

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS NÃO
CONVENCIONAIS PARA ARMAZENAMENTO
DE GÁS NATURAL VEICULAR**

John Edward Neira Villena

Natal – RN
Junho de 2004

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS NÃO
CONVENCIONAIS PARA ARMAZENAMENTO
DE GÁS NATURAL VEICULAR**

John Edward Neira Villena

Orientadores : **Profa. Dra. Ada Cristina Scudelari**

Prof. Dr. Ângelo Roncali de Oliveira Guerra

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica como requisito para a
obtenção do título de MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Natal - RN

Junho de 2004

SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS NÃO CONVENCIONAIS PARA ARMAZENAMENTO DE GÁS NATURAL VEICULAR

John Edward Neira Villena

Orientadores : Profa. Dra. Ada Cristina Scudelari

Prof. Dr. Ângelo Roncali de Oliveira Guerra

Dissertação de Mestrado defendida em 04/06/2004, sob julgamento da seguinte banca
examinadora:

Prof^ª. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva

Prof. Dr. João Alves de Lima

Prof^ª. Dra. Ada Cristina Scudelari

Natal - RN

Junho de 2004

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Dory e aos meus pais Edilberto e Adela, por seu sacrifício e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Dra. Ada Cristina Scudelari e Dr. Ângelo Roncali de Oliveira Guerra pela excelente orientação deste trabalho e pela dedicação em todas as fases do seu desenvolvimento.

Agradecimentos ao governo do Brasil e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade de realização do curso.

À FINEP, CEMPES, Petrobrás, e CTGás, parceiros do Projeto: “Desenvolvimento de Novos Sistemas de Armazenamento de Gás Natural em Veículos Automotivos”, pelo apoio, sem o qual a realização deste trabalho não teria sido possível.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de estudo concedida.

A todos os colegas, professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica pela amizade.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
SUMÁRIO	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	xi
NOMENCLATURA	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 RECIPIENTES PARA ARMAZENAMENTO DE GNV EXISTENTES NO MERCADO ATUAL	4
2.1.1 Tipo 1 – Cilindro de material metálico	5
2.1.2 Tipo 2 – Cilindro com selante de metal envolto anularmente	6
2.1.3 Tipo 3 – Cilindro com selante de metal totalmente envolto	7
2.1.4 Tipo 4 – Cilindro em compósito	8
2.2 NORMATIZAÇÃO EXISTENTE	9
2.3 ADSORÇÃO DO GÁS NATURAL	11
2.4 ESTADO DA ARTE EM ARMAZENAMENTO DE GÁS NATURAL	13

3.	FORMULAÇÃO.....	34
3.1	INTRODUÇÃO.....	34
3.2	METODOLOGIA.....	35
3.3	ANÁLISE MATEMÁTICA DE TENSÕES.....	37
3.3.1	Reservatório esférico.....	37
3.3.2	Reservatório cilíndrico.....	38
3.3.3	Reservatório de galerias elípticas.....	41
3.3.4	Reservatório elíptico.....	46
3.3.5	Reservatório toroidal.....	48
3.4	CÁLCULO DAS ESPESURAS DE PAREDE.....	49
3.5	MODELAGEM.....	52
3.6	SIMULAÇÃO COM ELEMENTOS FINITOS.....	52
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	54
4.1	INTRODUÇÃO.....	54
4.2	RESULTADOS NUMÉRICOS E ANÁLISE.....	58
4.2.1	Reservatório cilíndrico.....	58
4.2.2	Reservatório modular.....	63
4.2.3	Reservatório de galerias elípticas.....	68
4.2.4	Reservatório elíptico.....	75
4.2.5	Reservatório toroidal.....	80
4.2.6	Comparação dos reservatórios.....	90
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94
5.1	CONCLUSÕES.....	94
5.2	SUGESTÕES PARA OUTROS TRABALHOS.....	96
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
	ANEXOS.....	99
	FORMULAÇÃO UTILIZADA PELO ALGOR®.....	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Cilindro GNV tipo 1. (a) Vista isométrica. (b) Vista em corte.....	6
FIGURA 2.2 – Esquema do cilindro GNV tipo 2. (a) Vista isométrica (b) Vista em corte.....	6
FIGURA 2.3 – Esquema do cilindro GNV tipo 3. (a) Vista Isométrica (b) Vista em corte.....	7
FIGURA 2.4 – Esquema do cilindro GNV tipo 4. (a) Vista isométrica (b) Vista em corte.....	8
FIGURA 2.5 – Retenção de moléculas de um gás sobre um sólido micro poroso.	12
FIGURA 2.6 – Relação da retenção do metano de acordo com o método de abastecimento (COOK & HORNE, 1997)	12
FIGURA 2.7 – Esquema de uma operação cíclica de um sistema de armazenamento on-board de GNA. p_1 = pressão de descarga; p_2 = pressão de carga (MOTA, 1999).....	13
FIGURA 2.8 – Isotermas para um único componente para adsorção de hidrocarbonetos sobre carvão ativado a 25°C. C ₁ : Metano; C ₂ : Etano; C ₃ : Propano; C ₄ : Butano C ₅ : Pentano, (MOTA, 1999).....	14
FIGURA 2.9 – Diagrama esquemático do cilindro de teste, (MOTA et al, 1997).....	15
FIGURA 2.10 – Esquema de um sistema de teste dinâmico de GNA, (CHANG & TALU 1996).	16
FIGURA 2.11 – Perfil de tanque extrudado GNA, (COOK & HORNE, 1997).	18

FIGURA 2.12 – Chrysler B-Van com GNA, vista inferior, (COOK & HORNE, 1997).....	19
FIGURA 2.13 – Dodge Dakota com GNA, (COOK & HORNE, 1997).	19
FIGURA 2.14 – Malha do modelo FEM, (TILLER & EIHUSEN, 1998).....	21
FIGURA 2.15 – Sistema de montagem do tanque e carregamentos requeridos. (TILLER & EIHUSEN, 1998).....	22
FIGURA 2.16 – Sistema modular Roof Top (sobre o teto) para cilindros com GNC. (TILLER & EIHUSEN, 1998).	23
FIGURA 2.17 – Sistema integrado de armazenamento (ISS), (TILLER & WOZNIAK, 1998).....	24
FIGURA 2.18 – Isotermas de adsorção de metano para a fibra de carvão “Busofit AYTМ -055”, (VASILIEV et al, 2000).....	25
FIGURA 2.19 – Isotermas de adsorção de metano para o carvão “207C”, (VASILIEV et al, 2000).	26
FIGURA 2.20 – Reservatório de GNA com sistema de distribuição radial de gás. 1. Válvula para a entrada do gás, 2. Medidor de pressão, 3. Válvula, 4. Válvula de saída do gás para o motor, 5. Tubulação perfurada para distribuição radial do gás, 6. Leito adsorvente, 7. Reservatório GNA. (VASILIEV et al, 2000).....	27
FIGURA 2.21 – Reservatório de GNA com trocadores de calor, secção transversal 1. Envoltório do reservatório, 2. Trocadores de calor, 3. Leito adsorvente, 4. Canais de gás, 5. Aletas de metal, (VASILIEV et al, 2000).....	28
FIGURA 2.22 – Distribuição dos deslocamentos no reservatório retangular (mm), (SOUZA et al, 2002).....	29
FIGURA 2.23 – Distribuição dos deslocamentos no reservatório elíptico (mm), SOUZA et al. (2002).	30
FIGURA 2.24 – Distribuição dos deslocamentos no reservatório modular (mm). SOUZA et al. (2002).....	30

