2.37)$$

Quando os eixos principais 1-2 da lâmina em um estado plano de tensão não coincidem com um outro sistema global de coordenadas XY, Figura 2.19, torna-se necessário referenciar as tensões e deformações dos eixos principais 1 e 2 em relação aos eixos de carregamentos XY por relações de transformação linear de coordenada, como segue:

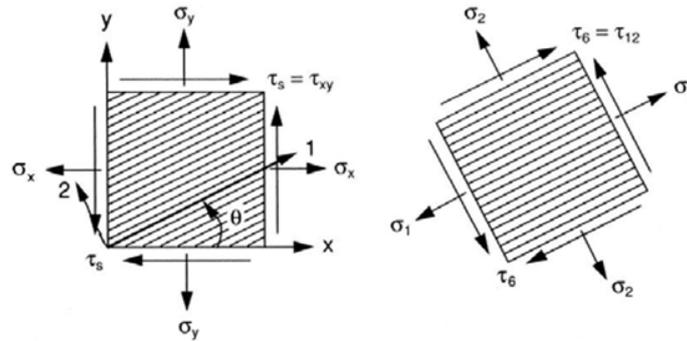


Figura 2.19: Componentes de tensão nas direções principais e globais de coordenadas (Daniel e Ishai, 2006)

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} \quad (2.38)$$

$$\{\sigma\}_{1,2} = [T]\{\sigma\}_{x,y}$$

e,

$$\{\varepsilon\}_{1,2} = [T]\{\varepsilon\}_{x,y}$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_6 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{Bmatrix} \quad (2.39)$$

Onde  $[T]$  é a matriz de transformação,

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \text{ para, } m \cos \theta, n = \sin \theta \quad (2.40)$$

Onde o ângulo  $\theta$  está mostrado na Figura 2.19. A matriz  $[T]$  é uma matriz reversível, cuja inversa é determinada como segue:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (2.41)$$

e,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (2.42)$$

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

$$[T]^{-1} = [T(-\theta)] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & -n^2 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Assim, se a lâmina é carregada ao longo dos eixos XY, então as relações de tensão-deformação tornam-se:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{Bmatrix} \quad (2.44)$$

O que, após as devidas substituições, obtém-se:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & 0 \\ Q_{yx} & Q_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{Bmatrix} \quad (2.45)$$

e,

$$\begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & 0 \\ Q_{yx} & Q_{yy} & 0 \\ 0 & Q_0 & Q_{ss} \end{bmatrix} [T] \quad (2.46)$$

Onde obtém-se os valores da rigidez transformada como função da rigidez principal

da lâmina:

$$Q_{xx} = m^4 Q_{11} + n^4 Q_{22} + 2m^2 n^2 Q_{12} + 4m^2 n^2 Q_{66} \quad (2.47)$$

$$Q_{yy} = n^4 Q_{11} + m^4 Q_{22} + 2m^2 n^2 Q_{12} + 4m^2 n^2 Q_{66} \quad (2.48)$$

$$Q_{xy} = m^2 n^2 Q_{11} + m^2 n^2 Q_{22} + (m^4 + n^4) Q_{12} - 4m^2 n^2 Q_{66} \quad (2.49)$$

$$Q_{xs} = m^3 n^4 Q_{11} + m^3 n Q_{22} - mn(m^2 + n^2) Q_{12} - 2mn(m^2 n^2) Q_{66} \quad (2.50)$$

$$Q_{yx} = mn^3 Q_{11} + m^3 n Q_{22} + mn(m^2 - n^2) Q_{12} + 2mn(m^2 - n^2) Q_{66} \quad (2.51)$$

$$Q_{ss} = m^2 n^2 Q_{11} - m^2 n^2 Q_{22} + 2m^2 n^2 Q_{12} + (m^2 - n^2) Q_{66} \quad (2.52)$$

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

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xs} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{ys} \\ \frac{1}{2}S_{xx} & \frac{1}{2}S_{xx} & \frac{1}{2}S_{xx} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} \quad (2.53)$$

O que depois das substituições obtém:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{Bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} \quad (2.54)$$

e,

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xs} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{ys} \\ S_{sx} & S_{sy} & S_{ss} \end{bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} [T] \quad (2.55)$$

Assim, determina-se a rigidez transformada como função da rigidez principal da lâmina:

$$S_{xx} = m^4 S_{11} + n^4 S_{22} + 2m^2 n^2 S_{12} + 4m^2 n^2 S_{66} \quad (2.56)$$

$$S_{yy} = n^4 S_{11} + m^4 S_{22} + 2m^2 n^2 S_{12} + 4m^2 n^2 S_{66} \quad (2.57)$$

$$S_{xy} = m^2 n^2 S_{11} + m^2 n^2 S_{22} + (m^4 + n^4) S_{12} - 4m^2 n^2 S_{66} \quad (2.58)$$

$$S_{xs} = m^3 n^4 S_{11} + m^3 n S_{22} - mn(m^2 + n^2) S_{12} - 2mn(m^2 n^2) S_{66} \quad (2.59)$$

$$S_{yx} = mn^3 S_{11} + m^3 n S_{22} + mn(m^2 - n^2) S_{12} + 2mn(m^2 - n^2) S_{66} \quad (2.60)$$

$$S_{ss} = m^2 n^2 S_{11} - m^2 n^2 S_{22} + 2m^2 n^2 S_{12} + (m^2 - n^2) S_{66} \quad (2.61)$$

### 2.1.3.3 Teoria cinemática de camadas de compósitos em modelo de cascas

No presente texto, para se compreender o funcionamento dos compósitos fibrosos, é apresentado um modelo analítico para compósitos laminados em formas curvas

(cascas). Varias teorias existem para representar corpos anisotrópicos em camadas de cascas. Algumas dessas teorias são desenvolvidas a partir da formulação de cascas esbeltas baseadas nas hipóteses cinemáticas de Kirchhoff-Love, onde as linhas normais à superfície neutra permanecem inalteradas depois de uma deformação do corpo. Outras teorias de cascas podem ser obtidas através do trabalho de diversos outros cientistas que desenvolveram modelos analíticos para a solução do problema.

Uma casca é um elemento matemático formado pela suposição que duas dimensões são muito maiores que uma terceira e que esta pode ser dispensada da análise. A Figura 2.20(a) mostra uma lâmina de casca curva, onde  $(\xi_1, \xi_2, \zeta)$  denota a coordenada curvilínea e as curvas  $\xi_1$  e  $\xi_2$  são as linhas de curvatura da superfície neutra ( $\zeta = 0$ ). A posição vetorial de um ponto  $(\xi_1, \xi_2, 0)$  na superfície média é denotada por  $\mathbf{r}$ , e a posição de um ponto arbitrário  $(\xi_1, \xi_2, \zeta)$  é denotada por  $\mathbf{R}$ , como visto na Figura 2.20(b).

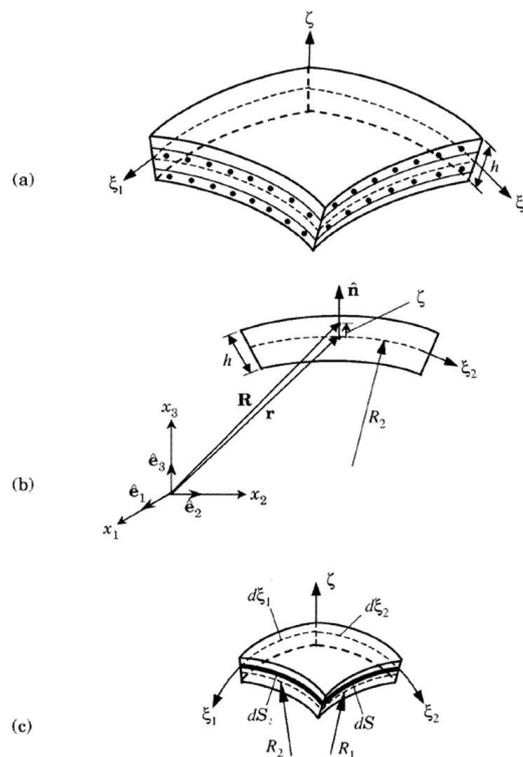


Figura 2.20: Geometria de uma lâmina em casca. (a) Geometria da casca. (b) Posição vetorial de pontos na superfície neutra e acima dela. (c) Um elemento diferencial de uma casca(Daniel e Ishai, 2006).

### Cinética de Cascas

O tensor de força por unidade de comprimento ao longo da coordenada  $\xi_2$  em uma seção perpendicular à coordenada  $\xi_1$ , Figura abaixo, pode ser definido como  $\sigma_{11}dS_2$ . O total do tensor de força em um elemento diferencial na direção  $\xi_1$  pode

ser computada pela integração na espessura total da casca:

$$\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{11} dS_2 d\zeta = a_2 \left[ \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{11} \left( 1 + \frac{\zeta}{R_2} \right) d\zeta \right] d\xi_2 \equiv N_{11} a_2 d\xi_2 \quad (2.62)$$

onde o  $h$  é a espessura total da casca,  $\zeta = -h/2$  e  $\zeta = h/2$  denota o ponto inferior e superior da superfície da casca, e  $N_{11}$  é a força de membrana por unidade de comprimento na direção  $\xi_1$  agindo na superfície perpendicular a essa coordenada, como visto na Figura 2.21:

$$\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{11} \left( 1 + \frac{\zeta}{R_2} \right) d\zeta \quad (2.63)$$

Analogamente o momento atuando na direção  $\xi_2$  é dado por:

$$M_{11} = \int_{-h/2}^{h/2} \zeta \sigma_{11} \left( 1 + \frac{\zeta}{R_2} \right) d\zeta \quad (2.64)$$

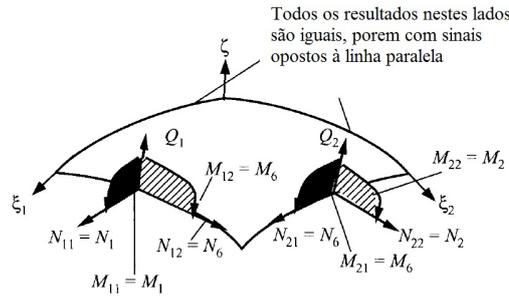


Figura 2.21: Resultante das tensões em um elemento de casca. (modificado de Reddy, 2003)

Assim também, a tensão resultante por unidade de comprimento, Figura acima, pode ser definida como segue:

$$\sigma_1 = \sigma_{11}, \sigma_2 = \sigma_{22}, \sigma_6 = \sigma_{12}, \sigma_4 = \sigma_{23}, \sigma_5 = \sigma_{13} \quad (2.65)$$

$$\begin{Bmatrix} N_{11} \\ N_{22} \\ N_{12} \\ N_{21} \\ M_{11} \\ M_{22} \\ M_{12} \\ M_{21} \end{Bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_2} \right) \\ \sigma_2 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_1} \right) \\ \sigma_6 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_2} \right) \\ \sigma_6 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_1} \right) \\ \zeta \sigma_1 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_2} \right) \\ \zeta \sigma_2 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_1} \right) \\ \zeta \sigma_6 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_2} \right) \\ \zeta \sigma_6 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_1} \right) \end{Bmatrix} d\zeta \quad (2.66)$$

Vale a pena observar que  $N_{\alpha\beta} \neq N_{\beta\alpha}$  e  $M_{\alpha\beta} \neq M_{\beta\alpha}$  para  $\alpha \neq \beta$  ( $\alpha, \beta = 1, 2$ ). No entanto, para cascas com espessuras muito finas, pode-se negligenciar os termos  $\zeta/R_1$  e  $\zeta/R_2$  e obter  $N_{\alpha\beta} = N_{\beta\alpha}$  e  $M_{\alpha\beta} = M_{\beta\alpha}$ . A tensão cisalhante,  $Q_i$ , é definida como:

$$\begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} = K_s \int_{-h/2}^{h/2} \begin{Bmatrix} \sigma_5 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_2} \right) \\ \sigma_4 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_1} \right) \end{Bmatrix} d\zeta \quad (2.67)$$

onde  $K_s$  é um fator de correção denominado como *shear correction factor* que é uma característica decorrente da teoria de cisalhamento de primeira ordem (do inglês: *first-order shear deformation*). **Cinemática de Cascas**

Os componentes da tensão normal e da deformação de cisalhamento em um sistema de coordenadas ortogonal a uma curva é dado por:

$$\varepsilon_i = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{u_i}{A_i} \right) + \frac{1}{A_i} \sum_{k=1}^3 \frac{u_k}{A_k} \frac{\partial A_i}{\partial \xi_k} \quad (2.68)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{A_i A_j} \left( A_i^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{u_i}{A_i} \right) + A_j^2 \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left( \frac{u_j}{A_j} \right) \right) \quad (i \neq j) \quad (2.69)$$

onde,

$$\xi_3 = \zeta, \quad A_1 = \alpha_1 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_1} \right), \quad A_2 = \alpha_2 \left( 1 + \frac{\zeta}{R_2} \right), \quad A_3 = \alpha_3 = 1 \quad (2.70)$$

Substituindo a equação 2.70 nas equações 2.68 e 2.69 e usando de algum algebrismo, obtemos:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= \frac{1}{A_1} \left( \frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} + \frac{1}{a_2} \frac{\partial a_1}{\partial \xi_2} + \frac{a_1}{R_1} u_3 \right) \\
\varepsilon_2 &= \frac{1}{A_1} \left( \frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} + \frac{1}{a_2} \frac{\partial a_1}{\partial \xi_2} + \frac{a_1}{R_1} u_3 \right) \\
\varepsilon_3 &= \frac{\partial u_3}{\partial \zeta} \\
\gamma_{23} &= \frac{1}{A_2} \frac{\partial u_3}{\partial \xi_2} + A_2 \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \frac{u_2}{A_2} \right) \equiv \varepsilon_4 \\
\gamma_{13} &= \frac{1}{A_1} \frac{\partial u_3}{\partial \xi_1} + A_1 \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \frac{u_1}{A_1} \right) \equiv \varepsilon_5 \\
\gamma_{12} &= \frac{A_2}{A_1} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left( \frac{\partial u_2}{A_2} \right) + \frac{A_1}{A_2} \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left( \frac{u_1}{A_1} \right) \equiv \varepsilon_6
\end{aligned} \tag{2.71}$$

No desenvolvimento da teoria das cascas são feitas algumas hipóteses para formular o modelo, são elas:

- A normal transversal é inexistente (i.e.,  $\varepsilon_3 \approx 0$ );
- A flexão da casca é pequena e sua deformação infinitesimal;
- A normal a superfície de referência permanece reta, mas não necessariamente normal depois da deformação;
- A tensão transversal é negligenciada, então a hipótese de tensão plana pode ser assumida.