FIGURA 2.25 – Distribuição das tensões (MPa) em corpos elípticos, (SOUZA & GUERRA, 2003).	31
FIGURA 2.26 – Distribuição das tensões (MPa) no protótipo do reservatório de gás natural. $\sigma_{\max} \sim 135$ MPa, (SOUZA & GUERRA, 2003).	32
FIGURA 3.1 – (a) Cilindro comercial (b) Reservatório modular (c) Reservatório de galerias elípticas (d) Reservatório elíptico (e) Reservatório toroidal (f) Fiat Palio EX.	36
FIGURA 3.2 – Geometria esférica (a) Diagrama do elemento infinitesimal (b) Diagrama de corpo livre	38
FIGURA 3.3 – Diagrama do elemento infinitesimal para o reservatório cilíndrico	39
FIGURA 3.4 – Reservatório cilíndrico (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_1), (b) Esquema do corte no plano “xy”	39
FIGURA 3.5 – Reservatório cilíndrico (a) Diagrama de corpo livre para a tensão longitudinal (σ_2), (b) Esquema do corte no plano “zy”	40
FIGURA 3.6 – Esquema do reservatório de galerias elípticas em corte. 1. Galerias semicirculares semielípticas; 2. Galeria elíptica 3. Galerias a serem usadas como trocadores de calor.	41
FIGURA 3.7 – Diagrama do elemento infinitesimal do reservatório de galerias elípticas.	42
FIGURA 3.8 – Reservatório de galerias elípticas, galeria elíptica (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_{1a}), (b) Esquema do corte no plano “yz”	42
FIGURA 3.9 – Reservatório de galerias elípticas, galeria elíptica (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_{1b}), (b) Esquema do corte no plano “xz”, (c) Diagrama de corpo livre para a tensão longitudinal (σ_2), (d) Esquema do corte no plano “xy”.	43

FIGURA 3.10 – Diagrama do elemento infinitesimal do reservatório de galerias elípticas.....	44
FIGURA 3.11 – Reservatório de galerias elípticas, galeria semicircular semielíptica (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_{1a}), (b) Esquema do corte no plano “yz”. (c) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_{1b}), (d) Esquema do corte no plano “xz”.....	45
FIGURA 3.12 – Reservatório de galerias elípticas, galeria semicircular semielíptica (a) Diagrama de corpo livre para a tensão longitudinal (σ_2), (b) Esquema do corte no plano “xy”.....	46
FIGURA 3.13 – Diagrama do elemento infinitesimal do reservatório elíptico.....	47
FIGURA 3.14 – Reservatório elíptico (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_1), (b) Esquema do corte no plano “xz”, (c) Diagrama de corpo livre para a tensão longitudinal (σ_2), (d) Esquema do corte no plano “xy”.....	47
FIGURA 3.15 – Geometria toroidal (a) Diagrama do elemento infinitesimal (b) Diagrama de corpo livre.....	48
FIGURA 3.16 – Reservatório elíptico (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_1), (b) Esquema do corte no plano “xz”. (c) Diagrama de corpo livre para a tensão longitudinal (σ_2), (d) Esquema do corte no plano “xy”.....	49
FIGURA 4.1 – (a) Seção transversal do cilindro comercial (b) Seção transversal do reservatório modular (c) Seção transversal do reservatório de galerias elípticas (d) Seção transversal do reservatório elíptico (e) Seção transversal do reservatório toroidal (f) Automóvel Fiat Palio EX.....	55
FIGURA 4.2 – (a) Porta-malas do automóvel Fiat Palio EX (b) Porta-malas do automóvel ocupado pelo cilindro comercial.....	56

- FIGURA 4.3 – Fiat Palio EX (a) Reservatório modular instalado no porta-malas (b) Reservatório de galerias elípticas instalado no porta-malas (c) Cavidade para o pneu reserva (d) Protótipo elíptico posicionado na cavidade do pneu de reserva (e) Protótipo toroidal posicionado na cavidade do pneu de reserva. (f) Reposicionamento do pneu de reserva na porta traseira do veículo. 57
- FIGURA 4.4 – Distribuição das tensões principais máximas em (MPa) do cilindro comercial de Aço 4130 com espessura de parede de 8,0 mm, com GNC submetido à pressão interna de 20 MPa..... 61
- FIGURA 4.5 – Distribuição das tensões principais máximas em (MPa) do cilindro comercial de Aço 4130 com espessura de parede de 1,6 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa..... 62
- FIGURA 4.6 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do cilindro do reservatório modular de Aço 4130 com espessura de parede de 2,5 mm, com GNC submetido à pressão interna de 20 MPa. 66
- FIGURA 4.7 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do cilindro do reservatório modular de Aço 4130 com espessura de parede de 1.1 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa..... 67
- FIGURA 4.8 – Distribuição das tensões (MPa) em corpos elípticos. (a) Comportamento da galeria elíptica isolada; (b) Redução das tensões aproveitando a contrapressão..... 68
- FIGURA 4.9 – Reservatório de galerias elípticas 1. Galeria semicircular semielíptica; 2. Galeria elíptica 3. Galerias a serem usadas como trocadores de calor..... 69
- FIGURA 4.10 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório de galerias elípticas de Aço 4130 com espessuras de parede de 7,5 e 4,0 mm, com GNC submetido à pressão de interna 20 MPa. 73

FIGURA 4.11 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório de galerias elípticas de Alumínio 6061-T6 com espessuras de parede de 5,3 e 3,3 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa.....	74
FIGURA 4.12 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório elíptico de Aço 4130 com espessura de parede de 18,5 com GNC submetido à pressão interna de 20 MPa.	78
FIGURA 4.13 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório elíptico de Alumínio 6061-T6 com espessuras de parede de 3,0 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa.....	79
FIGURA 4.14 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório toroidal de Aço 4130 com espessuras de parede de 6,2 e 4,0 mm, com GNC submetido à pressão interna de 20 MPa.....	83
FIGURA 4.15 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório toroidal de Aço 4130 com espessuras de parede de 1,3 e 0,9 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa.....	84
FIGURA 4.16 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório toroidal, com altura incrementada para 250 mm, de Aço 4130 com espessuras de parede de 10,5 e 4,7 mm, com GNC submetido à pressão interna de 20 MPa.	88
FIGURA 4.17 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório toroidal, com altura incrementada para 250 mm, de Aço 4130 com espessuras de parede de 2,0 e 1,0 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa.....	89

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Características do modelos propostos comparadas com as do cilindro comercial.	28
TABELA 2.2 – Dados referentes ao cilindro comercial e modelo de galerias elípticas.	32
TABELA 4.1 – Características do cilindro comercial com GNC de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6.	59
TABELA 4.2 – Características do cilindro comercial com GNA de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6.	60
TABELA 4.3 – Parâmetros utilizados para espessura de parede do reservatório modular cilíndrico para GNC e GNA.	63
TABELA 4.4 – Características do reservatório modular de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial ambos com GNC.	64
TABELA 4.5 – Características do reservatório modular de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial ambos com GNA.	65
TABELA 4.6 – Espessura de parede para as galerias elípticas do reservatório de galerias elípticas para GNC e GNA.	69
TABELA 4.7 – Espessura de parede para as galerias semicirculares semielípticas do reservatório de galerias elípticas para GNC e GNA.	70

TABELA 4.8 – Características do reservatório de galerias elípticas de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial com GNC.	71
TABELA 4.9 – Características do reservatório de galerias elípticas de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas com as do cilindro comercial com GNA.	72
TABELA 4.10 –Espessura de parede do reservatório elíptico para GNC e GNA.	75
TABELA 4.11 –Características do reservatório elíptico de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial com GNC.	76
TABELA 4.12 –Características do reservatório elíptico de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas com as do cilindro comercial com GNA.	77
TABELA 4.13 –Espessura de parede do reservatório toroidal para GNC e GNA.	80
TABELA 4.14 –Características do reservatório toroidal de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial com GNC.	81
TABELA 4.15 –Características do reservatório toroidal de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas com as do cilindro comercial com GNA.	82
TABELA 4.16 –Espessura de parede do reservatório toroidal com altura incrementada, para GNC e GNA.	85
TABELA 4.17 –Características do reservatório toroidal com altura incrementada, de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial com GNC.	86
TABELA 4.18 –Características do reservatório toroidal com altura incrementada, de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas com as do cilindro comercial com GNA.	87