Condizendo com as hipóteses assumidas para a teoria das cascas, temos então o seguinte campo de deformações:

$$\begin{aligned}
u_1(\xi_1, \xi_2, \zeta, t) &= u_0(\xi_1, \xi_2, t) + \zeta \phi_1(\xi_1, \xi_2, t) \\
u_2(\xi_1, \xi_2, \zeta, t) &= v_0(\xi_1, \xi_2, t) + \zeta \phi_2(\xi_1, \xi_2, t) \\
u_3(\xi_1, \xi_2, \zeta, t) &= w_0(\xi_1, \xi_2, t)
\end{aligned} \tag{2.72}$$

onde  $(u_0, v_0, w_0)$  são os deslocamentos de um ponto  $(\xi_1, \xi_2, 0)$  em relação ao plano médio da casca, e  $(\phi_1, \phi_2)$  são as rotações do plano de referência normal a superfície. Substituindo o campo de deslocamento na relação de deformação-deslocamento 2.71

então se obtém:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= \frac{1}{(1 + \zeta/R_1)}(\varepsilon_1^0 + \zeta\varepsilon_1^1), \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{(1 + \zeta/R_2)}(\varepsilon_2^0 + \zeta\varepsilon_2^1) \\
\varepsilon_6 &= \frac{1}{(1 + \zeta/R_1)}(w_1^0 + \zeta w_1^1) + \frac{1}{(1 + \zeta/R_2)}(w_2^0 + \zeta w_2^1) \\
\varepsilon_4 &= \frac{1}{(1 + \zeta/R_1)}\varepsilon_4^0, \quad \varepsilon_5 = \frac{1}{(1 + \zeta/R_2)}\varepsilon_5^0
\end{aligned} \tag{2.73}$$

onde,

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1^0 &= \frac{1}{a_1} \left( \frac{\partial u_0}{\partial \xi_1} + \frac{1}{a_2} \frac{\partial a_1}{\partial \xi_2} v_0 + \frac{a_1}{R_1} w_0 \right), \quad \varepsilon_2^0 = \frac{1}{a_2} \left( \frac{\partial v_0}{\partial \xi_2} + \frac{1}{a_1} \frac{\partial a_2}{\partial \xi_1} v_0 + \frac{a_2}{R_2} w_0 \right) \\
\varepsilon_4^0 &= \frac{1}{a_2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial \xi_2} + a_2 \phi_2 - \frac{a_2}{R_2} v_0 \right), \quad \varepsilon_5^0 = \frac{1}{a_1} \left( \frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} + a_1 \phi_1 - \frac{a_1}{R_1} u_0 \right) \\
w_1^0 &= \frac{1}{a_1} \left( \frac{\partial v_0}{\partial \xi_1} - \frac{1}{a_2} \frac{\partial a_1}{\partial \xi_2} u_2 \right), \quad w_2^0 = \frac{1}{a_2} \left( \frac{\partial u_0}{\partial \xi_2} - \frac{1}{a_1} \frac{\partial a_2}{\partial \xi_1} v_0 \right)
\end{aligned}$$

#### 2.1.3.4 Análise de Falhas em Materias Compósitos

A análise de falha de um laminado é muito mais complexo do que de uma simples lâmina. O conhecimento da distribuição das tensões nas lâminas individuais são fundamentais para o controle do início da propagação da falha. No entanto, falha de uma lâmina não implica necessariamente na falha de todo o laminado, mas representa o começo da interação e progressão da falha.

A tensão de uma estrutura multicamadas é função de vários fatores. A variação da orientação da lâmina, espessura, resistência, e coeficientes de temperatura e expansão são características que afetam a resistência total do laminado.

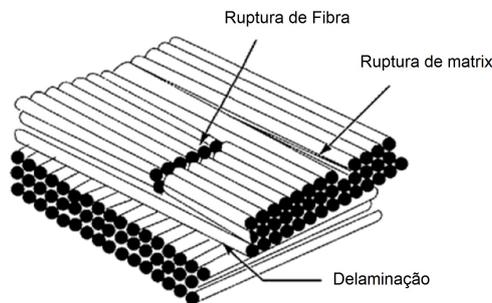


Figura 2.22: Ruptura de uma estrutura laminar em sandwich (adaptado de Gay, Hoa e Tsai 2003).

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 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 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.

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. Neste trabalho serão abordados os critérios que se seguem:

### **Critério de Hill**

Este critério consiste em uma modificação do critério de Von Mises para o escoamento de metais isotrópicos, proposto por Hill (1948), que propõe o seguinte critério:

$$F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(F + G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = \alpha$$

onde reordenando e equação acima temos:

$$(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 + (F + G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = \alpha$$

A equação acima analisa o comportamento de  $\alpha$ . Se  $\alpha$  for menor do que 1, então o material ainda não alcançou o começo da falha sob aquele estado de tensões, nas direções principais do material. As seis constantes, F, G, H, L, M e N, são propriedades do material relacionadas à sua resistência e devem ser obtidas experimentalmente.

Entretanto, para o estado plano de tensões (EPT), podemos considerar  $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{13} = 0$ , sendo que a equação anterior assume a forma:

$$(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (2.74)$$

Deve-se lembrar que as duas equações anteriores aplicam-se no âmbito do comportamento elástico e linear.

Os valores de F, G, H e N podem ser obtidos correlacionados com o conjunto de propriedades padrões, diretamente obtidas experimentalmente. Isto é, com os valores de resistência no plano da lâmina,  $X_t$ ;  $X_c$ ;  $Y_t$ ;  $Y_c$  e  $S$ . Esse correlacionamento é feito aplicando-se sobre um corpo-de-prova um estado de tensões onde apenas  $\tau_{12}$  não é nulo. Em seguida, de forma análoga, apenas  $\sigma_1$  agindo no corpo. Assim, a equação anterior se reduz a:

$$2N = \frac{1}{S^2} \quad (2.75)$$

e,

$$G + H = \frac{1}{X^2} \quad (2.76)$$

Resolvendo as equações anteriores obtém-se:

$$2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} \quad (2.77)$$

### Critério de Hill-Tsai

Critério adaptado para materiais ortotrópicos a partir do critério de von Mises, originalmente para plasticidade de metais. Como os critérios de falhas são meios de se verificar se um dado experimental está ajustado a uma curva, a seguinte equação é usada:

$$\left(\frac{\sigma_1^f}{F_1}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1^f \sigma_2^f}{(F_2)^2}\right) + \left(\frac{\sigma_2^f}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_6^f}{F_6}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_4^f}{F_4}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_5^f}{F_5}\right)^2 = 1 \quad (2.78)$$

Sendo que o sobrescrito  $f$  indica qualquer estado de tensão  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_6, \sigma_4, \sigma_5)$  que produz falha. Todas as tensões de estados de falha obtidos pelas combinações dos cinco componentes de tensão geram uma superfície fechada (envoltório de falha) que separa a região de não-falha e a de falha.

Se somente dois componentes de tensão são iguais à zero, o envoltório gerado pela equação apresenta o formato de uma elipse. Para um dimensionamento em projeto, se um conjunto de tensões em questão, caso ele esteja dentro do envoltório, este material não irá falhar, mas por outro lado não mostra o quanto o projeto é conservador. Se o ponto estiver fora do envoltório, o material falhará sendo que alterações são necessárias, mas a magnitude de alterações necessárias é desconhecida.

Para que se tenha um critério de falha útil, a equação é reescrita utilizando-se o conceito de proporção de resistência (R). Substituindo-se os componentes de tensão no envoltório de falha  $\sigma_i$  por  $R\sigma_i$ , a condição por falha torna-se:

$$\alpha = \left(\frac{\sigma_1}{F_1}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1 \sigma_2}{(F_2)^2}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_6}{F_6}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_4}{F_4}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_5}{F_5}\right)^2 \quad (2.79)$$

Nessa análise de falha da camada de reforço, verifica-se o número Hill-Tsai,  $\alpha$ , para cada uma das camadas.

- Se  $\alpha < 1$  : não ocorre ruptura da camada;
- Se  $\alpha \geq 1$  : ocorre ruptura na camada considerada.

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

**Critério de Tsai-Wu:** Um procedimento simples proposto por Tsai (1971), foi o de aumentar o número de termos na equação do critério de falha de Hill com vistas à melhor aproximação dos dados experimentais obtidos para os vários materiais. De forma geral, a teoria pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^6 F_i \sigma_i + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 F_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 F_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k + \dots = 1 \quad (2.80)$$

Onde,  $\sigma_4 = \tau_{23}$ ,  $\sigma_5 = \tau_{13}$ ,  $\sigma_6 = \tau_{12}$ .

Os coeficientes  $F_i, F_{ij}$  e  $F_{ijk}$  são estruturas rearranjadas dos tensores de 2ª, 4ª e 9ª ordem, respectivamente, isto é,  $F_i$  forma um vetor de 6 componentes,  $F_{ij}$  uma matriz de ordem 6x6, etc. Uma vantagem deste critério é que permite a liberdade para a utilização de tantos termos quanto necessários para a aproximação dos pontos experimentais de um material. Entretanto, uma vez que cada constante está associada a um tipo distinto de ensaio mecânico para a sua determinação, comumente a equação acima restringe-se apenas aos termos de 2º grau. Assim, a equação acima reduz-se a:

$$\sum_{i=1}^6 F_i \sigma_i + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 F_{ij} \sigma_j = 1 \quad (2.81)$$

Uma vez que os termos  $F_{ij}$  são simétricos, e  $\sigma_1 \sigma_j = \sigma_j \sigma_i$ . Isto resulta que a equação anterior é composta por 27 constantes de material a serem experimentalmente determinadas. Restringindo-se ao EPT, podemos simplificar a equação para:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \tau_{12} + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{16} \sigma_1 \tau_{12} + F_{26} \sigma_2 \tau_{12} = 1 \quad (2.82)$$

Nessa equação os termos envolvendo  $F_{12}$ ,  $F_{16}$  e  $F_{26}$  surgem representando as interações entre componentes de tensões normais distintas e também as interações entre componentes de tensões normais e cisalhantes.

O problema consiste, agora, em relacionar os componentes da equação anterior com as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente do material.

Considerando a resistência ao cisalhamento independente do sinal da tensão cisalhante quando aplicada no sistema principal de coordenadas e aplicando os estados de tensão onde  $\tau_{12} = +S$  e  $\tau_{12} = -S$ , temos duas equações:

- Para  $\tau_{12} = +S \Rightarrow F_6 S + F_{66} S^2 = 1$  e,

- Para  $\tau_{12} = -S \Rightarrow -F_6 S + F_{66} S^2 = 1$

Somando e subtraindo estas equações obtém-se que  $F_{66} = \frac{1}{S^2}$  e  $F_6 = 0$ . Repetindo o procedimento agora, aplicando  $\tau_{12} = \pm S$  e  $\sigma_1 = \sigma$  e demais tensões nulas, que resulta em  $F_{16} = 0$ . Da mesma forma, aplicando  $\tau_{12} = \pm S$  e  $\sigma_2 = \sigma_{12}$ , obtém  $F_{26} = 0$ .

Seguindo o processo aplicando à lâmina um estado de tensões em que a única componente não nula de tensão é  $\sigma_1 = X_t$ , obtém-se:

$$F_1 X_t + F_{11} X_t^2 = 1 \quad (2.83)$$

Para a única componente não nula  $\sigma_2 = -X_c$  tem-se:

$$-F_1 X_c + F_{11} X_c^2 = 1 \quad (2.84)$$

Resolvendo o sistema de equações formado pelas duas últimas equações, resolvemos mais duas constantes:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \text{ e } F_{11} + \frac{1}{X_t X_c} \quad (2.85)$$

Analogamente, aplicando isoladamente  $\sigma_2 = Y_t$  e  $\sigma_2 = -Y_c$ , obtém-se as constantes:

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \text{ e } F_{22} + \frac{1}{Y_t Y_c} \quad (2.86)$$

Em vista da dificuldade de obtenção experimental de  $F_{12}$  e da relativa indiferença do critério quanto ao valor exato deste fator, Tsai, S. W., Hahn, H. T. (1980), utilizaram os dados experimentais já existentes e propuseram uma forma direta e aproximada para esse valor, dada por:

$$F_{12} = - \left( \frac{1}{X_t X_c Y_t Y_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.87)$$

A forma final para o critério para EPT é obtida:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (2.88)$$

Substituindo as constantes, tem-se:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) \sigma_1 + \left( \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) \sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \\ & + \left( \tau_{12} S \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}} = 1 \end{aligned} \quad (2.89)$$

Esta expressão indica que o estado de tensões encontra-se num ponto crítico, no limiar da falha da lâmina. Entretanto, se o estado de tensões é tal que o resultado do lado direito é menor que 1, tem-se a situação de segurança. Obtendo-se, como no caso anterior, um coeficiente C de segurança, escreve-se a equação acima na forma:

$$aC^2 + bC + c = 0 \quad (2.90)$$

onde,

$$a = \left( \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) \sigma_1 + \left( \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) \sigma_2 \quad (2.91)$$

$$\frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \left( \frac{12}{S} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sqrt{X_t X_c Y_c Y_t}} \quad (2.92)$$

$$c = -1$$

O coeficiente de segurança é então a menor raiz C que seja maior que 1. Mesmo que não exista nenhuma raiz nesse intervalo, observa-se que qualquer valor de C, desde que positivo, pode ser visto também como um fator de carga, isto é, aquele número que pode ser multiplicado pelas componentes de tensão no ponto para levá-lo ao limiar de falha.

## 2.2 Vasos de Pressão

### 2.2.1 Aplicação

O termo “Vasos de Pressão” pode ser definido genericamente como todo e qualquer tipo de reservatório fechado destinado ao armazenamento e processamento (físico ou químico) de líquido e/ou gás pressurizado ou sujeito a vácuo total ou parcial, Figura 2.33. Geralmente também fazem parte do equipamento do vaso de pressão os seguintes componentes: válvulas, bocais, flanges, plaquetas de identificação, estrutura de sustentação e elementos de conexão.

No entanto, o próprio termo “vaso de pressão”, como também “equipamento de pressão” e “sistema de pressão”, são termos sujeitos a discursão por diversos comitês técnicos legisladores, regulamentadores e normas técnicas. Isso se deve aos diferentes significados empregados em termos técnicos em diferentes países com suas diretivas e normas locais, ou seja, tornando o assunto de alta complexidade e em constante mudança.

Dentre as aplicações típicas de vasos de pressão, pode-se citar: reservatórios industriais, tanques domésticos de água quente, autoclaves, câmaras pneumáticas ou hidráulicas, botijões de gás, cilindros de GNV e GLP, torres de destilação, cilindros

de ar para mergulho, câmaras de descompressão e vasos de reatores nucleares, entre outra enormidade de aplicações.



Figura 2.23: Vaso de pressão horizontal em aço (Taniguchi, 2003)

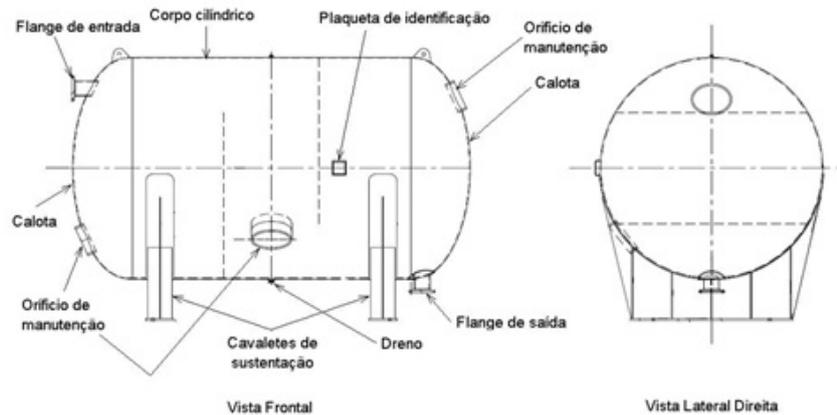


Figura 2.24: Representação genérica de um vaso de pressão (Taniguchi, 2003)

## 2.2.2 Projeto de Vasos de Pressão

Como mencionado anteriormente, os vasos de pressão são equipamentos usados principalmente na indústria, refinarias de petróleo, petroquímicas, alimentícias e farmacêuticas. O projeto de um equipamento desse porte deve garantir diversos requisitos. Esses equipamentos são projetados e fabricados a obedecer condições de trabalho bem específicas. São elas:

- Deformação elástica excessiva, incluindo instabilidade elástica;
- Deformação plástica excessiva, incluindo instabilidade plástica;
- Altas tensões localizadas;
- Fluência a alta temperatura;

- Fratura frágil a baixa temperatura;
- Fadiga;
- Corrosão.

A seleção de materiais de construção 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.

#### 2.2.2.1 Normas e Códigos

Um vaso de pressão deve ser projetado para observar e suportar diversas condições de falha de operação. Devido a uma série de graves acidentes ocorridos com equipamentos desse tipo no começo do século XX, foram criados grupos de trabalho para definir critérios de segurança de projeto, fabricação e inspeção de vasos de pressão e, desta forma, surgiram os códigos de projeto.

As normas e códigos para equipamentos de pressão visam estabelecer regras seguras para o projeto dos mesmos, apresentando metodologia e critérios para dimensionamento, fabricação, realização de exames não destrutivos, além de materiais aplicáveis com respectivas tensões admissíveis.

Em termos gerais, todas as normas possuem suposições técnicas idênticas, porém, na situação prática são diferentes. Isso se deve aos diferentes países e corpos técnicos que conduzem os mesmos tópicos à diferentes conclusões ou enfoques. Entretanto, isso não significa que uma norma ou código esteja certo ou errado (MATHEWS, 2001).

Cada código adota critérios e metodologias próprias. No Brasil, os mais adotados são os americanos ASME *Section VIII, Division 1 e Division 2*, o inglês BS-5500 e o alemão **AD-Merkblätter**. Existem outros códigos importantes como a Divisão 3 do ASME, o francês (SNTC/AFNOR – *Calcul des Appareils a Pression*) e o japonês (JIS).

As seguintes normas e códigos são usualmente adotadas para projeto de vasos de pressão:

- ASME *Boiler and Pressure Vessel Code* (BPVC);
  - ASME *Code Section VIII Division 1*;
  - ASME *Code Section VIII Division 2 Alternative Rules*;
  - 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 Fusin Welded Pressure Vessels*;
- BS EN 13445:2002 – *Unfired Pressure Vessels*;
- CSA B51 – *Boiler, Pressure Vessel and Pressure Piping Code*.

Para o problema analisado nesse trabalho, existe uma norma ISO (do inglês: “*International Organization for Standardization*”) de grande abrangência e uso no mercado nacional e internacional, a ISO 11439:2000: *Gas cylinders – High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles* (Cilindros de gás - Cilindros de alta pressão para armazenamento de gás natural como combustível veicular).

No Brasil, a ABNT NBR 12790:1995 é a norma que classifica os cilindros sem costura para armazenamento e transporte de gases a alta pressão e admite três classes de serviço:

- Classe 1 - Aqueles com capacidade menor ou igual a 450 L e pressão de serviço mínima de 3,2 MPa;
- Classe 2 - Aqueles com capacidade maior que 450 L e pressão de serviço mínima de 3,5 MPa;
- Classe 3 - Aqueles destinados ao armazenamento de gás metano (GMV), onde o gás é usado como combustível no veículo ou, então, para o transporte de gás em cilindros residentes no veículo, para abastecimento dos postos de recarga.

A ISO 11439:2000, como também a MDIC-IMETRO PORTARIA No 74 (2001), admitem 4 tipos de cilindros para armazenamento do GNV, a constar:

- Tipo 1 - cilindros do metal (alumínio ou aço);
- Tipo 2 - cilindros de metal recobertos com fibra (região anular);

- Tipo 3 - cilindros de metal recobertos com fibra (em toda extensão);
- Tipo 4 - cilindros de compósito recobertos com fibra (em toda extensão).

A norma ISO visa promover um guia dos parâmetros mais importantes aos vasos de pressão para transporte e armazenamento de gás natural veicular.

Diferentemente dos cilindros de uso industrial que podem assumir diversos tamanhos e pesos, devido às suas finalidades e aplicações, os cilindros para armazenamento de GNV necessitam ser leves e duráveis. Cilindros industriais podem possuir pesadas estruturas, assim como podem ser projetados para vida infinita e permanecer em serviço até que eventualmente falhem, ou seja, reprovados em testes periódicos ou inspeções visuais. Assim, a norma ISO 11439:2000 visa prover cilindros de pressão para um tempo de vida especificado, considerando o tempo de vida usual de um veículo.

Um segundo conceito adotado pela ISO 11439 é o de desenvolver requisitos de desempenho, ao contrário das normas e regulamentações para cilindros de aplicação industriais que especificam tipicamente os materiais e suas características.

Assim, como os cilindros de GNV são usados somente sob ambientes automotivos, os testes de performance podem ser especificados para a condição do serviço, demonstrando a adequação do projeto à aplicação final.

Além disso, definindo os testes de desempenho, materiais de alta resistência e desempenho podem ser utilizados, reduzindo mais ainda o peso do cilindro.

Uma consideração importante no projeto dos cilindros de GNV é o número de ciclos de pressão que um cilindro pode sofrer durante as operações de enchimento no seu tempo de vida. Os cilindros de GNV sofrem um número significativamente maior de ciclos de pressão do que os seus similares industriais. Os ciclos repetidos de pressurização resultarão eventualmente no aumento das trincas causadas pela fadiga do material. Definiu-se então como pior caso de ciclo de vida de 1000 pressurizações por ano de vida, isto é, 20000 ciclos de pressurização em 20 anos.

Para evitar que defeitos não detectados no material viessem a causar falhas prematuras, a ISO 11439:200 recomenda o uso de inspeção não destrutiva em 100% dos cilindros produzidos, através da varredura da superfície dos cilindros por ultrassom.

Requisitos de teste e projeto garantem que se um cilindro for utilizado além do tempo de vida estipulado e uma falha por fadiga vier a ocorrer, que o cilindro vaze antes de estourar, isto é os cilindros não estouram e sim deixam o gás vazar.

A pressão do estouro de um cilindro foi usada como um indicador da segurança relativa, quanto mais elevada a pressão de estouro, maior a segurança.

Entretanto, para a aplicação de GNV a pressão de estouro não pode ser usada para prever o tempo de vida do cilindro, sua resistência aos efeitos ambientais, sua resistência a danos por impacto ou a resistência das fibras à sobrecarga.

Atualmente esse tipo de teste não é mais requerido como uma verificação aleatória, ou seja, destruição de alguns cilindros em cada lote produzido, ele transformou-se em uma confirmação periódica de que todo o sistema de produção está funcionando corretamente, através de sistemas de qualidade reconhecidos.

Além da ISO 11439:2000 existem outras normas que abrangem outros campos do processo de projeto, fabricação e operação dos cilindros de GNV, que valem a pena serem citados. A constar:

- **ANSI/AGA NGV - 2 - 1998 (2 ed.):** *Basic Requirements for Compressed Natural Gas Vehicles (NGV) Fuel Containers.* (Requerimentos Básicos para reservatórios para GNV);
- **CSA B-51 Part2 - 1995:** *High Pressure Cylinders for on board Storage of Natural Gas as a Fuel for Automotive Vehicle.* (Cilindros de Alta Pressão para Armazenamento on-board de Gás Natural como Combustível para Veículos Automotivos);
- **NBR 13183** - Inspeção e ensaios de cilindros de liga de alumínio sem costura para gases;
- **NBR 13783** - Transporte e Armazenamento de Gás Metano Veicular (GMV) em Alta Pressão - Cilindros em Plástico Reforçados com Selante não-Metálico - Projeto, Fabricação e Inspeção;
- **DOT FRP-1** - *Basic requirements for FRP type 3FC cylinders.* (Requerimentos Básicos para Cilindros tipo 3 de PRF);
- **DOT - CFFC** - *Standard, Carbon-fiber Aluminum Cylinders.* (Cilindros de Fibra de Carvão e Alumínio);
- **CGA FRP 3 - 1988:** *Guidelines for Filament Wind Composite Cylinders with Nonloadsharing Liners.* (Guia para Cilindros Bobinados em Compósitos com Selantes com Função Não Estrutural);
- **PrEn 12245 - 1999:** *Transportable Gas Cylinders - Fully Wrapped Composite Cylinders.* (Cilindros Transportáveis de Gás - Cilindros Totalmente Envolvidos em Compósito);
- **Portaria n o 74 de 29 de Maio de 2001 (MDCIC - INMETRO):** Regulamento Técnico de Cilindros para Alta Pressão para Armazenamento de GMV como Combustível a bordo de Veículos Automotivos;
- **ASME section X - Boiler & Pressure Vessel Code:** *Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessels.*(Vasos de Pressão Reforçados com Fibras Plásticas).

No Brasil, o principal órgão responsável pela normalização e legalização dos cilindros de GNV é Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia, Inmetro. Até 2006, predominava o uso da norma ISO 4705:1983 (do inglês: " *Refilable seamless steel gas cylinders*"), que é uma norma mais genérica e só abrange cilindros de aço, deixando outros materiais de maior resistência e especiais de lado. A partir de 2006 foi decidido em uma reunião do grupo da cúpula do Mercosul a unificação da regulamentação técnica para a adoção da norma ISO 11439:2000 entre seus países membros, com vista a facilitar o comércio de cilindros nesse mercado.

Conforme o Inmetro, a regulamentação técnica do órgão só é permitida a comercialização de cilindros fabricados pela norma ISO 4705 para cilindros de aço-liga sem costura e, para a norma ISO 11439 para cilindros fabricados de aço-liga e de material composto. A norma ISO 4705, publicada em 1983, foi substituída pela ISO, através da norma ISO 9809-1.

Por fim, quanto ao que se refere a normas e códigos para aplicação, manuseio e operação de compósitos em vasos de pressão, somente a ASME seção X

#### **2.2.2.2 Projeto de Vaso de Pressão para GNV**

O projeto de um vaso de pressão consiste no processo analítico de determinação das dimensões gerais do equipamento, na determinação de todos os detalhes do próprio equipamento ou das peças que também fazem parte do mesmo, como também a seleção técnica dos materiais adequados, dos processos de fabricação, detalhes, etc.. Para essa análise diferentes combinações dos carregamentos, para diferentes situações de operação, devem ser levados em conta para se obter um projeto econômico e seguro.

Contrariamente ao que acontece com quase todos os outros equipamentos, máquinas, veículos, objetos e materiais de uso corrente, a grande maioria dos vasos de pressão não é um item de linha de fabricação de alguma indústria, salvo raras exceções, os vasos são, quase todos, projetados e construídos por encomenda (" *taylor-made*"), sob medida, para atender, em cada caso, a determinada finalidade ou a determinadas condições de desempenho. Como consequência, o projeto é quase sempre feito individualmente para cada vaso a ser construído.

Entre as informações a serem determinadas em um projeto de vaso de pressão incluem-se:

- Formato do vaso (cilíndrico, esférico, cilíndrico composto, etc.);
- Dimensões gerais (diâmetros e comprimentos);
- Tipo de tampos (elíptico, cônico, plano, etc.);
- Posição de instalação (vertical, horizontal, inclinada);

- Pressão e temperatura do projeto;
- Diâmetro nominal de todos os bocais ligados a tubulações;
- Posição e elevação dos bocais (somente quando interferem com o funcionamento);
- Tipo, localização, formato, dimensões gerais, espaçamento e detalhes de peças internas (bandejas, vertedouros, grades, recheios, defletores, chicanas, quebravórtices, distribuidores, desnebulizadores, serpentinas, etc.);
- Elevação necessária do vaso (somente quando interferir com o funcionamento);
- Indicação dos bocais para todos os instrumentos ligados ao equipamento;
- Indicação, se necessário, de isolamento térmico ou refratário,
- exigência de não contaminação do fluido contido (quando for o caso),
- exigências especiais, ou não usuais, quanto ao transporte, montagem, desmontagem, manutenção, visita, inspeção ou remoção de peças internas,
- instruções para condicionamento do equipamento para a partida (limpeza especial, por exemplo), quando for o caso. em muitos casos inclui-se também no projeto do processo a indicação básica dos materiais de construção do vaso, bem como dos materiais de peças internas e de revestimentos internos, quando existentes. note-se que não se trata de especificação completa de materiais, que é sempre parte do projeto mecânico. no projeto de processo, o que muitas vezes se faz é a indicação básica, dizendo-se simplesmente, por exemplo, aço-carbono ou aço inoxidável, sem contudo especificar completamente o material. o projeto de processo resulta no desenho de processo do vaso, que são desenhos esquemáticos, sem escala, que são usualmente feitos para vasos de pressão em geral

Assim, a partir das premissas de projeto acima enunciadas, nas seções a seguir será apresentado somente os elementos de projeto para cilindros de GNV dos tipos I, II e III, conforme a ISO 11439:2000, que são os equipamentos necessários para esse projeto.

### **2.2.2.3 Projeto de Cilindro Tipo 1**

O processo analítico de projeto de um vaso de pressão consiste basicamente na determinação ou no cálculo das dimensões gerais do vaso e dos equipamentos que interfiram no seu funcionamento, tudo com base nos dados de processo. Entre as

informações que são essenciais para se iniciar um projeto de um vaso de pressão incluem-se:

- Formato do vaso;
- Dimensões gerais;
- Dimensões do tampo;
- Posição da instalação;
- Pressão e temperatura de projeto;
- Diâmetro nominal de todos os bocais ligados a tubulação;
- Posição e elevação dos bocais

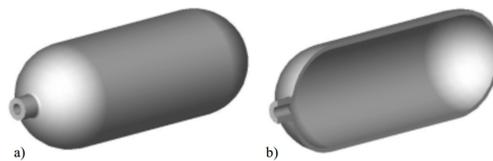


Figura 2.25: Esquema do cilindro GNV tipo I. (a) Vista Isométrica. (b) Vista em corte. (Villena, 2004)

### Reservatório cilíndrico

Na análise de distribuição de carregamento para a geometria cilíndrica de raio interno  $r$  e espessura de parede  $t$  contendo um fluido sob pressão é preciso estabelecer a direção das tensões no elemento infinitesimal (Figura ??). No caso,  $\sigma_c$  e  $\sigma_l$  são as tensões circunferenciais e longitudinais, respectivamente.

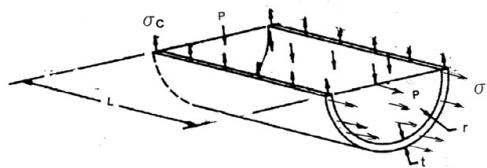


Figura 2.26: Diagrama de tensões no reservatório cilíndrico.

Do equilíbrio tem-se que as forças devidas à pressão são iguais às forças que atuam nas paredes do cilindro:

$$\sigma_l = \frac{P * r}{t} \quad (2.93)$$

onde  $P$  é a pressão de trabalho,  $r$  o raio interno e  $t$  a espessura de parede. No ASME Seção VIII Divisão 1 esta tensão é definida como:  $\sigma_c = \frac{P*r}{t} + 0,6P$

$$\sigma_l = \frac{P * r}{2 * t} \quad (2.94)$$

No ASME Seção VIII Divisão 1 esta tensão é definida como:  $\sigma_l = \frac{P * r}{2 * t} - 0,4P$  Também podem ser projetados vasos de pressão cônicos e esféricos, mas que não serão abordados no contexto desse texto. **Tampo semielíptico**

Quanto ao tampo, para o projeto do vaso de pressão em questão, foi usado um domo elíptico. O tipo elíptico com razão 2:1 (razão entre o comprimento maior com o menor) é conhecido por possuir uma boa distribuição de tensões e possibilidade de fabricação usando sem costura do metal.

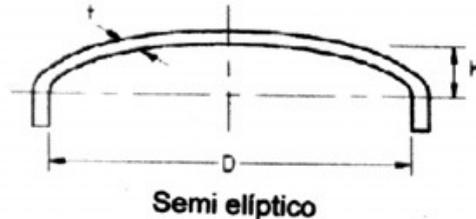


Figura 2.27: Geometria de um domo semielíptico

A aproximação feita pela ASME Seção VIII, Divisão 1 resulta na seguinte formula para a tensão:

$$\sigma = \frac{P * D * K}{2 * t} + 0,1P \quad (2.95)$$

Onde  $K$  é um fator de forma que varia em função da relação  $e$ ,  $D$  é o diâmetro.

O tampo com razão 2:1 possui  $K = 1$ .

#### 2.2.2.4 Projeto de Cilindro Tipo 2 e 3

Os cilindros tipo II e III, apresentam algumas vantagens em relação ao cilindro totalmente metálico tipo I:

- Segurança ("Vazamento antes de explosão");
- Anticorrosivo e longa vida de fadiga;
- 70% Mais leves que os cilindros tipo 1;
- Tipo 3 chega a se 50% mais leves que o tipo 2;
- Alta capacidade de estocagem;
- Mais estáveis que o tipo 4 (Que pode ter problemas de vazamento).

Todavia, a principal desvantagem do uso dos cilindros tipo II, III e IV em relação ao tipo I é o preço. Como a tecnologia do uso de materiais compósitos é mais cara que a do trabalho com metal, o preço de fabricação é sensivelmente maior. A tabela

Tabela 2.2: Exemplo da variação do Peso e Preço em função do tipo de cilindro de pressão. (Disponível em: [www.metal-mate.com/web/dinsorweb/en/product.php?name=ngv\\_cylinder](http://www.metal-mate.com/web/dinsorweb/en/product.php?name=ngv_cylinder), acessado em 08 set. 2012)

	Pressão de Serviço (bar)	Volume (L)	Peso Vazio (Kg)	Preço (Euros)
Tipo 1			89	325
Tipo 2	200	70	62	385
Tipo 3			28	765

abaixo foi obtida de uma fabricante Tailandesa que mostra a variação de peso e preço dos cilindros para gás natural veicular da empresa.