TABELA 4.19 –Características dos reservatórios propostos, comparadas com as do cilindro comercial com GNC.....	91
TABELA 4.20 –Características dos reservatórios propostos, comparadas com as do cilindro comercial com GNA.	92

NOMENCLATURA

σ_{\max}	-	Tensão principal máxima [MPa]
σ	-	Tensão de escoamento [MPa]
σ_1	-	Tensão radial [MPa]
σ_2	-	Tensão longitudinal [MPa]
a	-	Capacidade de adsorção $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
p	-	Pressão interna [MPa]
q	-	Quantidade Adsorvida (mmol/g)
r	-	Raio interno [mm]
s	-	Fator de segurança
t	-	Espessura de parede [mm]
L	-	Comprimento [mm]
P, Q, S	-	Força [N]
R	-	Raio externo [mm]
x,y,z	-	Coordenadas retangulares

RESUMO

A investigação da viabilidade de se utilizar recipientes para armazenamento de gás natural veicular (GNV), com geometrias diferentes dos padrões comerciais, parte da necessidade de se aliar os benefícios ambientais, financeiros e tecnológicos oferecidos pela combustão do gás, à conveniência de não se alterar a proposta original do automóvel. O uso dos atuais modelos cilíndricos para estocagem nos veículos convertidos justifica-se pelo excelente comportamento que essa geometria apresenta diante das tensões provocadas pela alta pressão a que os referidos reservatórios estão submetidos. Entretanto, recentes pesquisas, voltadas para aplicação de materiais adsorventes nos reservatórios de gás natural, comprovaram uma substancial redução de pressão e, conseqüentemente, um alívio das tensões nos reservatórios. Diante desse contexto, este estudo propõe geometrias alternativas para os reservatórios de GNV buscando a minimização das dimensões e do peso, mantendo-se, porém a capacidade de resistir às tensões impostas pela nova situação de pressão. Todos os parâmetros geométricos dos reservatórios propostos são calculados realizando o estudo matemático das tensões internas de trabalho tomando como base a norma brasileira (NBR). Por último são realizadas simulações do comportamento das novas geometrias fazendo uso do software comercial ALGOR® o qual se baseia no Método dos Elementos Finitos (MEF), para realizar a comprovação da eficiência dos reservatórios sob a pressão imposta pelo gás.

Palavras –chave: Armazenamento de GNV, CAD, MEF.

ABSTRACT

The investigation of viability to use containers for Natural Gas Vehicle (NGV) storage, with different geometries of commercial standards, come from necessity to join the ambient, financial and technological benefits offered by the gas combustion, to the convenience of not modify the original proposal of the automobile. The use of these current cylindrical models for storage in the converted vehicles is justified by the excellent behavior that this geometry presents about the imposed tensions for the high pressure that the related reservoirs are submitted. However, recent research directed toward application of adsorbent materials in the natural gas reservoirs had proven a substantial reduction of pressure and, consequently, a relief of the tensions in the reservoirs. However, this study considers alternative geometries for NGV reservoirs, searching the minimization of dimensions and weight, remaining capacity to resist the tensions imposed by the new pressure situation. The proposed reservoirs parameters are calculated through a mathematical study of the internal pressure according to Brazilian standards (NBR) for pressure vessels. Finally simulations of the new geometries behavior are carried through using a commercially available Finite Element Method (FEM) software package ALGOR to verify of the reservoirs efficiency under the gas pressure load.

Keywords: NGV Storage, CAD, FEM.

1. INTRODUÇÃO

A utilização do gás natural tem sido sempre associada à aquisição de energia menos poluente e econômica. Sua aplicação é muito vasta, principalmente na indústria, no uso residencial e no abastecimento automotivo. Essa última aplicação tem sido uma alternativa para amenizar problemas ambientais e econômicos. Esse fato se deve, principalmente, ao avanço tecnológico dos últimos anos que possibilitou a construção de motores capazes de queimar quase que a totalidade do gás natural na câmara de combustão e, portanto, não liberando partículas nocivas para a atmosfera, e também ao fato de que o custo do Gás Natural Veicular (GNV) também é reduzido quando comparado aos combustíveis líquidos usuais.

Apesar dos incontestáveis benefícios alcançados com o uso deste combustível, o seu armazenamento dentro do veículo apresenta desvantagens quando analisado sob o ponto de vista do espaço ocupado pelo recipiente de armazenamento (cilindro). Os reservatórios comerciais possuem grandes dimensões e disposição geométrica inadequada. O elevado peso do tanque de armazenamento em função da alta pressão a que deve ser submetido o mesmo, diminui a potência do veículo e também aumenta o trabalho do sistema de amortecimento. Outro fator a ser levado em conta é que o elevado volume do tanque diminui o espaço útil do veículo. A motivação para esse trabalho originou-se da necessidade de amenizar esses e outros inconvenientes. Essa pesquisa objetiva estudar o comportamento de outras geometrias para estocagem de GNV a fim de se obter maior aproveitamento no uso das novas tecnologias.

Sendo assim, o objetivo deste estudo é projetar e analisar reservatórios não convencionais para transporte e utilização de gás natural para uso veicular, fazendo-se uso dos métodos numéricos como ferramentas de análise para verificar a viabilidade técnica dos reservatórios em questão.

Tem como objetivos específicos estudar as vantagens e desvantagens das diferentes geometrias, para obter assim um reservatório que represente a melhor solução do problema; como também minimizar o espaço ocupado pelos reservatórios no interior dos veículos e reduzir o carregamento sobre a estrutura traseira do chassi dos veículos através do uso de materiais alternativos.

Este trabalho apresenta-se dividido em cinco capítulos, incluindo o presente. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica. No terceiro capítulo apresenta-se a formulação matemática. No quarto é realizada a análise dos resultados. Por último, no quinto, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O gás natural é considerado um atrativo potencial como combustível veicular considerando a fácil adaptação dos veículos. É mais barato que a gasolina ou diesel, tem menor efeito no meio ambiente que os veículos de combustível líquido e emite menos dióxido de carbono, (MOTA, 1998). Tomando como base estas vantagens, nos últimos anos têm-se desenvolvido muitas pesquisas no que diz respeito ao uso do gás natural como combustível veicular.

Segundo HOLROYD et al. (1999), existem três diferentes formas para o armazenamento de gás natural: gás natural liquefeito (GNL), gás natural comprimido (GNC) e gás natural adsorvido (GNA).

O GNL é obtido à temperaturas criogênicas ($\sim -161^{\circ}\text{C}$) e a pressão ambiente. Este processo apresenta uma redução de cerca de 600 vezes o volume original, permitindo que grandes quantidades de gás sejam transportadas para lugares onde os gasodutos são de difícil implementação ou economicamente inviáveis. Possui como vantagem uma maior autonomia quando comparado ao GNC, porém menor quando comparado à gasolina. Sua principal desvantagem é em relação aos custos relativos a liquefação do gás, justificando-se apenas em operações que requeiram uma maior autonomia em relação ao GNC como, por exemplo, em trens, ônibus e caminhões.

O GNC é armazenado a uma pressão geralmente entre 15 e 25 MPa ($\sim 2400 - 3600$ psi.). Este é o tipo de gás mais utilizado atualmente para uso veicular, porém necessita de tanques cilíndricos para o armazenamento, diminuindo desta forma o espaço interno útil do automóvel. Requer também um alto custo de compressão.

O GNA aparece como uma alternativa para o GNC, onde sólidos microporosos empacotados em um tanque aumentam a densidade de armazenamento, possibilitando operações a baixas pressões. O GNA possui uma capacidade de armazenagem bem próxima ao GNC ($\sim 2/3$) com uma pressão muito menor ($\sim 1/6$). A faixa de pressão empregada é em torno de 3,5 a 4 MPa (~ 500 a 600 psi) e utilizam-se, preferencialmente, carvões ativados altamente microporosos como adsorvente. O fenômeno da condensação capilar do gás natural nos microporos do carvão adsorvente permite que mais gás seja armazenado do que ocorreria no armazenamento em fase gasosa. Esta maneira de armazenagem do gás natural apresenta algumas vantagens frente ao GNC. Devido às baixas pressões, tanques não cilíndricos podem ser construídos, maximizando o espaço útil do automóvel; menores custos são obtidos com a compressão, pois com uma pressão de abastecimento mais baixa os veículos podem ser abastecidos diretamente das tubulações de gás e menos riscos são gerados, devido a menores energias requeridas para comprimir o gás natural.

Devido às vantagens que apresenta o GNA frente ao GNC, um grande número de pesquisas está sendo orientado ao uso do GNA, as quais vão desde a busca de cilindros mais leves e com resistência elevada, estudos de geometrias alternativas ou não convencionais até a escolha dos adsorventes mais indicados.

2.1 RECIPIENTES PARA ARMAZENAMENTO DE GNV EXISTENTES NO MERCADO ATUAL

Com o desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação e a descoberta de novos materiais, mais leves e mais resistentes que o aço, surgiu no mercado uma diversificação de tipos de cilindros produzidos para a utilização de gás natural veicular.

Algumas normas só fazem referência ao Gás Metano Veicular (GMV), mas são consideradas válidas para o GNV já que este é composto principalmente de metano ($\sim 95\%$), (MOTA, 1999), sendo assim, daqui em diante o GMV será considerado como GNV.

A norma ABNT NBR 12790 (1995) classifica os cilindros sem costura para armazenagem e transporte de gases a alta pressão da seguinte maneira:

- 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 veicular (GNV), onde o gás é usado como combustível no veículo, ou, para o transporte de gás em cilindros resistentes no veículo, para abastecimento dos postos de recarga.

Segundo MDIC-IMETRO PORTARIA N° 74 (2001), existem quatro tipos de cilindros para gás metano veicular (GNV), descritos a seguir:

- Tipo 1 – Cilindros de material metálico (all-metal cylinder);
- Tipo 2 – Cilindro com selante de metal envolto anularmente (metal-lined hoop wrapped);
- Tipo 3 – Cilindro com selante de metal totalmente envolto (metal-lined total-wrapped cylinder);
- Tipo 4 – Cilindro todo em compósito (plastic-lined all composite cylinder).

2.1.1 Tipo 1 – Cilindro de material metálico

Segundo MOREIRA (2001), os cilindros GNV tipo 1 (Figura 2.1), mantendo a configuração tradicional, podem ser fabricados com novas ligas de aço ou alumínio, apresentando redução de peso em torno de 10%, quando comparados aos seus congêneres tradicionais.

Segundo HOLROYD et al. (1999), o aço liga comumente utilizado na produção de cilindros comerciais é o AISI 4130. A liga de alumínio mais utilizada é a AA 6061-T6 sendo também utilizada a AA 6351-T6. Outras ligas como a AA 7032 têm sido empregadas na produção de cilindros.

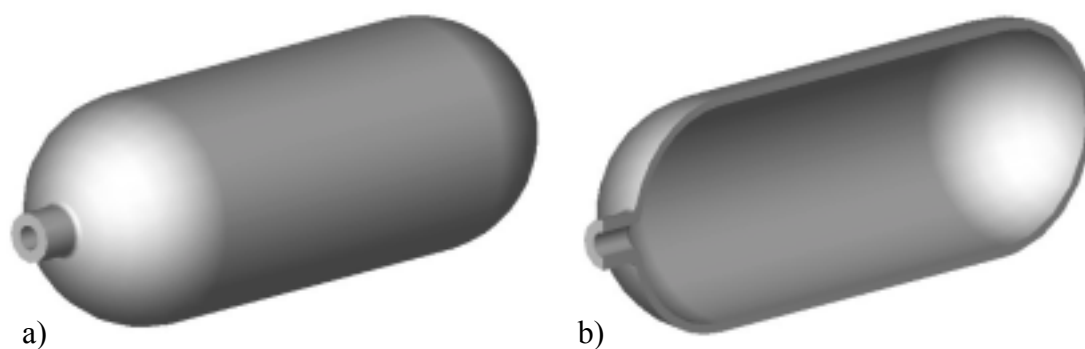


FIGURA 2.1 – Cilindro GNV tipo 1. (a) Vista isométrica. (b) Vista em corte.

2.1.2 Tipo 2 – Cilindro com selante de metal envolto anularmente

Segundo HOLROYD et al. (1999), os cilindros GNV tipo 2 (Figura 2.2) são fabricados com selante (*lined*) de metal, que pode ser o aço ou o alumínio-liga, são envolvidos anularmente em sua seção cilíndrica (*hoop-wrapped*) pelo processo de bobinamento com filamento contínuo (fibra), impregnado por resina bobinado helicoidalmente e circunferencialmente (*wet-filament winding*).

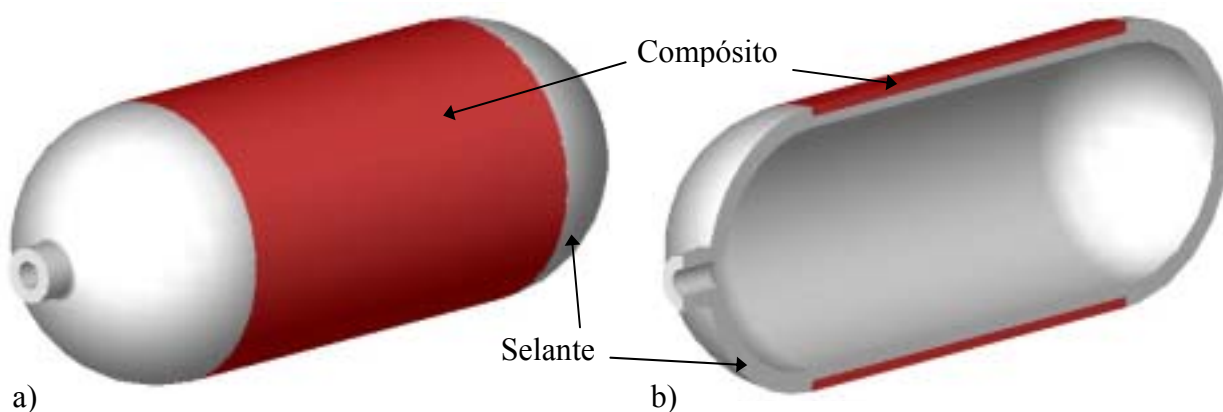


FIGURA 2.2 – Esquema do cilindro GNV tipo 2. (a) Vista isométrica (b) Vista em corte.

As ligas de alumínio utilizadas na fabricação do selante metálico são as mesmas empregadas na produção de cilindros do tipo 1. O alumínio-liga mais utilizado no selante é o da série 6XXX, mais especificamente o 6061-T6 (alumínio-magnésio-silício).

O filamento (fibra) utilizado pode ser: fibra de vidro-S, fibra de vidro-E, fibra de aramida e fibra de carbono. O material para impregnação pode ser termofixo ou resina termoplástica. A resina epóxi atualmente é a mais utilizada.

Segundo MOREIRA (2001), neste caso haveria teoricamente, uma redução de espessura do cilindro metálico de 50%, o que acarretaria em uma redução de peso de quase 50% (reduziria 50% do metal e agregaria o peso do reforço), entretanto por problemas construtivos a redução observada está entre 25 e 30%, comparando-se com o equivalente metálico em aço.

Em todos estes projetos do cilindro do tipo 2, os selantes de metal (na ausência do envoltório) são geralmente capazes de suportar pressões acima da pressão de gás de serviço.

2.1.3 Tipo 3 – Cilindro com selante de metal totalmente envolto

Os cilindros GNV tipo 3 (Figura 2.3), assim como os cilindros tipo 2, são fabricados com selantes de metal que pode ser o aço ou o alumínio-liga. Neste tipo, um cilindro de metal (selante) sem costura, com paredes finas, é integralmente revestido em toda sua superfície (*total-wrapped cylinder*) com filamentos contínuos impregnados de resina, bobinados helicoidalmente e circunferencialmente (*wet filament winding*). Os materiais do selante são os mesmos do tipo 2, segundo HOLROYD et al. (1999).