O cilindro tipo II possui espessura inferior, aproximadamente a metade, à do cilindro tipo 1, unicamente metálico. Este, por recebe uma camada de material compósito oferece reforço e compartilha o carregamento devido à pressão interna com o selante metálico. Isto permite a obtenção de um cilindro leve que resiste à pressão interna especificada. No tipo 2, a camada de compósito é bobinada somente sobre a parte cilíndrica do vaso de pressão (Figura 2.28) e, no tipo III ele é bobinado por todo o seu corpo (Figura 2.29).

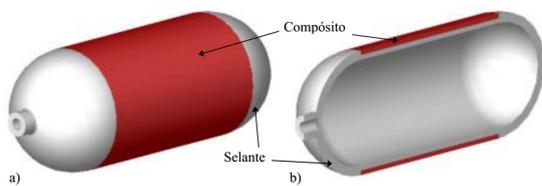


Figura 2.28: Esquema do cilindro GNV tipo 3. (a) Vista Isométrica (b) Vista em corte. (Villena, 2004)

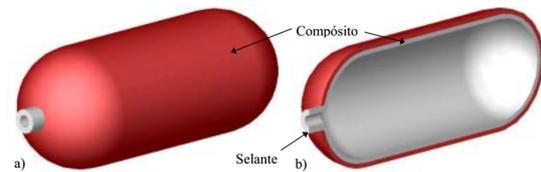


Figura 2.29: Esquema do cilindro GNV tipo 3. (a) Vista Isométrica (b) Vista em corte. (Villena, 2004)

Para a obtenção da espessura total do laminado por cálculo analítico, usaremos nesse trabalho o método análise de rede (do inglês: *netting analysis*) proposto por Gay, Hoa e Tsai (2003) e MIL-HDBK-17-3F (1997). Esse método assume a hipótese que as tensões estruturais induzidas no corpo do selante metálico são todas transferidas para as fibras de reforços, as quais são tensionadas por tração. Outra hipótese é que a parcela de tensão na matriz é desprezada, e sua única função é manter geometricamente a posição das fibras. Esse método apresenta limitadores de não poder ser utilizado para se obter flexão, cisalhamento ou tensões de descontinuidade ou resistência à flambagem para o compósito. 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* (TANIGUSHI, 2003).

Para aplicação da análise de rede para um típico vaso ou cilindro de alta pressão de parede fina (casca de revolução), manufaturado pelo processo FW, com enrolamento helicoidal, conforme o tipo II, os seguintes itens devem ser considerados:

- Raio médio entre o raio externo e o interno do cilindro,  $r_m$ ;
- Espessura  $t$  de parede na parte cilíndrica é muito menor que o raio médio  $r_m$  do cilindro;
- Espessura de uma fibra unitária,  $t_f$ ;
- Pressão interna de serviço:  $p_s$  ;
- Pressão *burst* ou de estouro:  $p_b = \text{fator } xp_s$  (*fator* := valor conforme material de fibra de reforço a ser utilizado, conforme requisito de projeto da ISO 11439);
- Tensões nas paredes  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  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:  $\sigma_l$ .

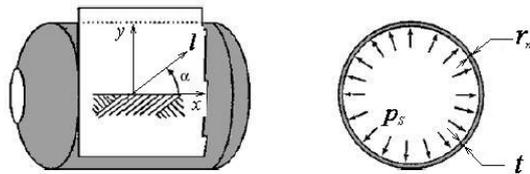


Figura 2.30: Cilindro de alta pressão em *Filament winding* - enrolamento helicoidal (Gay, Hoa e Tsai, 2003).

Pela teoria de membranas, o estado de tensão em uma porção infinitesimal de parede se resume nas tensões longitudinal e circunferencial, nas direções globais  $x$  e  $y$  respectivamente - já visto anteriormente - sendo que a tensão radial é desprezível para efeito de dimensionamento. Entretanto, considera-se essa pequena porção como sendo ortotrópica, ou seja, existência da tensão de tração na direção da fibra  $\sigma_l$ .

As tensões circunferencial e longitudinal das fibras podem ser representadas pela tensão normal pura,  $\sigma_l$ , através de uma transformação pelo círculo de Mohr, conforme Figura abaixo. Assim, obtém-se que:

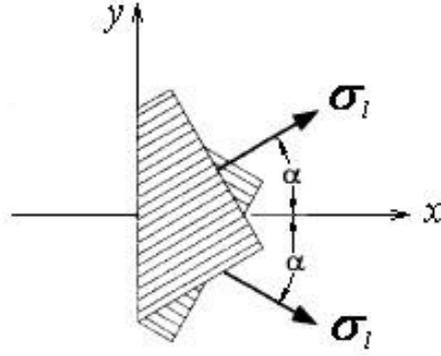


Figura 2.31: Elemento de camada helicoidal - direção axial (Taniguchi, 2003)

$$\sigma_x = \sigma + l \cdot \cos^2 \alpha \quad (2.96)$$

e,

$$\sigma_y = \sigma_l \cdot \cos^2 \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \sigma_l \cdot \sin^2 \alpha \quad (2.97)$$

igualando-se com as tensões circunferenciais e longitudinais presentes na parede temos,

$$\sigma_l \cdot \cos^2 \alpha = \frac{p_b \cdot r_m}{2t_f} \quad (2.98)$$

$$\sigma_l \cdot \sin^2 \alpha = \frac{p_b \cdot r_m}{t_f} \quad (2.99)$$

e dividindo uma equação pela outra obtemos o angulo em que o estado de tensões é uniaxial, de pura tensão de tração nas fibras.

$$\tan^2 \alpha = 2 \Rightarrow \alpha = 54,7 \text{ graus} \quad (2.100)$$

Portanto, a tensão longitudinal na direção das fibras é:

$$\sigma_l = \frac{3p + b \cdot r_m}{2 t_f} \quad (2.101)$$

O que nos leva a espessura mínima de fibras,

$$t_{f-min} = \frac{3 p_b \cdot r_m}{2 \sigma_t} \quad (2.102)$$

A espessura mínima do laminado pode ser obtida dividindo a espessura mínima de fibra pelo volume de fibra,

$$t_{lam} = \frac{t_{f-min}}{v_f} \quad (2.103)$$

A segunda possibilidade de configura do enrolamento das fibras, cilindro tipo III, consiste no enrolamento helicoidal e circunferencial, no qual o enrolamento helicoidal

tem ângulo de enrolamento de  $\pm\alpha_1$  graus e o circunferencial  $\sigma_{l2} = 90$  graus, e as tensões nas fibras helicoidais  $\sigma_{l1}$  e nas fibras circunferenciais  $\sigma_{l2}$ , como visto na Figura 2.34.

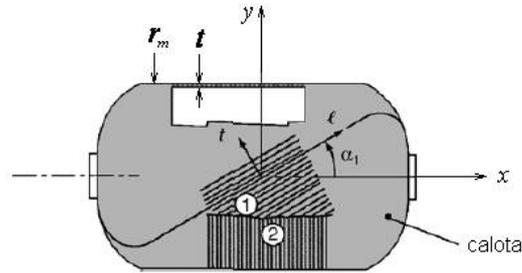


Figura 2.32: Cilindro de alta pressão em *Filament winding* - enrolamento helicoidal e circunferencial (Gay, Hoa e Tsai, 2003).

Adotando-se as mesmas suposições do caso anterior, o estado de tensão devido a pressão interna de serviço é tal que todas as fibras suportam os carregamentos sob tensão de tração e a matriz nenhum carregamento.

Assim, o estado de tensões planas no plano  $x$  e  $y$  pode ser obtido através do círculo de Mohr, conforme Figura abaixo: Para as camadas helicoidais de angulo

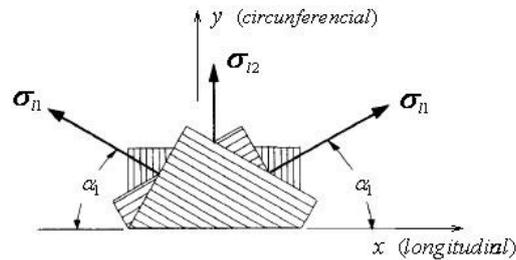


Figura 2.33: Elemento de camada helicoidal - direção circunferencial (Taniguchi, 2003).

$\alpha_1$ , temos:

$$\sigma_{x1} = \sigma_{l1} \cdot \cos^2 \alpha_1 \quad (2.104)$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_{l1} \cdot \sin^2 \alpha_1 \quad (2.105)$$

$$\tau_{xy1} = \cos \alpha_{l1} \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sigma_{l1} \quad (2.106)$$

Para as camadas circunferenciais de angulo  $\alpha_2 = 90$  graus, temos:

$$\sigma_{x2} = 0 \quad (2.107)$$

$$\sigma_{y2} = \sigma_{l2} \quad (2.108)$$

$$\tau_{xy2} = 0 \quad (2.109)$$

Assim, as forças resultantes na seção de largura unitária e normais  $x$  e  $y$  pode ser obtida por: na direção longitudinal  $x$ :

$$\sigma_{x1}.t_{1f}.l + \sigma_{x2}.t_{2f}.l = \sigma_x.t.l \quad (2.110)$$

onde  $t_{1f}$  é a espessura da camada de fibras helicoidal e  $t_{2f}$  a espessura da camada circunferencial. Então,

$$t_{1f} = \frac{p_b.r_m}{2\sigma_{l1}.\cos^2\alpha_1} \quad (2.111)$$

na direção circunferencial  $y$ :

$$\sigma_{y1}.t_{1f}.l + \sigma_{y2}.t_{2f}.l = \sigma_y.t.l \quad (2.112)$$

Então,

$$t_{2f} = \frac{p_b.r_m}{\sigma_{l2}} \left( 1 - \frac{\tan^2\alpha_1}{2} \right) \quad (2.113)$$

Portanto, a espessura mínima de fibras pode ser determinada por:

$$t_{f-min} = t_{1f} + t_{2f} = p_b.r_m \left( \frac{1}{2\sigma_{l1}.\cos^2\alpha_1} + \frac{2 - \tan^2\alpha_1}{2\sigma_{l2}} \right) \quad (2.114)$$

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

$$t_{f-min} = \frac{p_b.r_m}{2\sigma_t} \left( \frac{1}{\cos^2\alpha_1} + 2 - \tan^2\alpha_1 \right) \quad (2.115)$$

$$t_{f-min} = \frac{3 p_b.r_m}{2 \sigma_t} \quad (2.116)$$

$$t_{f-min} = \frac{3 p_b.r_m}{2 \sigma_t} \quad (2.117)$$

em termos de proporção entre espessuras:

$$\frac{t_{1f}}{t_{f-min}} = \frac{1}{2 \cos^2 \alpha_1} \quad (2.118)$$

e

$$\frac{t_{2f}}{t_{f-min}} = \frac{2 - \tan^2 \alpha_1}{3} \quad (2.119)$$

Finalmente, a espessura mínima do laminado pode ser obtida pela razão entre a espessura mínima de fibra pelo volume das fibras:

$$t_{lam-min} = \frac{t_{f-min}}{v_f} \quad (2.120)$$

### 2.2.2.5 Fabricação

O processo de fabricação de cilindros de alta pressão para GNV obedecem a norma ISO 11439:2000 e/ou a ISO4705 que exigem que os cilindros sejam fabricados sem costura, ou seja, não possuam regiões soldadas. Somando isso ao fato do 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 fusão das juntas longitudinais para formação das calotas do cilindro.

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 (MATTEWS, 2001).

Usualmente as chapas metálicas comercialmente mais utilizadas na manufatura dos cilindros metálicos sem costura são os aços AISI 4130, o ASTM A387, o ASTM A 507 e o Alumínio 6061-T6.

Durante a sua fabricação, os cilindros passam pelas seguintes etapas:

1. Laminação(*flow forming*): Essa etapa visa reduzir a espessura de tubos de aço sem costura, para obter uma melhor relação peso/volume do produto final;
2. Corte: Este processo estabelece as bases para o tamanho e a capacidade hidráulica;
3. Conformação: Nessa etapa ocorre o fechamento das calotas do tubo, normalmente pelo processo SPUN;
4. Tratamento Térmico: Incluem os tratamentos térmicos de têmpera, revenido e normalização, de acordo com as propriedades requeridas em cada modelo de cilindro de alta pressão;
5. Usinagem: Operação que inclui o corte do pescoço, a usinagem da rosca de acordo com o mercado de aplicação e a inspeção das peças;
6. Pintura: No final da linha de produção os cilindros são pintados no padrão de cor que determina o tipo de gás a ser armazenado no cilindro. Como também deve ser expirado no interior do equipamento um óleo inibidor de corrosão, para proteção do mesmo.

Durante as etapas de produção, os cilindros são submetidos a uma série de testes para aferir a sua qualidade. Estes testes são determinados pelas normas que englobam esses equipamentos. Os cilindros são submetidos aos seguintes testes:

- Inspeção de Ultrassom;

- Teste dimensional;
- Ensaio hidráulico;
- Verificação de marcação do cilindro e do acabamento (interno e externo).

Por fim, ainda são realizados testes periódicos por amostragem ensaios destrutivos para verificar a qualidade do lote de cilindros fabricados. São eles:

- Ensaio de tração: teste de impacto (Charpy), de dobramento, de achatamento e de ruptura hidráulica para verificar as propriedades mecânicas adquiridas no tratamento térmico;
- Resistência ao fogo: para garantir a integridade que não haverá ruptura do cilindro sob a condição específica de um acidente envolvendo chamas;
- Resistência a projéteis;
- Ensaio ambiental: onde é avaliado se o cilindro vai se comportar como planejado em projeto nas condições ambientais;
- Teste de ruptura hidráulica;
- Teste de ambiente ácido: é avaliado a integridade do cilindro quando este está pressurizado e imerso em um ambiente com 30% de ácido sulfúrico;
- Teste de corrosão: para ligas de alumínio.

Para os cilindros do tipo II e III os processos descritos de (1.) a (6.) devem ser seguidos igualmente e, para a adição da camada de compósitos usa-se normalmente o processo de enrolamento filamentar( *filament winding* ). Comparando com as demais técnicas de fabricação de compósitos estruturais, o processo FW tem baixo custo de produção, elevada produtividade e consistência nas propriedades finais do material obtido, devido ao nível de automação, à velocidade de operação, à pouca perda de material, e à possibilidade de se obter características quase isotrópicas do material. na Figura abaixo está apresentado um exemplo de um equipamento de *FW* para produção de cilindros em compósitos e o detalhe do sistema do banho para a impregnação de resina nos feixes de fibra, que ocorre em uma plataforma que se desloca a uma velocidade controlada, cuja relação com a velocidade angular de rotação do mandril determina a orientação das fibras. O reforço é mantido sob tensão durante o bobinamento, produzido um pressão de compactação nas camadas depositadas de reforço, consolidando o compósito.