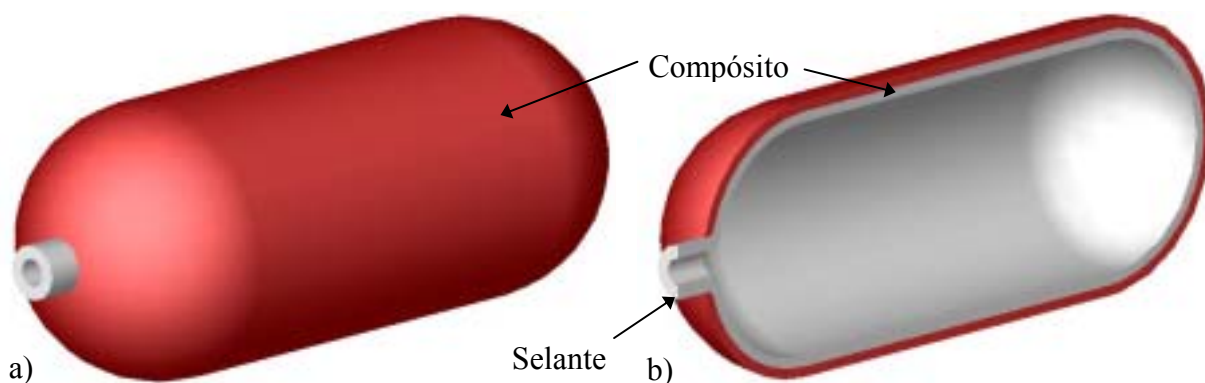


FIGURA 2.3 – Esquema do cilindro GNV tipo 3. (a) Vista Isométrica (b) Vista em corte.

A redução de peso aqui obtida chega a 50% ou mais, quando comparado com cilindros de aço, segundo MOREIRA (2001).

2.1.4 Tipo 4 – Cilindro em compósito

Segundo HOLROYD, et al. (1999), o cilindro GNV tipo 4 (Figura 2.4) compreende um selante de polímero que tem como função somente tornar o cilindro final impermeável ao gás; geralmente é constituído de polietileno de alta densidade (*high-density polyethylene-hdpe*), uma saliência de metal (geralmente alumínio 6061) na região da coroa para facilitar o bobinamento, uma entrada para colocar uma válvula e um enrolamento multi-direcional total da fibra de vidro-S ou de carbono.

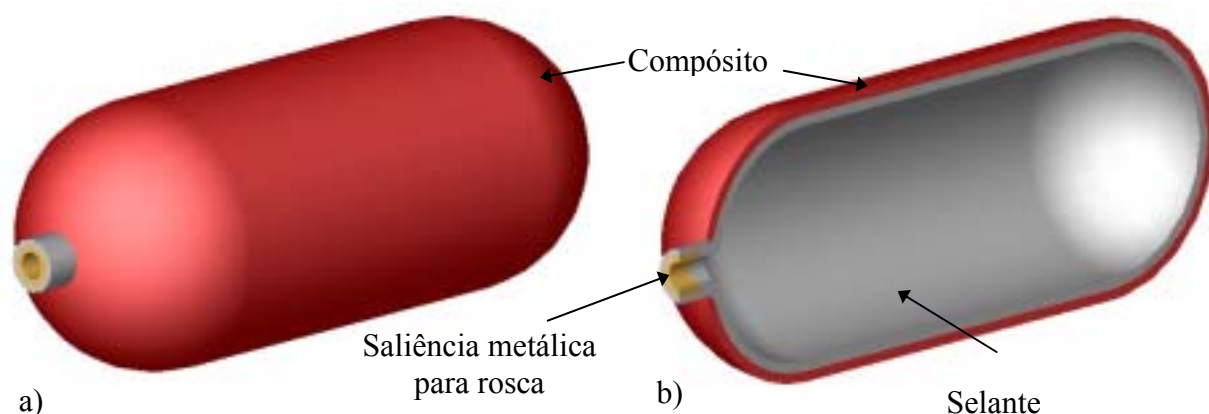


FIGURA 2.4 –Esquema do cilindro GNV tipo 4. (a) Vista isométrica (b) Vista em corte.

Pode-se optar por cilindros em plástico reforçado sem material impermeável interno. Nesses cilindros, o próprio material composto confere as características de impermeabilidade necessárias. As reduções de peso estão na mesma ordem de grandeza do cilindro que utiliza o selante plástico.

O principal desafio para este tipo de cilindro é de superar consistentemente a presença de vazamento de gás na região interfacial entre o selante e a saliência metálica, feita geralmente da liga de alumínio 6061.

Segundo MOREIRA (2001) a redução de peso obtida está entre 60 e 80%, quando comparado com os cilindros de aço.

2.2 NORMATIZAÇÃO EXISTENTE

Devido a uma gama de materiais existentes para a utilização em construção de cilindros se fez necessário a criação de uma normatização, abrangendo todos os tipos de cilindros e visando a garantia de qualidade dos cilindros produzidos, aumentando a segurança do usuário. A normatização existente se baseia na experiência obtida pelos fabricantes de cilindros para gases de alta pressão. A normatização foi predominantemente criada no início da década de noventa e está voltada a exigir, um produto seguro, através de ensaios de desempenho. A seguir, seguem exemplos de normas com enfoque em cilindros existentes no mercado atual.

- **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 vehicles.* (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 (GNV) em alta pressão – Cilindro em plástico reforçado 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)

- **ISO 11439 – 2000:** *Gas cylinders – High pressure cylinders for on board storage natural gas as a fuel for automotive vehicles.* (Cilindros de gás – Cilindros de alta pressão para armazenamento de gás natural como combustível para veículos automotivos)

- **CGA FRP 3 – 1988:** *Guidelines for filament wind composite cylinders with nonloadsharing liners.* (Guia para cilindros bobinados em compósito com selantes com função não estrutural)

- **PrEn 12245 – 1999:** *Transportable gas cylinders – Fully wrapped composite cylinders.* (Cilindros transportáveis de gás – Cilindros totalmente envoltos em compósito)

- **Portaria nº 74 de 29 de Maio de 2001 (MDIC – INMETRO):** Regulamento técnico de cilindros para alta pressão para armazenamento de GMV como combustível a bordo de veículos automotores.

Basicamente estas normas prevêm ensaios de performance em fadiga a diferentes temperaturas, ensaios de danos, exposição a ultravioleta, fluência, impacto, queda, ambientação em meios corrosivos, etc., bem como análise completa de tensões e de mecanismos de fratura.

Com o aumento do uso de cilindros leves coloca-se como tendência a utilização de cilindros de aço (tipo 1) como cilindros estacionários, como por exemplo na utilização em padarias, condomínios ou em outros sistemas onde não é necessária e/ou possível a instalação de uma tubulação de gás natural própria.

O aumento da aceitação do sistema de gás natural veicular no Brasil, devido ao aumento da produção de gás natural e à difusão da utilização de cilindros leves, tem como vantagem uma considerável redução de poluentes na atmosfera e desvantagens as dimensões, o peso e a portabilidade do cilindro que representa o elemento de maior peso no sistema de GNV.

A normatização referente a cilindros leves ainda passa por um processo de difusão e unificação, pois, ainda se localiza pontualmente em alguns países cujo uso do gás natural como combustível é bem difundido.

O maior problema na comercialização de cilindros leves tem sido a desvalorização do Real frente às outras moedas, seguido da falta de investimento em tecnologia de fabricação e a alta quantidade de impostos em produtos importados. Como forma de proteção comercial, algumas empresas fabricantes de cilindros são temerosas em fornecer qualquer informação referente aos seus produtos.

2.3 ADSORÇÃO DO GÁS NATURAL

A adsorção do gás se dá pela retenção de moléculas de um gás ou líquido sobre a superfície de um sólido microporoso (Figura 2.5). O comportamento da forma de retenção pode ser melhor compreendido analisando-se parâmetros de textura do adsorvente, como por exemplo a área específica, o volume específico dos poros, a porosidade e a distribuição do tamanho dos poros.

Segundo LOBATO (2001), os poros, de acordo com o seu tamanho, são geralmente classificados em três grupos. São eles os macroporos (>50 nm), os mesoporos (2-50 nm) e os microporos (2 nm), onde se dá à retenção das moléculas do gás. A seleção dos referidos parâmetros se dá por estudos da relação da quantidade de substância adsorvida com sua pressão ou concentração na fase gasosa.

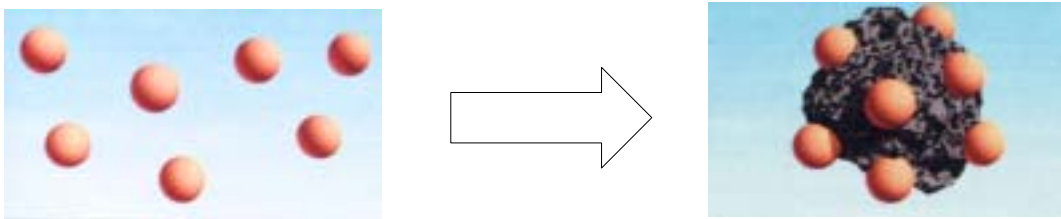


FIGURA 2.5 – Retenção de moléculas de um gás sobre um sólido micro poroso.

O gás natural é composto principalmente de metano (~95%) e contém também, etano (C_2), nitrogênio e pequenas proporções de alcanos que vão desde propano (C_3) até heptano (C_7), (MOTA, 1999).

No estudo realizado por COOK & HORNE (1997), foi observado que o GNA admite altas pressões porém, a quantidade de metano adsorvido não varia muito ao passar de 4 MPa (~600psi) (Figura 2.6).

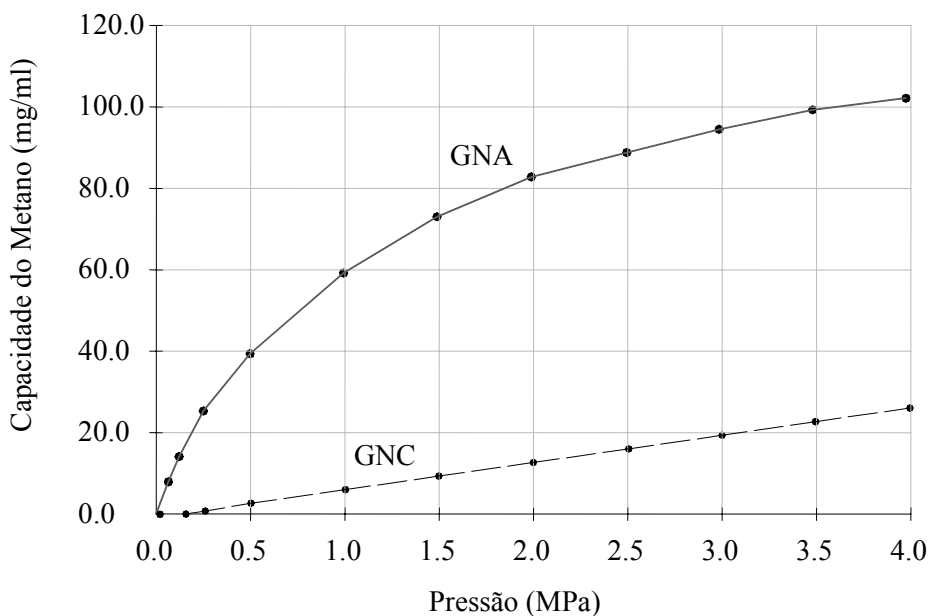


FIGURA 2.6 – Relação da retenção do metano de acordo com o método de abastecimento (COOK & HORNE, 1997)

Os adsorventes empregados neste processo são geralmente os carvões altamente microporosos, conhecidos como carvões ativados que é o termo usado para descrever uma família de adsorventes carbonáceos com uma forma altamente cristalina e uma estrutura porosa interna altamente desenvolvida.

Alguns critérios devem ser levados em consideração ao escolher o adsorvente: preço, disponibilidade, diâmetro dos poros (≤ 2 nm); natureza hidrofóbica, performance em torno de 150 V/V (volume de gás natural / volume de adsorvente), baixo calor de adsorção e alta capacidade calorífica. (LOBATO, 2001)

2.4 ESTADO DA ARTE EM ARMAZENAMENTO DE GÁS NATURAL

MOTA (1999) pesquisou sobre o impacto da composição do gás natural armazenado por adsorção. O ciclo de operações do reservatório de armazenamento *on-board* foi modelado como uma série de processos com dois passos consecutivos, cada um consistindo de carga, com uma composição de gás na mistura fixa, seguida por uma descarga a uma taxa de fluxo molar constante (Figura 2.7).

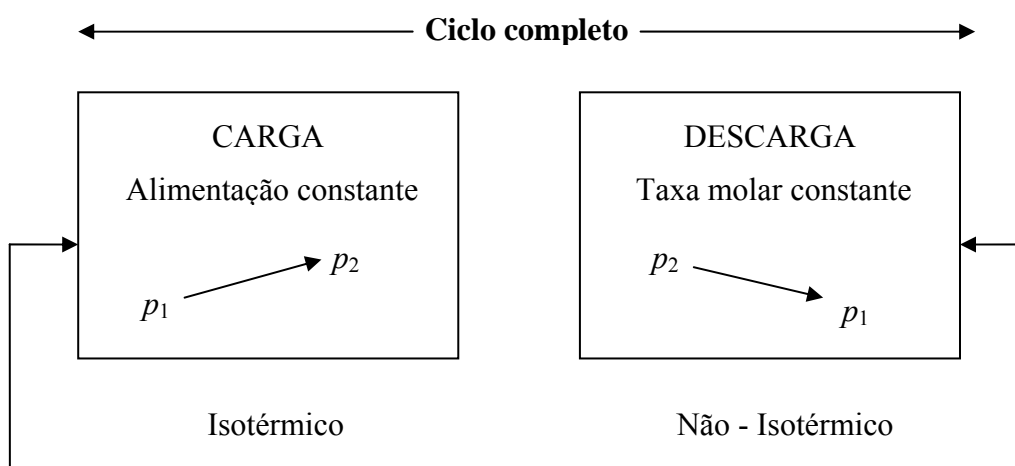


FIGURA 2.7 – Esquema de uma operação cíclica de um sistema de armazenamento on-board de GNA. p_1 = pressão de descarga; p_2 = pressão de carga (MOTA, 1999)

Com auxílio da Figura 2.8, pode-se observar a necessidade de um leito filtrante para retirar as impurezas do gás como os hidrocarbonetos de alto peso molecular.

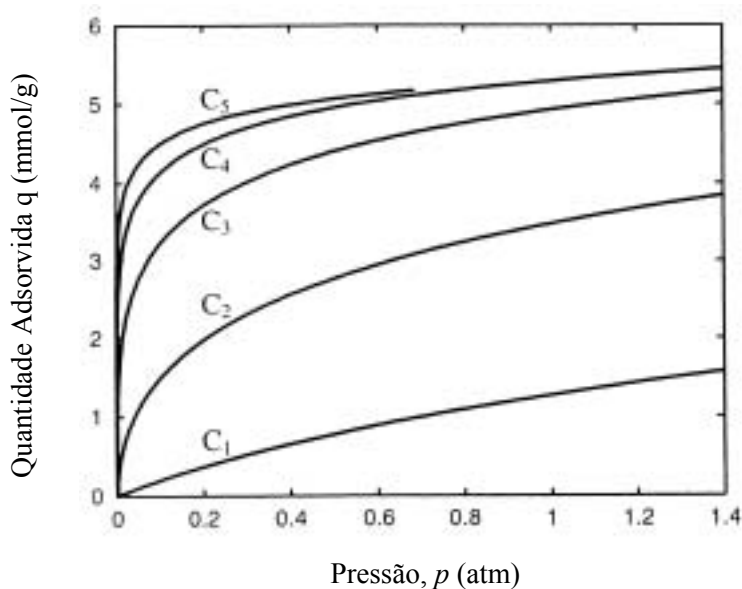


FIGURA 2.8 – Isotermas para um único componente para adsorção de hidrocarbonetos sobre carvão ativado a 25°C. C₁: Metano; C₂: Etano; C₃: Propano; C₄: Butano C₅: Pentano, (MOTA, 1999)

Como pode ser visto, a baixas pressões, os hidrocarbonetos de maior peso molecular são adsorvidos preferencialmente diminuindo a capacidade de armazenagem do metano. Ao ocorrer a dessorção, estes continuam impregnados no leito devido ao fato de possuírem um maior calor de dessorção, saturando o adsorvente. Isto demonstra que qualquer aplicação comercial deste tipo de tecnologia de armazenamento deve possuir um meio de remover os hidrocarbonetos de alto peso molecular e outras espécies altamente adsorvidas dos vapores de gás antes da carga.