Os parâmetros de processo são definidos de forma a desenvolver um cilindro adequado e em atender às necessidades de aplicação. Os principais parâmetros de

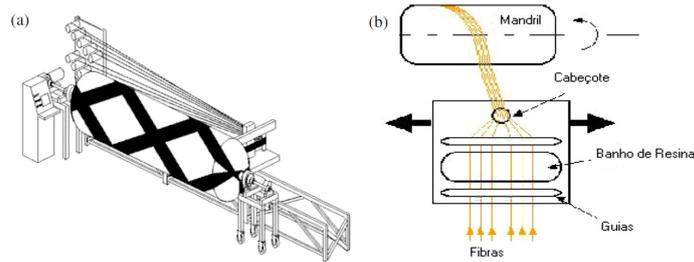


Figura 2.34: Processo de *filament winding* para cilindros. (a) Visão geral do equipamento (b) Detalhe esquemático da impregnação dos feixes de fibra (Adaptado de Neto, 2011)

fabricação que devem ser controlados são temperatura externa ou taxa de aquecimento do processo, tensão na fibra e velocidade de enrolamento. A fabricação de cilindros em compósitos poliméricos consiste em três estágios:

1. Desenho, seleção de material, geometria e orientação das fibras;
2. Tipo de enrolamento da fibra;
3. Seleção e controle dos parâmetros de fabricação

As camadas de reforço pode ser bobinada em ângulos que variam de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do cilindro, Figura abaixo(a). O padrão polar é empregado para cobrir o selante de filamentos com orientação próxima a  $0^\circ$ , longitudinalmente ao eixo do selante, Figura abaixo(a). O filamento passa em torno dos pólos do selante e cada bobinamento completo cobre o selante com uma única camada de reforço. O padrão helicoidal é usado para deitar filamento com ângulos entre  $5^\circ$  e  $80^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do selante, Figura abaixo(b). Os filamentos são bobinados sobre a superfície do selante com orientações alternadas, positiva e negativa, formando uma camada dupla sobre o selante. O padrão circunferencial, Figura abaixo(c), deposita filamentos com orientação próxima a  $90^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do selante e geralmente é aplicado à parte cilíndrica ou reta do selante. Neste trabalho, o padrão considerado se trata de um misto entre os padrões helicoidal e circunferencial, pois se avalia o bobinamento apenas não cilíndrica porém para ângulos diferentes de  $90^\circ$ . Para os cilindros do tipo II, III e IV, além dos testes de amostragem especificados acima para os cilindros tipo I ainda cabe serem avaliados os seguintes itens:

- Teste de tolerância das fibras: a quantidade e dimensões das fibras são avaliadas em uma seção da parede do cilindro para ver se estão atendendo as especificações de projeto;

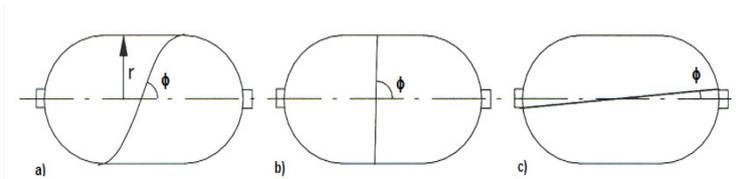


Figura 2.35: Processo de *Tipos de ângulo de enrolamento*. (a) *Helicoidal* (b) *Circunferencial (hoop)* (c) *Polar* (neto, 2011)

- Teste de Fluência: objetiva avaliar se a matriz vai suportar e manter a integridade do compósito mediante altas temperaturas;
- Teste de ruptura;
- Teste de dano ao impacto;
- Teste de penetração;
- Teste de propriedades mecânicas do compósito: as propriedades de limite de escoamento, ruptura e alongação devem ser periodicamente avaliadas;
- Teste de temperatura de amolecimento;
- Teste de revestimento;
- Teste de torção.

# Capítulo 3

## Estudo de Caso

Este capítulo apresenta a modelagem e análise dos estudos de caso deste trabalho. Na primeira parte são apresentados os modelos analisados, assim como os materiais e as definições de projeto para os casos em análise. Em seguida é detalhada a metodologia de análise numérica usando método dos elementos finitos e os detalhes da modelagem computacional. Por fim, os modelos e resultados numéricos obtidos são comparados entre si e com os resultados analíticos.

### 3.1 Introdução

No presente trabalho, um cilindro de gás natural veicular (GNV), tipo comercial, foi adotado como modelo padrão de estudo de dimensionamento quanto a resistência à pressão de trabalho. Tal análise foi realizada por meio de cálculos analíticos e validada por MEF.

Existem diversos fabricantes de cilindros de alta pressão para armazenamento de GNV, como: White Martins, CilgasTech, Inflex CNG dentre tantas outras, a maioria localizados no exterior. O cilindro adotado foi baseado em um cilindro padrão, vendido largamente no mercado brasileiro, utilizado para veículos tipo Sedan, com volume típico em torno de  $15\text{m}^3$ .

As dimensões internas deste mesmo cilindro são utilizadas como referência para a obtenção das diferentes espessuras de parede nas duas outras configurações analisadas e submetidos a mesma pressão de serviço. Uma vez modelados, os cilindros serão comparadas em termos do seu comportamento de resistência mecânica e leveza (menor massa), uma vez que todos os demais parâmetros são os mesmos.

A pressão de serviço é baseada na norma ISO 11439, que estabelecem 200 bar como pressão de serviço (trabalho) e 300 bar como pressão de teste. A pressão de ruptura é determinada conforme o tipo de cilindro, seguindo a seguinte regra para

o modelo adotado: pressão de estouro:

$$P_b = fator * P_s \quad (3.1)$$

onde, o *fator* obedece a seguinte requisito (conforme ISO 11439):

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

$$P_b = 2,5 * P_s \quad (3.2)$$

- CNG-2: cilindro parcialmente recobertos em compósitos (filamento contínuo impregnado com resina e com selante metálico), sendo a pressão de estouro mínima dada pela seguinte regra:

– Selante metálico:

$$P_b = 260bar \quad (3.3)$$

– Fibra de vidro:

$$P_b = 2,75 * P_s \quad (3.4)$$

– Fibra de carbono:

$$P_b = 2,35 * P_s \quad (3.5)$$

- CNG-3: cilindro totalmente recobertos em compósitos (filamento contínuo impregnado com resina e com selante metálico), sendo a pressão de estouro mínima dada pela seguinte regra:

– Selante metálico:

$$P_b = 260 bar \quad (3.6)$$

– Fibra de vidro:

$$P_b = 3,65 * P_s \quad (3.7)$$

– Fibra de carbono:

$$P_b = 2,35 * P_s \quad (3.8)$$

Para o modelamento dos cilindros, foram adotadas algumas simplificações, como segue:

- O cilindro é modelado como um corpo com simetria longitudinal. Assim, somente metade do seu comprimento foi construído;
- Foi excluído a geometria do bocal, focando a análise somente com corpo do cilindro;

- O domo (cabecas do cilindro) foi modelada como sendo elíptica, com espessura de parede constante. Devido a sua simetria radial o cilindro foi dividido e analisado somente em metade do seu comprimento radial.

O calculo das dimensões gerais e das camadas de revestimento com compósito estão mostradas no apêndice A.

Uma representação do cilindro usado encontra-se na imagem abaixo:

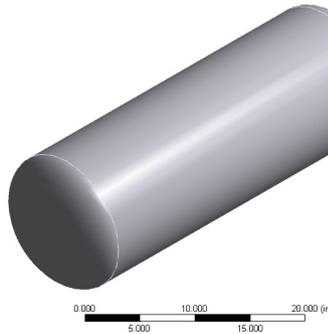


Figura 3.1: Representação completa do cilindro de GNV adotado.

## 3.2 Análise Numérica

No processo industrial de desenvolvimento tradicional de um produto, usado na maioria das empresas, há a tendência de que as avaliações de engenharia sejam bastante reduzidas para uma determinada configuração do produto, devido ao reduzido tempo de projeto de produto. Isso se observa tanto no quesito tempo de projeto quanto na construção de modelos experimentais e de teste. Assim, procura-se favorecer o uso de qualquer método ou instrumento que venha a reduzir o número de testes e protótipos. Um desses métodos é usar projetos similares anteriores como base dos novos. Esse método reduz significativamente o tempo de projeto de produto, mas gera um grau de incerteza que pode vir a promover retrabalho, caso o produto desenvolva algum comportamento não previsto.

Todavia, outro mecanismo de projeto de produto baseado no conceito de engenharia preditiva, segue um enfoque contrário ao do tradicional, o do desenvolvimento de produto rápido RPD (do inglês: *Rapid Process Development*), que consiste em um ciclo de testes e retrabalho de projetos efetuados em protótipos via modelos computacionais. 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. (TANIGUSHI, 2008)

O algoritmo utilizado no processo de análise numérica pode ser simplificado como consistem no seguinte esquema:



Figura 3.2: Fluxograma de uma análise por MEF.

Para o desenvolvimento de um processo RPD, três mecanismos tecnológicos são essenciais para o comprimento desse método:

- Modelagem 3D do sólidos;
- Análise por método dos elementos finitos (MEF);
- Prototipagem rápida: RP (do inglês: *Rapid Prototyping*).

Quanto a modelagem 3D do sólido, as hipóteses e restrições assumidas ao modelo foram explicadas na seção anterior. Em termos de aplicação CAD (do inglês: *Computer-Aided Design*), para a modelagem dos vasos, foi utilizado o software Design Modeler, do pacote ANSYS 14.0. Nele foi realizado um modelo em cascas para representar o comportamento mecânico dos cilindros de pressão. Essa geometria foi projetada baseada nas dimensões gerais internas do equipamento como mencionado anteriormente. Como a grande maioria dos sistemas de modelagem sólida, o programa apresenta a característica de ser totalmente parametrizável, possibilitando alterações de maneira rápida e previsível. Por fim, a espessura de parede, como também sua relação selante x compósito, foram ajustados no programa de MEF, posteriormente. A interface do programa de modelagem CAD com o pacote de Elementos Finitos pode ser feita diretamente, a partir da leitura dos arquivos de saída.

Quanto a análise por elemento finitos, o MEF consiste de uma técnica numérica para determinar uma solução aproximada das equações diferenciais que representam um problema. Essa metodologia aplica-se à todos os meios: contínuos e fluidos. Ela consiste em transformar as equações que representam o problema num sistema de equações discretas, cujas incógnitas são valores pontuais. Em outras palavras, faz-se a aproximação do meio contínuo em um modelo discreto.

A utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) permite simular uma gama vasta de comportamentos. Dentre estes podemos citar:

- Análise de deformações e tensões em peças mecânicas;
- Vibrações mecânicas;
- Transferência de calor (condução, convecção e radiação);
- Problemas de mecânica dos fluidos;
- Fenômenos elétricos, acústicos, etc.

No contexto deste trabalho, o software ANSYS foi utilizado por disponibilizar uma série de ferramentas para modelar análises lineares elásticas, além de permitir configurar todas as características do material compósito e controlar a direção de aplicação das camadas.

O princípio de Prototipagem Rápida de Produto não será aplicada no contexto desse trabalho visto que está além do escopo deste desenvolver um produto.

### **3.2.1 Parâmetros da modelagem em MEF**

A geometria, tanto do selante metálico, quando das camadas de compósitos, foram modeladas usando elementos de casca. No software ANSYS, essa modelagem foi

feita usando o elemento Shell 281, da biblioteca de elementos do programa.

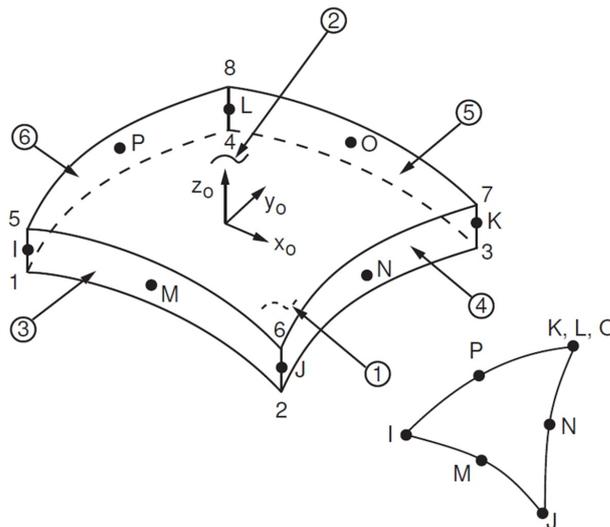


Figura 3.3: Representação de um elemento Shell 281.

asdoffi

O elemento Shell 281 é um modelo utilizado para modelagem de cascas estruturais finas. O elemento apresenta boas respostas analíticas para problemas com carregamentos distribuídos e que apresentem largas deformações. A acurácia da convergência do modelo depende da teoria de primeira ordem de deformação cisalhante (do inglês: *first-order shear-deformation theory*), usualmente conhecida como teoria de cascas de Mindlin-Reissner.

Computacionalmente, o elemento possui por características os seguintes itens:

- Possui 8 nós de integração (I, J, K, L, M, N, O e P), como visto na Figura 3.3. Além desses oito nós, o elemento gera automaticamente um nono nó no centro do elemento;
- Permite a formação de elementos de malha tanto hexaédricos quando tetraédricos;
- Permite a modelagem de camadas de cascas com propriedades distintas em estrutura sandwich. Por exemplo: a partir de uma definição de características do material compósito controlar o ângulo de direção da fibra;
- Possui 6 graus de liberdade/nó: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY e ROTZ;
- Assume composição de materiais com características isotrópicas e anisotrópicas, elásticos e plásticos;
- Recebe carregamentos de pressão e distribuição de temperaturas.

Como condições impostas aos modelos analisados podem-se citar:

- Malha predominantemente hexaédrica;
- Introdução de uma programação interna do programa para garantir o alinhamento dos sistemas de coordenada individual de cada elemento;
- A condição de contato entre o selante e o compósito foi modelada com total restrição de separação dos nós de contato entre os dois corpos.
- Prolongamento do corpo e restrição total dos nós da extremidade dessa extensão, para garantir o equilíbrio estático do corpo.

### 3.2.2 Estudo de Caso: Cilindro Tipo I

O cilindro tipo I (Figura 3.4), adotado como referência e modelo de dimensionamento, foi determinado a partir de seleção das dimensões gerais de um modelo comercial comum e dimensionado para a análise em questão, conforme o Apêndice A.

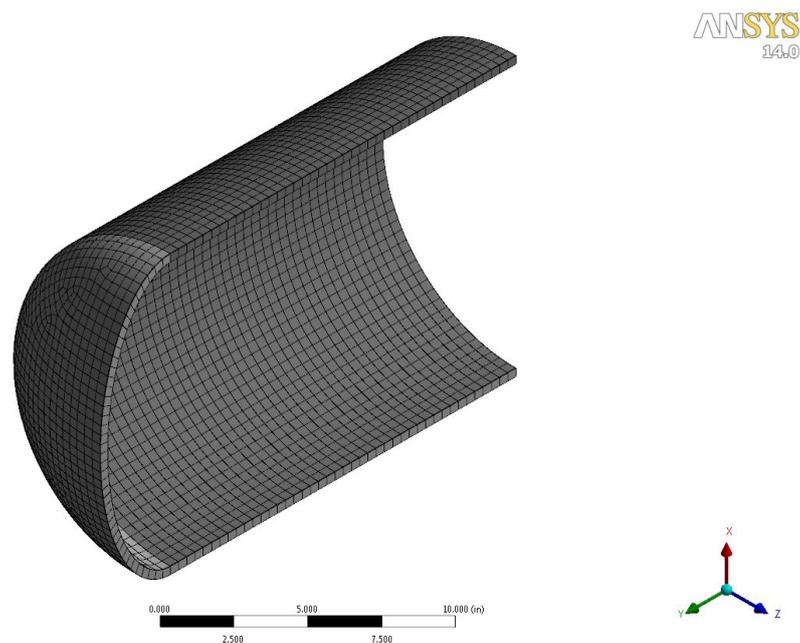


Figura 3.4: Modelo analisado do cilindro tipo I, com malha.

A Tabela 3.1 apresenta as características geométricas e A composição química e as propriedades mecânicas típicas desse material é dada pela tabela abaixo:

#### Condições de contorno:

- Carregamento de Pressão (pressão interna):

Tabela 3.1: Características do cilindro tipo I

Diâmetro interno:	340 mm
Comprimento interno:	840 mm
Espessura de Parede:	8,5 mm
Tipo de calota:	elíptica
Razão da calota:	2:1
Capacidade $H_2O$ :	66 L
Mateiral:	Aço 30 CrMo
Peso:	71 Kg

Tabela 3.2: Propriedades do aço 30CrMo usado no corpo do cilindro (Obtidas em: www.keytometals.com)

Definição Numérica:	A30302
Subgrupo:	GB 13447 (2008) Steel blank for seamless gas cylinder
Propriedades Químicas	
Carbono (C):	0.26-0.34 %
Manganês (Mn):	0.4-0.7 %
Fósforo (P):	-0.02 %
Enxofre (S):	0.02 %
Silício (Si):	0.17-0.37 %
Cromo (Cr):	0.8-1.1 %
Níquel (Ni):	-0.2 %
Molibdênio (Mo):	0.15-0.25 %
Propriedades Mecânicas	
Limite de escoamento $S_y$ :	121 ksi
Resistência a Tração $S_{ut}$ :	142 ksi
Alongamento:	12 %
Impacto:	46 ft.lbf
Densidade:	7820 $Kg/m^3$

- Condição de serviço: 200 bar;
- Condição de teste: 300 bar;
- Condição de estouro: 450 bar (2,5 vezes a pressão de serviço).