MOTA et al. (1997) pesquisaram sobre a dinâmica de um sistema de armazenagem do gás natural adsorvido empregando carvão ativado. Vários aspectos foram estudados teoricamente. Até a presente data, a mais alta capacidade de armazenagem experimental obtida a 3.5 MPa e 25°C foi para o carvão ativado AX-21, 101 V/V para partículas granuladas e 144 V/V para mistura de carvão com polímeros comprimidos dentro de um molde geométrico sob pressão mecânica e

depois secado. Contudo, boas capacidades (82 e 103 V/V) foram também obtidas por alguns autores com um adsorvente muito barato, o carvão CNS® disponível comercialmente.

Os autores utilizaram um cilindro de 50 litros de capacidade com carvão G216 do *Nort American Carbon Inc.*, o qual possui uma capacidade de armazenagem de metano de 80 V/V a 25 °C e 3.5 MPa. O carvão foi colocado no cilindro através de uma abertura de 10 mm localizada no centro da face frontal. Na figura 2.9 é apresentado o diagrama esquemático do cilindro de teste.

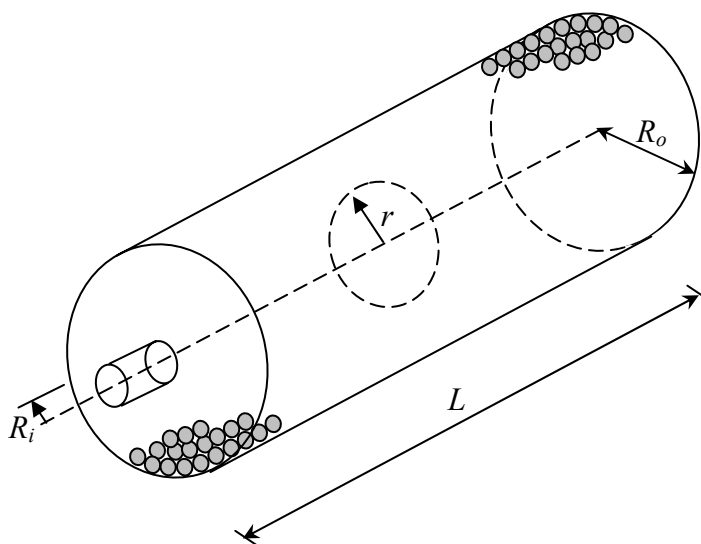


FIGURA 2.9 – Diagrama esquemático do cilindro de teste, (MOTA et al, 1997)

Para este processo estudou-se a rápida carga do sistema de armazenamento, a influência da resistência difusional sobre a carga dinâmica e o processo de descarga além da proposta para soluções para se reduzir o efeito adverso do calor de adsorção sobre a capacidade de armazenamento, incluindo o armazenamento de energia térmica “in situ”. Observou-se que se o calor de adsorção, durante a carga, não é repostado, a quantidade de GN que permanece no leito durante a descarga é maior. Como alternativa para o processo de carga, pode-se resfriar o gás na estação de abastecimento antes que o mesmo entre no reservatório. Durante a descarga, a queda de temperatura pode ser reduzida por três diferentes maneiras: aumentando a condutividade térmica do leito com misturas nas partículas de carvão ou trocando parte da mistura, para o caso

de carvões monolíticos, por um material de alta condutividade térmica; aumentando a temperatura das paredes através de uma jaqueta para favorecer a transferência de calor por condução, ou, aumentando a área da parede por unidade de volume do reservatório. Para reduzir os efeitos adversos do calor de adsorção sobre a capacidade de armazenamento o *Institute of Gas Technology* e o *Gas Research Institute* desenvolveram um método que consiste em se introduzir no leito de carvão um material encapsulado que muda de fase e que possui um alto calor de fusão à temperatura ambiente. Este material adsorve o calor de adsorção durante a carga e libera o calor durante a descarga. Porém, há a necessidade de se otimizar a quantidade de material que muda de fase a qual maximiza a quantidade liberada de gás durante a descarga. Em relação às resistências difusionais, observa-se que, quanto maior for a densidade de empacotamento maior será a quantidade de gás armazenada. No entanto, se o leito estiver muito empacotado a difusão do gás será prejudicada requerendo-se um maior tempo de enchimento.

CHANG & TALU (1996) realizaram uma pesquisa sobre o procedimento e a desempenho na armazenagem do gás natural adsorvido em cilindros durante a descarga. Utilizaram um cilindro comercial de GNA e acompanharam os efeitos térmicos. Na Figura 2.10 é mostrado o esquema de um sistema de teste dinâmico de GNA.

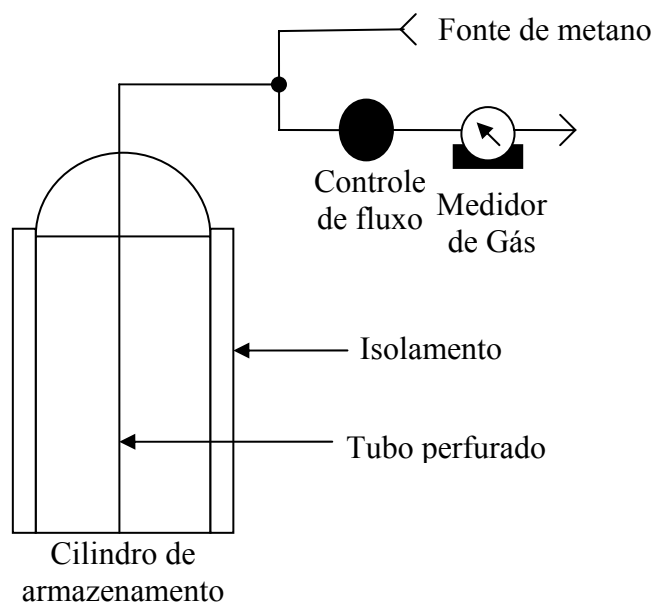


FIGURA 2.10 – Esquema de um sistema de teste dinâmico de GNA, (CHANG & TALU 1996).

Observaram que a baixa condutividade térmica dos adsorventes é o principal fator que dificulta a utilização deste tipo de energia. Observaram também que a mudança da direção do fluxo de axial para radial, através da inserção de um tubo perfurado no centro do cilindro, favorece a transferência de calor das paredes para a região central. Além disso, esse tubo não reduz significativamente o espaço de armazenamento; é fácil e barato de ser implementado e modera a queda de temperatura sob qualquer condição ambiente. O máximo benefício é observado a uma taxa de demanda de aproximadamente 7 L/min, onde a perda é de 22% com o fluxo axial, comparado a 12% com o fluxo radial, correspondendo a uma redução de aproximadamente 40% na perda dinâmica.

Em relação à carga não foi dada muita ênfase ao aumento da temperatura devido a ser normalmente realizado em um posto de combustível onde um mecanismo apropriado pode ser comprado para remover o calor de adsorção se uma carga rápida for necessária.