- Fixação da estrutura na extremidade oposta ao domo elíptico.

No resultado obtido para o carregamento de operação (Figuras 3.5), observa-se um valor máximo de 82 ksi no começo da calota do cilindro.

Esse valor está abaixo do valor de tensão de escoamento do material 30 CrMo (110 ksi), o cilindro resiste à tensão circunferencial (mais crítica) devida a pressão de serviço, ou seja, a espessura mínima calculada está validada pelo MEF.

As tensões, conforme a Figura 3.6, atingem um valor máximo de 123 ksi (apresentando uma leve plastificação), na região do domo inferior, devido às transições

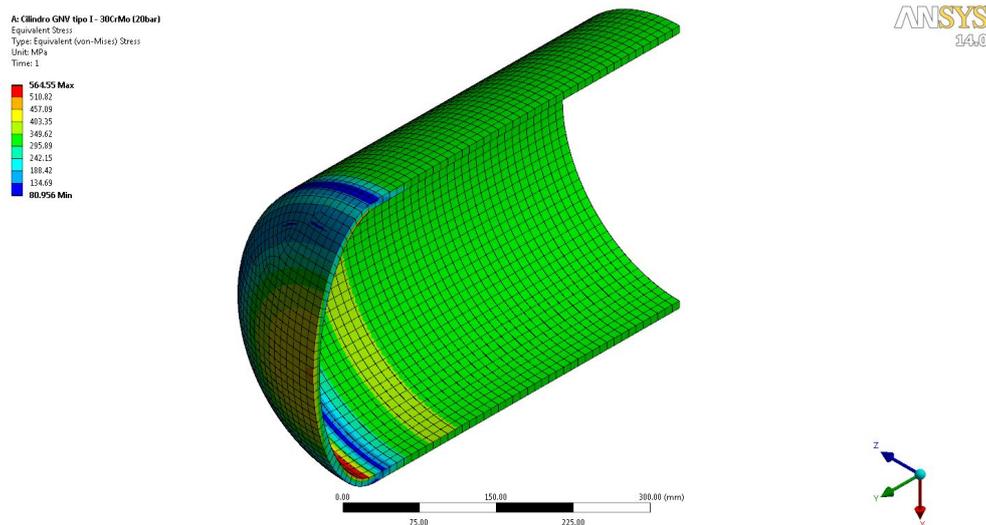


Figura 3.5: Critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo I, submetido à pressão interna de 200 bar.

de geometria encontradas ao longo desta região. Na parte cilíndrica encontram-se valores de tensão em torno de 80 ksi. No cilindro todo, considera-se que os valores ainda são satisfatórios.

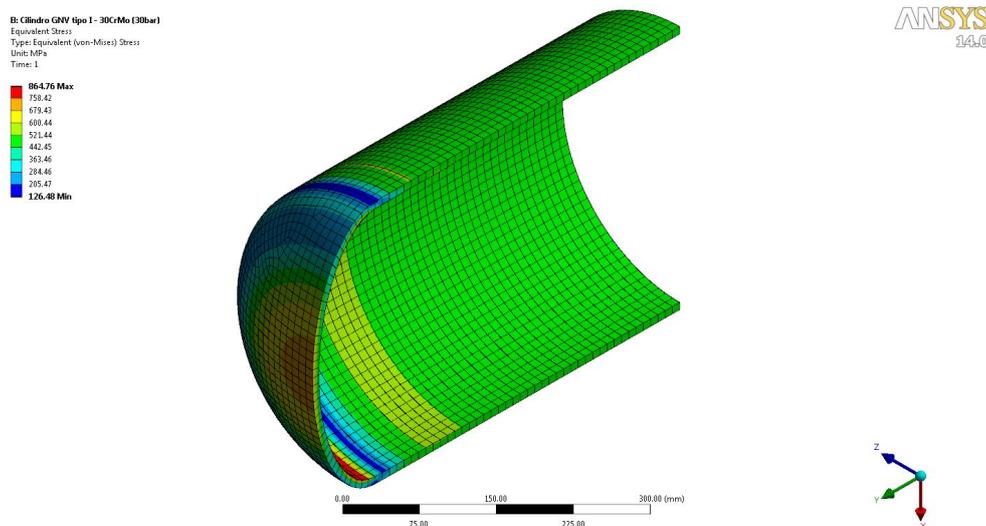


Figura 3.6: Critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo I, submetido à pressão interna de 300 bar.

Ao se aplicar a pressão burst de 450 bar, o cilindro apresenta falhas de ruptura devido ao alto fator de segurança conforme o requisito CNG-1 (norma ISO 11439) Figura 3.7, ou seja, na parte cilíndrica a tensão atinge 177 ksi (no regime elástico), no começo da região do domo observa-se uma tensão entre 70-80 ksi, reduzida em relação ao resto do corpo.

Vale lembrar, contudo, que esse resultado é decorrência da simulação perfeitamente elástica do material, sem plastificação, o que mascara o valor de tensão

máxima obtida, uma vez que se espera um valor bem inferior para uma análise elasto-plástica. Outra simplificação realizada é quanto a 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.

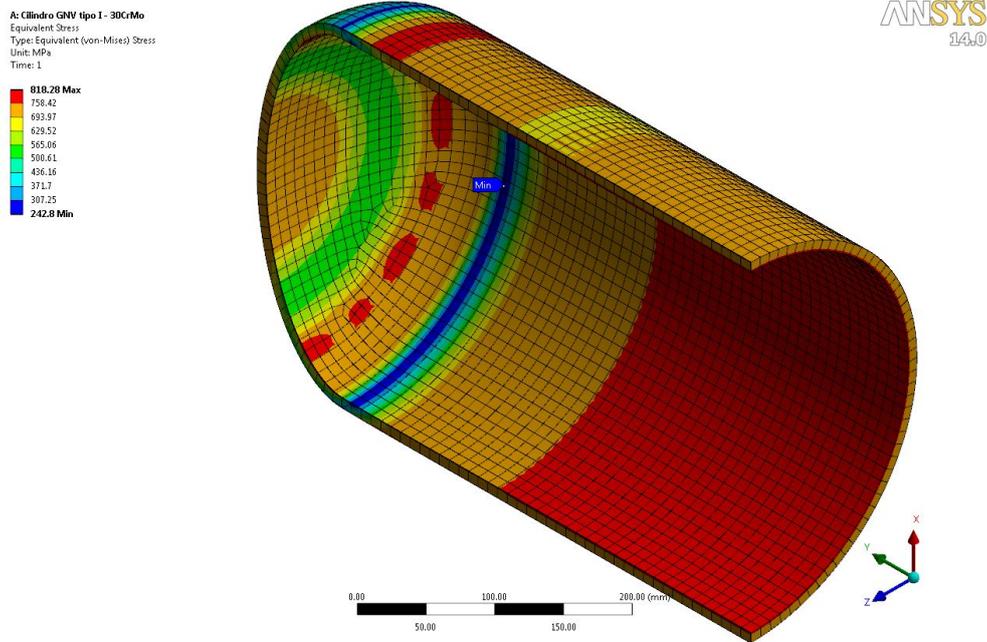


Figura 3.7: Critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo I, submetido à pressão interna de 450 bar.

### 3.2.3 Estudo de Caso: Cilindro Tipo II

O cilindro tipo II (Figura 3.8) adotado, utiliza como referência para o selante o material usado no primeiro caso e, como referência e modelo de dimensionamento, foi determinado a partir de seleção das dimensões gerais de um modelo comercial comum e dimensionados para a análise em questão, conforme o Apêndice A. A

Diâmetro interno:	340 mm
Comprimento interno:	840 mm
Espessura de Parede: do aço	7,3 mm
Espessura de Parede: do compósito	5,3 mm
Ângulo de enrilamento:	45°
Tipo de calota:	elíptica
Razão da calota:	2:1
Capacidade $H_2O$ :	66 L
Mateiral:	Aço 30 CrMo Fibra de vidro/epóxi

composição química e as propriedades mecânica típica do material compósito é dada pela tabela abaixo:

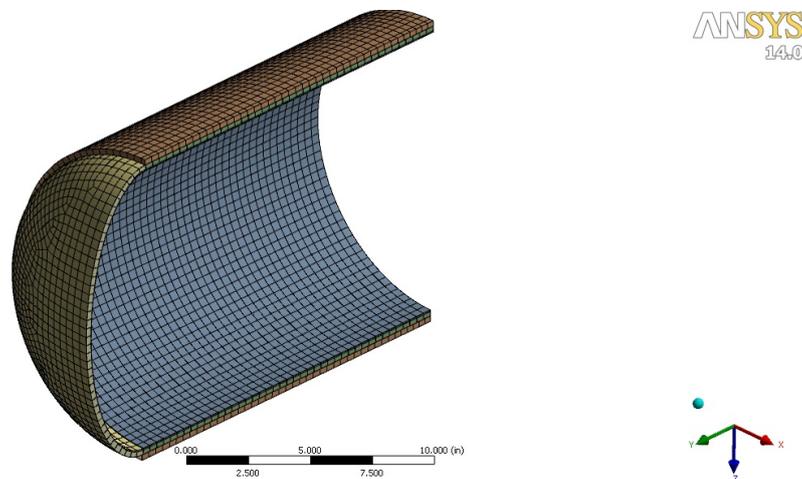


Figura 3.8: Modelo analisado do cilindro tipo II, com malha.

#### Condições de contorno:

- Carregamento de Pressão (pressão interna):
  - Condição de serviço: 200 bar;
  - Condição de teste: 300 bar;
  - Condição de estouro: 500 bar.

Tabela 3.4: Propriedades do compósito usado no corpo do cilindro (Daniel e Ishai, 2003)

Característica típica:	material ortotrópico
Fração volumétrica: de fibra ( $v_f$ )	0,55
Massa específica( $\rho$ ) :	1,97 g/cm <sup>3</sup>
Propriedades Mecânicas	
Módulo de elasticidade: longitudinal ( $E_1$ )	41 GPa
Módulo de elasticidade: transversal ( $E_2$ )	10,4 GPa
Módulo de cisalhamento: no plano ( $G_{12}$ )	4,3 GPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ):	0,28 e 0,06
Resistência à Tração: longitudinal ( $F_{2t}$ )	39 MPa
Resistência ao cisalhamento: no plano ( $F_6$ )	89 MPa
Resistência a compressão: longitudinal $F_{1c}$	620 MPa
Resistência a compressão: transversal ( $F_{2c}$ )	128 MPa
Propriedades Mecânicas da fibra de vidro E	
Módulo de elasticidade: longitudinal ( $E_{1f}$ )	73 GPa
Módulo de elasticidade transversal ( $E_{2f}$ )	73 GPa
Módulo de cisalhamento: longitudinal ( $G_{12f}$ )	30 GPa
Módulo de cisalhamento: transversal ( $G_{23f}$ )	30 GPa
Resistência a tração ( $F_{1tf}$ ):	3450 MPa

- Fixação da estrutura na extremidade oposta ao domo elíptico.

No resultado obtido para o carregamento de operação (Figuras 3.9), observa-se um valor máximo de 80 ksi no centro da calota do cilindro. Esse valor está abaixo do valor obtido na Figura 3.5, para o cilindro tipo I, e encontra-se abaixo da tensão de escoamento do material 30 CrMo (110 ksi) e do compósito. O cilindro resiste à tensão circunferencial (mais crítica) devido à pressão de serviço, ou seja, a espessura mínima calculada está validada pelo MEF.

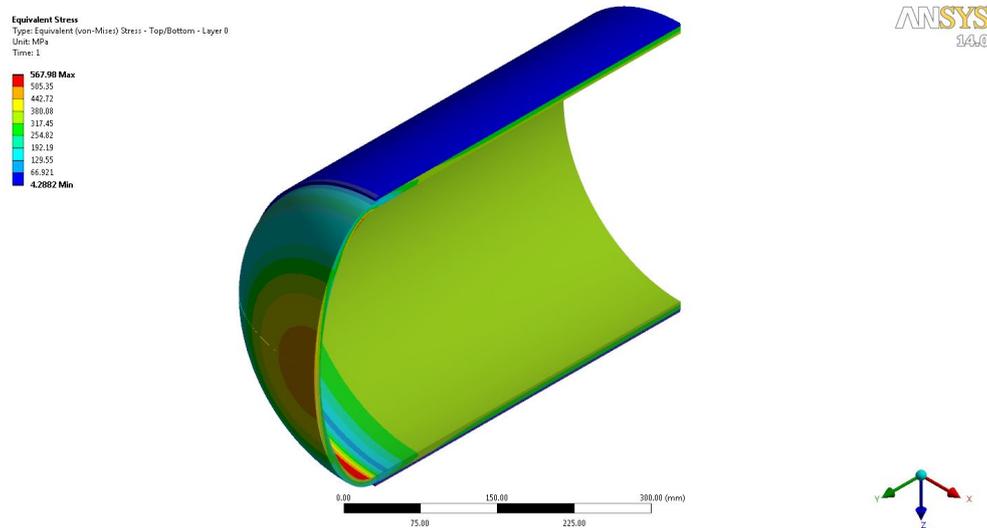


Figura 3.9: Critério de tensões de Von Mises (Psi) do cilindro tipo II, com revestimento helicoidal de compósito, submetido à pressão interna de 200 bar.

As tensões, conforme a Figura 3.11, atingem um valor máximo de 130 ksi (apresentando uma leve plastificação), na região circunferencial do domo, devido às transições de geometria encontradas ao longo desta região. Na parte cilíndrica encontram-se valores de tensão em torno de 80 ksi. No cilindro todo, considera-se que os valores ainda são satisfatórios.

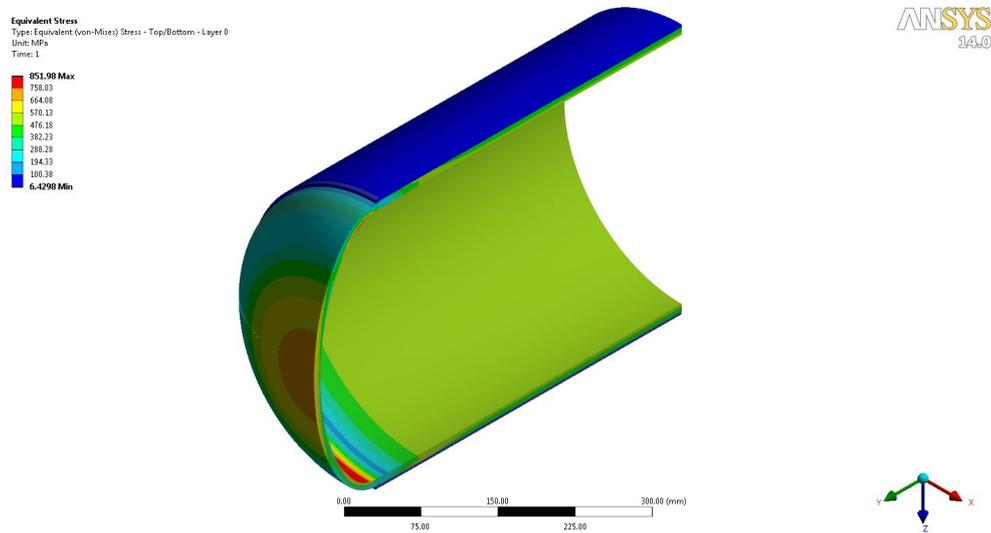


Figura 3.10: Distribuição no critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo II, com revestimento helicoidal de compósito, submetido à pressão interna de 300 bar.

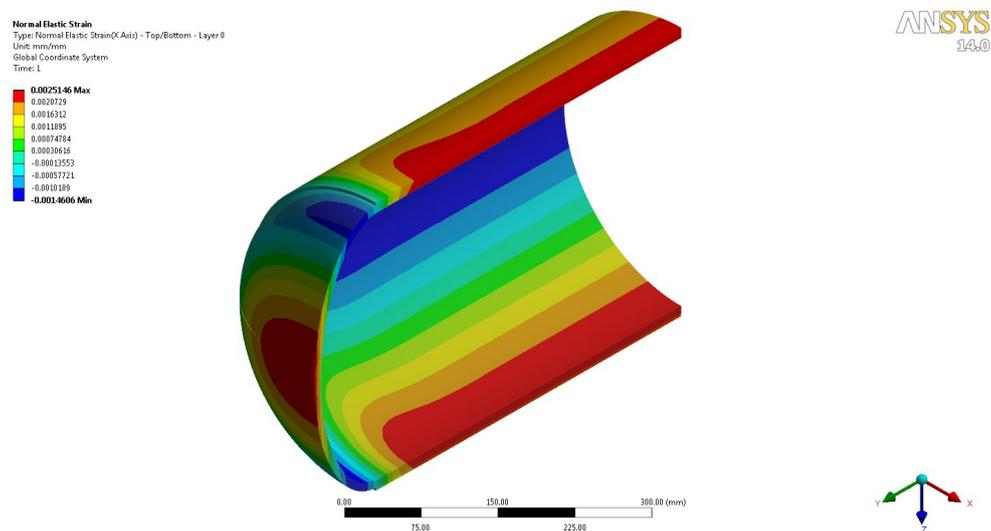


Figura 3.11: Deformações do cilindro tipo II, para espessura de compósito de 5,3 mm, sob pressão de teste.

Ao se aplicar a pressão burst de 500 bar, o cilindro apresenta uma tensão máxima de Von Mises de 180 ksi no topo da calota, apresentando falha de ruptura, conforme a Figura 3.12. No começo da região do domo observa-se uma tensão entre 45-75 ksi, reduzida em relação ao resto do corpo.

Vale lembrar, que assim como modelo anterior, esse resultado é decorrência da simulação perfeitamente elástica do material, sem plastificação, o que mascara o valor de tensão máxima real, uma vez que se espera um valor bem inferior do que o obtido para uma análise com material elasto-plástica.

Também, tal qual no primeiro modelo, poder-se-ia simular novamente o vaso considerando uma espessura maior dos domos.

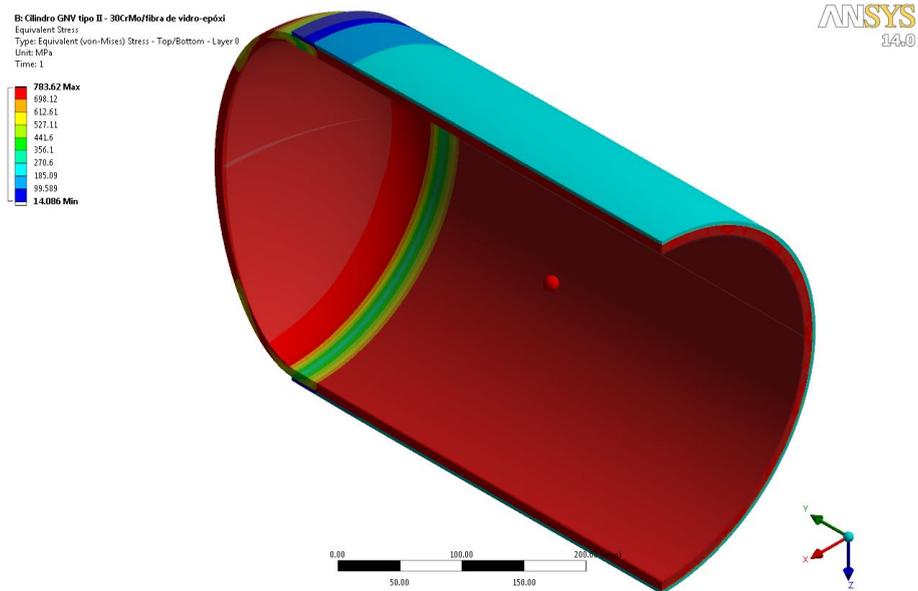


Figura 3.12: Distribuição no critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo II, com revestimento helicoidal de compósito, submetido à pressão interna de 500bar.

### 3.2.4 Estudo de Caso: Cilindro Tipo III

O cilindro tipo III (Figura 3.13) adotado, utiliza como referência para o selante o material usado no primeiro caso e, como referência e modelo de dimensionamento, foi determinado a partir de seleção das dimensões gerais de um modelo comercial comum e dimensionados para a análise em questão, conforme o Apêndice A. O

Tabela 3.5: Características do cilindro tipo III

Diâmetro interno:	340 mm
Comprimento interno:	840 mm
Espessura de Parede: do aço	5,3 mm
Espessura de Parede: do compósito	6,3 mm
Ângulo de enrilamento:	45°
Tipo de calota:	elíptica
Razão da calota:	2:1
Capacidade $H_2O$ :	66 L
Material:	Aço 30 CrMo Fibra de vidro/epóxi

cilindro tipo III utilizado nessa análise utiliza o mesmo tipo de compósito usado para o modelo tipo II e sob as mesmas condições de carregamento. **Condições de**

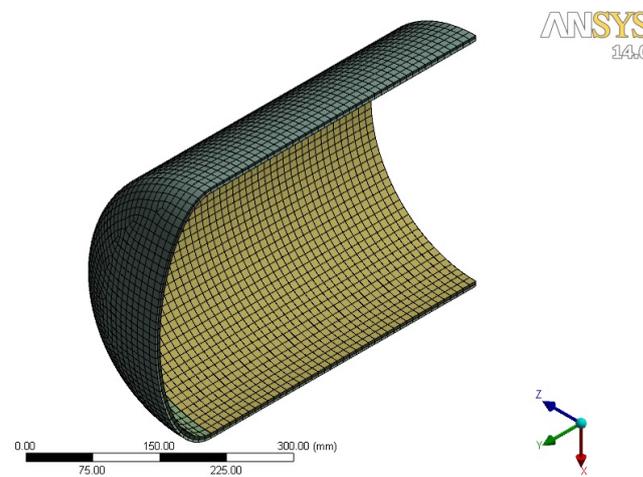


Figura 3.13: Modelo analisado do cilindro tipo III, com malha.

#### contorno:

- Carregamento de Pressão (pressão interna):
  - Condição de serviço: 200 bar;
  - Condição de teste: 300 bar;
  - Condição de estouro: 500 bar.

- Fixação da estrutura na extremidade oposta ao domo elíptico.

No resultado obtido para o carregamento de operação (Figuras 3.14), observa-se um valor máximo de 80 ksi no centro da calota do cilindro. Esse valor está abaixo do valor obtido na Figura 3.5, para o cilindro tipo I, e encontra-se abaixo da tensão de escoamento do material 30 CrMo (110 ksi) e do compósito. O cilindro resiste à tensão circunferencial (mais crítica) devido à pressão de serviço, ou seja, a espessura mínima calculada está validada pelo MEF.

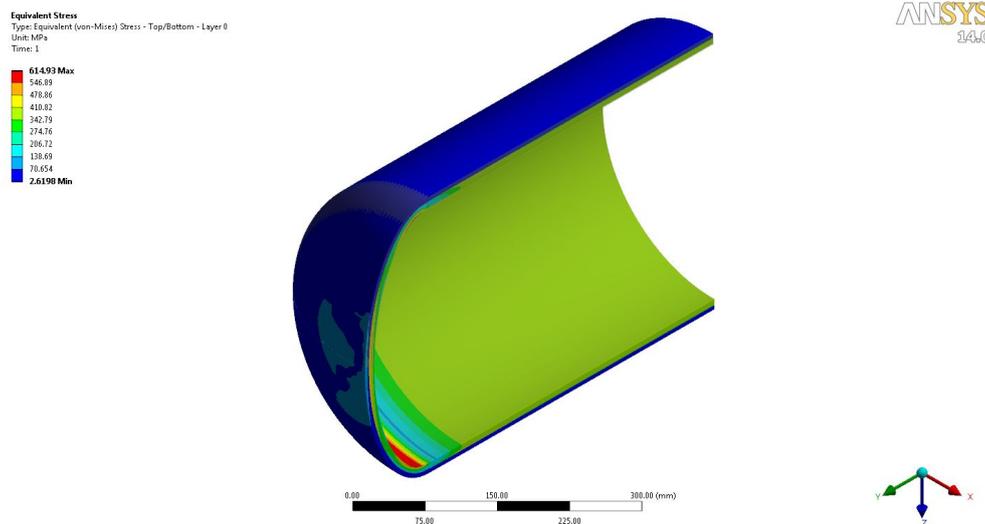


Figura 3.14: Critério de tensões de Von Mises (Psi) do cilindro tipo III, com revestimento helicoidal e circunferencial de compósito, submetido à pressão interna de 200 bar.

As tensões, conforme a Figura A.2, atingem um valor máximo de 130 ksi (apresentando uma leve plastificação), na região circunferencial do domo, devido às transições de geometria encontradas ao longo desta região. Na parte cilíndrica encontram-se valores de tensão em torno de 80 ksi. No cilindro todo, considera-se que os valores ainda são satisfatórios.

Ao se aplicar a pressão burst de 500 bar, o cilindro apresenta uma tensão máxima de Von Mises de 269 ksi no selante metálico, apresentando falha de ruptura, conforme a Figura 3.16. No revestimento compósito as tensões se mantiveram abaixo de 60 ksi, reduzida em relação ao resto do conjunto.

Vale ressaltar, que assim como nos modelos anteriores, esse resultado é decorrência da simulação perfeitamente elástica do material, sem plastificação, o que mascara o valor de tensão máxima real, uma vez que se espera um valor bem inferior do que o obtido para uma análise com material elasto-plástica.

Também, tal qual no primeiro modelo, poder-se-ia simular novamente o vaso considerando uma espessura maior dos domos.

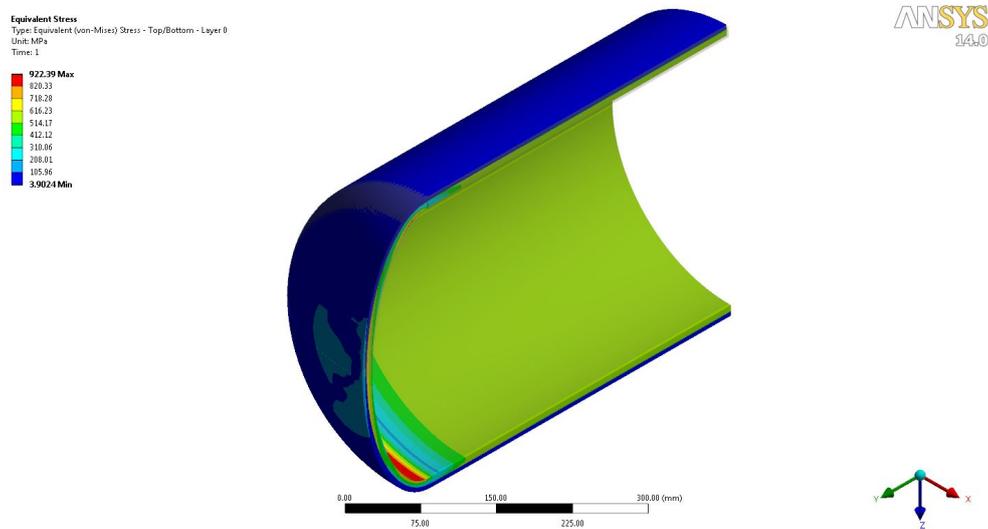


Figura 3.15: Critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo III com revestimento helicoidal e circunferencial de compósito, submetido à pressão interna de 300 bar.

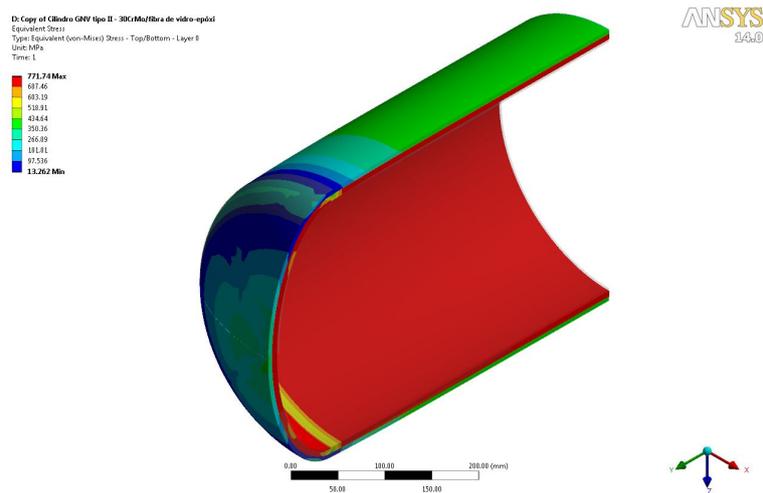


Figura 3.16: Critério de Von Mises (Psi) do cilindro tipo III com revestimento helicoidal e circunferencial de compósito, submetido à pressão interna de 500bar.

# Capítulo 4

## Discursão dos Resultados

Este capítulo trata da análise dos dados decorrentes das análises numéricas e analíticas referentes ao capítulo anterior para os cilindros de GNV mensurados nesse trabalho.

### 4.1 Comparação dos Resultados

Primeiro, deve-se comentar que o presente trabalho conseguiu reproduzir, através de uma modelagem geométrica 3D e iterações de análise numérica, um cilindro totalmente em metal 30 CrMo com características similares a modelos vendidos no mercado. Tais características são básicas e de fácil acesso em normas e códigos internacionais (ver Apêndice A). A aceitação de um cilindro com espessura de parede 8,8 mm resistindo a pressão burst (requisito da CNG-1, norma ISO 11439), dimensionamento através de cálculo analítico pelo uso da norma ASME seção VIII divisão I, se faz pela massa obtida de um cilindro de 71 kg que está bem próximo das características de espessura de parede e massa dos modelos do mercado. Esse valor ainda é um pouco irreal, visto que não foram considerados as geometrias do domo e nem variações da espessura do cilindro. No entanto, 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 revestidos em compósitos apresentados neste trabalho não estão disponíveis em catálogos dos fabricantes para que possam ser comparados e validados com algum modelo industrial. Essa limitação se deve principalmente em termos das condições de projeto admitidas para o estudo, onde todos os cilindros estudados foram dimensionados considerando uma única geometria interna, conforme o seção 2.2.2.2. Assim, os modelos analisados são somente para estudos preliminares de viabilidade estrutural conforme já mencionado anteriormente.

O cilindro, tipo II, revestido de compósitos (fibra de vidro tipo E com matriz epóxi) na região anular, pela característica de fator de segurança (requerido da

CNG-2, norma ISO 11439:2000) aplicado a pressão de **burst** de 500 bar, apresenta as melhores relações de tensão x deformação; no entanto, a maior relação de peso: 78 Kg. Isso se deve a modelagem do cilindro não permitir alteração da espessura de parede no decorrer do domo. Essa limitação faz com que o cilindro tipo II modelado tenha que ter a mesma espessura do cilindro tipo I e ainda seja revestido com uma parede de compósitos. Uma modelagem mais detalhada do problema deve levar em conta essa variação de espessura no domo para otimizar o peso do modelo.

Quanto a camada de compósito, no critério de falha de Tsai-Hill foi obtido o valor de 0,1694, o que valida o seu uso sem falha. Esse valor baixo, novamente vale resaltar, só foi obtido devido a parede metálica já ter sido projetada para absorver toda a tensão decorrente do carregamento de pressão.

O cilindro tipo III foi o que melhor se adequou as condições de premissas de projeto. Sua espessura de parede foi reduzida para 6,6 mm e um reforço de fibra de vidro E com matriz epóxi foi aplicada, seguindo o procediment de *filament winding*, com espessura de 4,1 mm. Com essa operação de redução da camada metálica, o cilindro obteve uma redução significativa de peso, pesando 49 Kg. Conforme requisitos da norma ISO 11439:2000, para o modelo em questão, o selante metálico deve resistir a uma pressão de estouro (*burst*) mínima de 260 bar. Além disso, devido ao tipo de compósito usado, o cilindro deve suportar a pressão de estouro de 700 bar, sem falha. O critério de Tsai-Hill foi novamente usado, obtendo valor dentro da região de segurança para o material.

Por fim, pode-se observar que os resultados numéricos estão de acordo com o esperado pelo modelagem analítica, onde verificou-se um sensível diminuição do peso vazio dos cilindros (no modelo 3), como a aplicação das camadas de compósitos e como a presença desse material pode reduzir significativamente a relação de peso do conjunto sem interferir nas propriedades de resistência mecânica do mesmo.

Segue na tabela abaixo a compilação de alguns resultados dos modelos.

Tabela 4.1: Comparação dos resultados obtidos para os casos analisados

Cilindro	Espessura metálica (mm)	Espessura compósito (mm)	Pressão Aplicada (bar)	Tensão Máxima cilindro ((Ksi)	Tensão Máxima domo (Ksi)	Peso (Kg)	Tsai-Hill
Tipo I	8,5	-	200	60	82		
30 CrMo	8,5	-	300	80	123	71	-
	8,5	-	450	177	177		
Tipo II	7,3	5,3	200	53	70		
30 CrMo	7,3	5,3	300	80	120	78	0,17
vidro/epóxi	7,3	5,3	500	150	180		
Tipo III	5,3	6,3	200	60	100		
30 CrMo	5,3	6,3	300	110	152	49	0,92
vidro/epóxi	5,3	6,3	500	270	270		

# Capítulo 5

## Conclusões

A partir dos resultados obtidos e analisados, pode-se dizer que o uso de geometrias não convencionais para reservatórios de GNV é bastante viável. Os materiais compósitos se mostraram como uma forma de se reduzir o peso total do cilindro de armazenamento de gás natural veicular, desde que sejam seguidos adequadamente os diversos parâmetros que são necessários ao projeto estrutural do vaso e aplicação do compósito.

Os resultados obtidos tanto por métodos analíticos quanto por métodos numéricos se mostraram concordantes e complementares. Os reservatórios As análises numéricas, baseadas no método dos elementos finitos, mostraram um bom desempenho frente às pressões impostas pelas configurações do gás para todas as geometrias.

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 continuidade das discussões levantadas no seu decorrer deste trabalho, sugere-se:

- Otimização da relação geométrica do selante x compósito nos cilindros de pressão para GNV, visando economia de custos;
- Analisar a influencia do ângulo de aplicação dos filamentos no processo de *Filament Winding* para o compósito e sua relação com a absorção de tensões pelo material;
- Construção e validação experimental dos cilindros em compósitos, através do processo de *Filament Winding*;

- Estudo detalhado do processo de Filament Winding para a construção dos cilindros analisados e validação experimental com os dados numéricos.

# Referências Bibliográficas

- [1] BARBERO, E. *Introduction to composite materials design*. 1999. New York: Taylor & Francis Group
- [2] CALLISTER, WD. *Fundamentals of materials science and engineering*. 2000. 5ed. New York: John Willey & Sons, Inc.
- [3] CARVALHO, J. *Computer integrated design optimization and manufacturing of filament wound parts*. Tese Doutorado – Faculty of Applied Science, Division PMA, K.U.Leuven, Belgica, 1996.
- [4] DANIEL, IM; ISHAI, O. *Engineering mechanics of composite materials*. 2003. 2ed. New York: Orford University Press.
- [5] GAY, D; HOA, SV; TSAI, SW. *Composite material: design and applications*. 1ed. Boca Raton: CRC Press.
- [6] MATTHEWS, C. *Engineers guide to pressure equipment*. 1ed. London: Professional Engineering Publishing Limited.
- [7] NORTON, RL. *Machine design: an integrated approach*. 3ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- [8] TANIGUCHI, H. Tese Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2008.
- [9] MATTHEWS, RD; RAWLING, RD. *Composite materials: engineering and Science*. 1994. 1ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- [10] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME division VIII section 1: rules for Construction of Pressure Vessels*. 2010. New York.
- [11] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME division X: Fiber-reinforced plastic vessels*. 2010. New York.

[12] SIQUEIRA, EJ. *Estudo dos Critérios de falha em compósitos PPS/Fibras de carbono utilizando Elementos Finitos*. Tese Mestrado – Universidade Estadual de São Paulo, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil. 2009.

[13] REDDY, JN. *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis*. 2003. 2ed. Florida, USA: CRC Press.

[14] ANSYS INC.. *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*. 2009. U.S.A.

# Apêndice A

## Dimensionamento dos Cilindros

### A.1 Metodologia

A metodologia desenvolvida para o dimensionamento dos cilindros de pressão deste 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. 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 estimar os níveis de tensões e deformações e conseqüentemente as condições de falha para os vasos de pressão, apoia-se nas normas específicas para cada aplicação. Para o dimensionamento da camada metálica foi usada a norma ASME divisão VIII seção I e para o dimensionamento da camada laminar compósita foi usado como referência o trabalho de Gay, Hoa e Tsai (2003). Para a determinação das condições gerais de projeto, a norma ISO 11439:2000 comporta as informações necessárias para o projeto;
- Neste trabalho foram verificados os critérios de falha para compósitos baseados no critério de Tsai-Hil;

- As propriedades de material utilizados são dados obtidos da literatura e de fabricantes internacionais;
- Uma vez que o cilindro não atinja o valor estabelecido pela norma ISO 11439:2000, inicia-se um processo iterativo manual para determinação do laminado adequado;
- Por fim, 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.

## A.2 Dimensionamento para o Cilindro tipo I

### Corpo Cilindrico

Conforme a ASME divisão 1 - 4.3.3.1, temos:

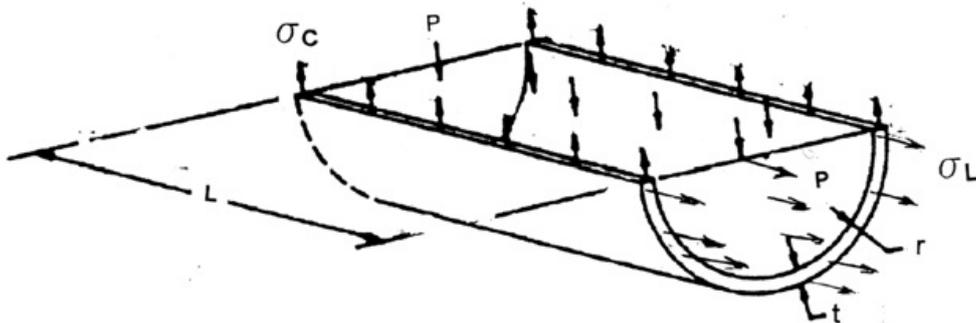


Figura A.1: Modelo de dimensionamento para o corpo de cilindro.

$$t_{min} = \frac{D}{2} \left( e^{P_p/S_y} - 1 \right) \quad (A.1)$$

$$t_{min} = \frac{340mm}{2} \left( e^{70MPa/758MPa} - 1 \right) = 8,6mm$$

### Calota Semi Eliptica

Conforme a ASME divisão 1 - Apendice 1-4(c), temos:

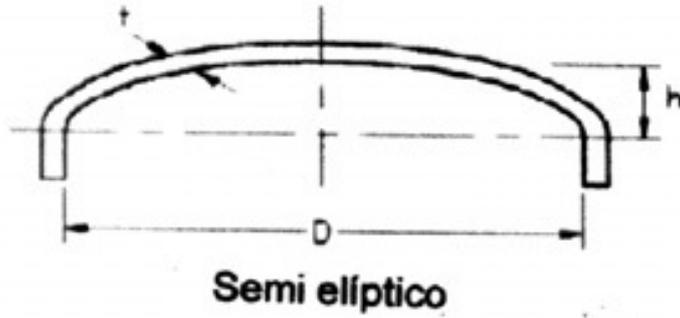


Figura A.2: Modelo de dimensionamento para o domo elíptico.

$$t_{min} = \frac{P + p * D_i * K}{2SE - 0,2P_p} \quad (A.2)$$

onde,

$$K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \frac{D_i^2}{2h} \right] \quad (A.3)$$

$$K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \frac{340mm^2}{2 * 170mm} \right] \quad (A.4)$$

$$t_{min} = \frac{70MPa * 340mm * 1}{2 * 1 - 0, * 70MPa} = 8,4mm \quad (A.5)$$

$$t_{min} = \frac{340mm}{2} \left( e^{70MPa/758MPa} - 1 \right) = 8,6mm$$

### A.3 Dimensionamento para o Cilindro tipo II

Para o dimensionamento do cilindro tipo II foi utilizada uma adaptação não real do modelo anterior. Um cilindro tipo II recebe reforço da camada compósita somente na sua região anular, sendo que somente nessa região pode haver diminuição da espessura da camada metálica. No entanto, como foi definido como parâmetro de projeto que os cilindros teriam todos as mesmas espessuras, o modelo tipo II teve que conter a mesma espessura de material metálico.

Conforme Gay, Hoa e Tsai (2003) a espessura mínima das camadas compósitas, para um revestimento anular, podem ser determinadas como segue:

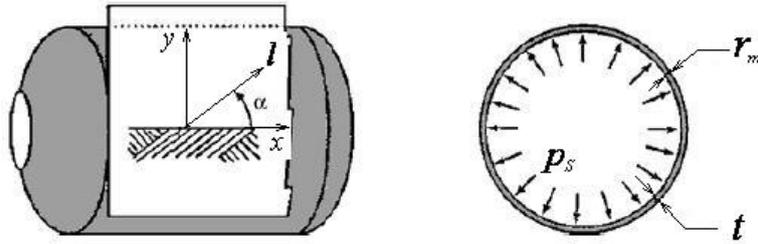


Figura A.3: Cilindro em *filament winding* - enrolamento helicoidal (Gay, Hoa e Tsai, 2003).

tensão longitudinal:

$$\sigma_x = \frac{P_p * r_m}{2t} \quad (A.6)$$

tensão radial:

$$\sigma_y = \frac{P_p * r_m}{t} \quad (A.7)$$

Estas tensões podem ser representadas num elemento de camada helicoidal como segue:

$$\sigma_x = \sigma_l * \cos^2 \alpha \quad (A.8)$$

e

$$\sigma_y = \sigma_l * \sin^2 \alpha \quad (A.9)$$

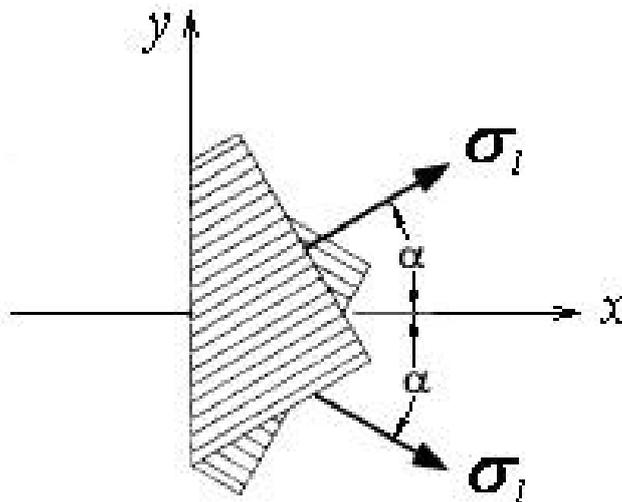


Figura A.4: Estado plano de tensões - enrolamento helicoidal(Gay, Hoa e Tsai, 2003).

Aplicando o angulo de 54,7 graus, obtem-se o estado de pura tensão uniaxial nas fibras.

$$\sigma_l = \frac{3 P_p * r_m}{2 t_f} \quad (\text{A.10})$$

Portanto, a espessura mínima do laminado é obtida dividindo  $t_f$  pelo volume de fibra:

$$t_f = \frac{t_f}{v_f}$$

## A.4 Dimensionamento para o Cilindro tipo III

Para o dimensionamento do cilindro tipo III foi utilizado uma adaptação não real do modelo tipo I. Um cilindro tipo III recebe reforço da camada compósita em todo o seu envoltório, com diminuição da espessura da camada metálica. A espessura da região metálica deve ser determinada conforme as requisições de projeto e conforme o método apresentado anteriormente.

Conforme Gay, Hoa e Tsai (2003) a espessura mínima das camadas compósitas, para um revestimento anular, podem ser determinadas como segue:

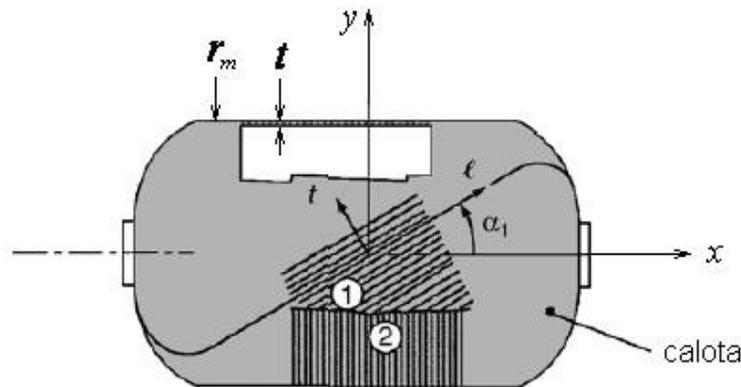


Figura A.5: Cilindro em *filament winding* - enrolamento helicoidal e circunferencial (Gay, Hoa e Tsai, 2003).

tensão longitudinal:

$$\sigma_{x1} = \frac{P_p * r_m}{2t} \quad (\text{A.11})$$

tensão radial:

$$\sigma_{y1} = \frac{P_p * r_m}{t} \quad (\text{A.12})$$

Estas tensões podem ser representadas num elemento de camada helicoidal e circunferencial como segue:

$$\sigma_{x1} = \sigma_{l1} * \cos^2 \alpha_1 \quad (\text{A.13})$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_{l1} * \sin^2 \alpha_1 \quad (\text{A.14})$$

e

$$\tau_{xy1} = \cos \alpha_1 * \sin \alpha_1 * \sigma_{l1} \quad (\text{A.15})$$

Se aplicarmos a  $\alpha_2$  o angulo de 90 graus, obtemos:

$$\sigma_{x2} = 0 \quad (\text{A.16})$$

$$\sigma_{y2} = 0 \quad (\text{A.17})$$

$$\tau_{xy2} = 0 \quad (\text{A.18})$$

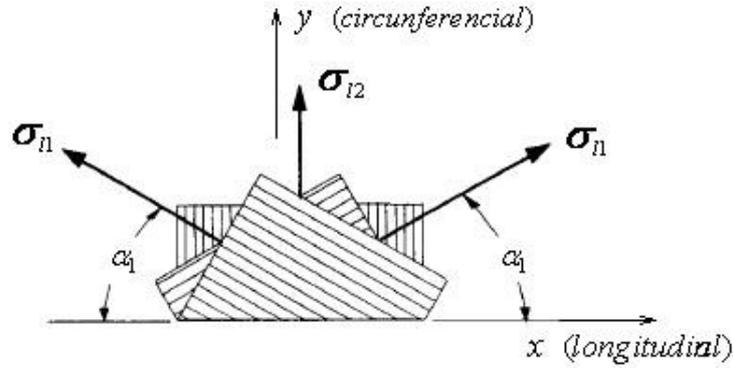


Figura A.6: Estado plano de tensões - enrolamento helicoidal e circunferencial (Gay, Hoa e Tsai, 2003).

O calculo das resultantes de força nas seções de largura unitária e normais a x e y são:

$$\sigma_{x1} * t_{1f} * 1 + \sigma_{x2} * 1 = \sigma_x * t * 1 \quad (\text{A.19})$$

$$\sigma_{y1} * t_{1f} * 1 + \sigma_{y2} * 1 = \sigma_x * t * 1 \quad (\text{A.20})$$

Se considerarmos que a tensão nas fibras é igual a resistência a tração, então temos:

$$\frac{t_{1f}}{t_f} = \frac{1}{3 \cos^2 \alpha_1} \quad (\text{A.21})$$

e,

$$\frac{t_{2f}}{t_f} = \frac{2 - \tan^2 \alpha_1}{3} \quad (\text{A.22})$$

Novamente, a espessura mínima do laminado é obtida dividindo  $t_f$  pelo volume de fibra:

$$t_f = \frac{t_f}{v_f}$$