COOK & HORNE (1997) realizaram um trabalho sobre a demonstração de um veículo com gás natural adsorvido a baixa pressão. O objetivo era achar uma capacidade de 150 volumes de gás natural por volume de adsorvente em um tanque não cilíndrico, devido ao sistema original GNC possuir a mesma faixa. Neste trabalho, fez-se um diagrama que mostra a capacidade de metano adsorvido em relação à pressão tanto para o GNA quanto para o GNC.

Os autores pesquisaram-se vários materiais para obter um adsorvente a um baixo custo e alto desempenho. Os adsorventes derivados de materiais orgânicos, incluindo casca de coco e caroço de pêssego, têm produzido bons resultados a baixo custo e adsorventes microporosos com poros de 2 nm de diâmetro ou menores têm mostrado ser eficientes para a adsorção do principal componente do gás natural, o metano, a temperatura ambiente. Como resultado, muita atenção foi dada aos carvões com alto volume de microporos. Vários testes foram realizados para encontrar a melhor maneira de empacotar o adsorvente no vaso e minimizar os defeitos térmicos causados pela adsorção/dessorção.

Utilizando um tanque de alumínio, fabricado por extrusão, de geometria retangular que apresentava uma estrutura multicelular (Figura 2.11), foram observados vários requisitos: ter baixa pressão; minimizar os efeitos do calor; ser de fácil enchimento com o adsorvente; ter um espaço eficiente e ser de fácil localização no veículo; ser relativamente leve; ser de fácil fabricação e ser seguro e confiável com a pressão do vaso. Para a utilização do GNA, faz-se necessário o uso de um “*guard bed*” (filtro) para retirar os hidrocarbonetos de alto peso molecular, C5 e superiores, que não são adsorvidos com a redução para a pressão de descarga. O processo de regeneração deste filtro é realizado durante o funcionamento do carro através do acoplamento de duas resistências elétricas. Seu volume é de aproximadamente 1,5% do volume do tanque preenchido por adsorventes com poros de 15-20 Å.

Foram convertidos dois veículos para o gás natural; um Chrysler B-Van e um Dodge Dakota. No primeiro veículo, o tanque foi colocado na parte inferior (Figura 2.12), e no segundo foi colocado no compartimento de carga (Figura 2.13). A pressão de trabalho do tanque foi de 4 MPa. O tanque foi testado apresentando fadiga aos 380.000 ciclos, a uma pressão de 22 MPa.

Observou-se que o desempenho dos veículos foi tão satisfatório quanto se estivessem abastecidos com gasolina. O máximo desempenho obtido foi 142 V/V com blocos de adsorventes comprimidos aproximando-se satisfatoriamente dos 150 V/V pretendidos inicialmente.

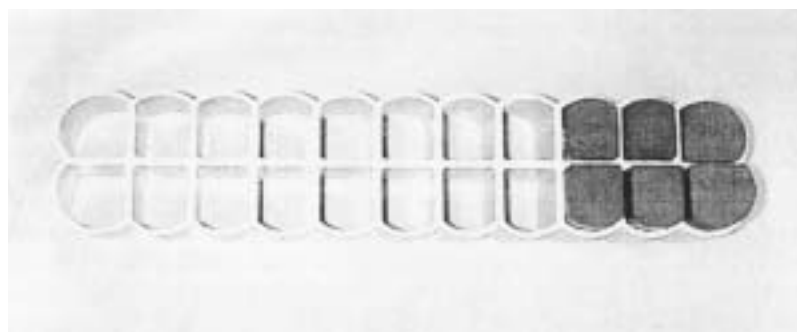


FIGURA 2.11 – Perfil de tanque extrudado GNA, (COOK & HORNE, 1997).

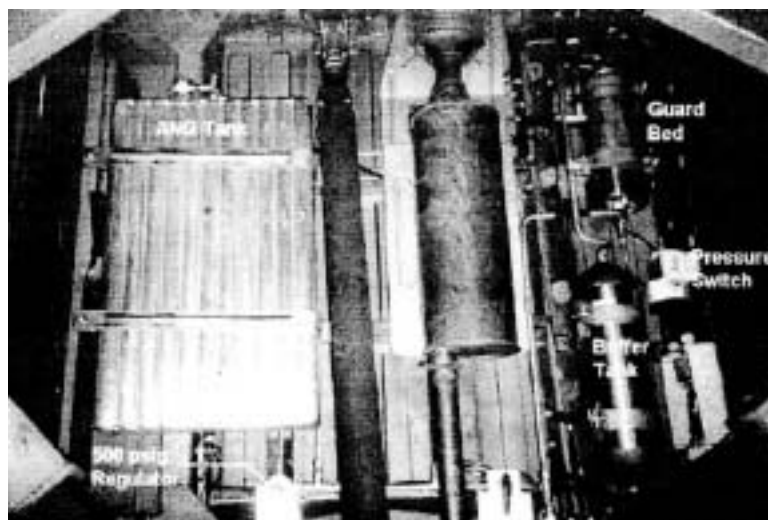


FIGURA 2.12 – Chrysler B-Van com GNA, vista inferior, (COOK & HORNE, 1997).



FIGURA 2.13 – Dodge Dakota com GNA, (COOK & HORNE, 1997).

TILLER & EIHUSEN (1998) desenvolveram dois sistemas modulares de armazenamento de gás natural em ônibus de piso alto (*high floor*) e piso baixo (*low floor*). A aprovação da legislação do ar limpo nos Estados Unidos resultou num aumento na demanda de ônibus movidos à Gás Natural Comprimido (GNC). Apesar da legislação favorável, os obstáculos permaneceram. Um desses é o projeto do sistema de combustível do ônibus. O sistema de combustível de GNC deve fornecer ao ônibus um intervalo de tempo de trânsito comparável ao diesel, ou seja,

aproximadamente 400 milhas, sem impor uma penalidade no peso. Estes requerimentos de operação tem estabelecido uma necessidade de um tanque de baixo peso em compósito (*lightweight composite fuel tanks*) com projeto e montagem em conexões mais eficientes. Discutiram também a evolução tecnológica com relação ao projeto e desenvolvimento de sistemas de GNC para aplicação em ônibus. Inicialmente, o armazenamento de GNC foi adaptado para ônibus de piso alto, e os tanques foram montados debaixo do piso do ônibus. O advento de ônibus de piso baixo estabeleceu que os tanques estivessem montados no alto do teto. Atualmente, cada fabricante de ônibus desenvolve seu próprio projeto para integrar o sistema de armazenamento de combustível. A *Lincoln Composites* desenvolveu um conceito modular que poderia ser adaptado na maioria dos modelos de ônibus, com poucas modificações.

Os autores apresentaram também uma visão geral do desenvolvimento e da certificação de sistemas de combustível para ônibus de piso alto e piso baixo. Especificamente, o desenvolvimento e a certificação de duas configurações do tanque serão vistos: uma com diâmetro de 404 mm (~15,9 polegadas) x 3050 mm (~120 polegadas) de comprimento e uma com diâmetro de 470 mm (18,4 polegadas) x 3050 mm (120 polegadas) de comprimento ambos totalmente constituídos em compósito (*all composite*). Estes tanques foram projetados e testados de acordo com as exigências da norma AGA NGV2, bem como da norma canadense B51. O tanque é feito de uma fibra de composto híbrido de fibra contínua de carbono/vidro/epoxy produzido pelo processo de bobinamento com filamento (*filament windings*). Após a aplicação de proteção estrutural, incherdos de espuma são moldados acima e abaixo e uma linha de vidro, nos domos superior e inferior respectivamente. Os sistemas operaram a pressão de 2,48 MPa (248 bar), temperatura mínima de -40°C e máxima de 120°C, com um número de ciclos de operação de 11,250 (high floor) e 15,000 (low floor).

Foram realizadas análises na estrutura, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o software comercial ANSYS®, juntamente com pre e pós-processadores personalizados. O modelo usa elementos planos sólidos axisimétricos,

e é limitado da parte curva até alcançar a linha tangente (Figura 2.14) para reduzir o tempo de cálculo.

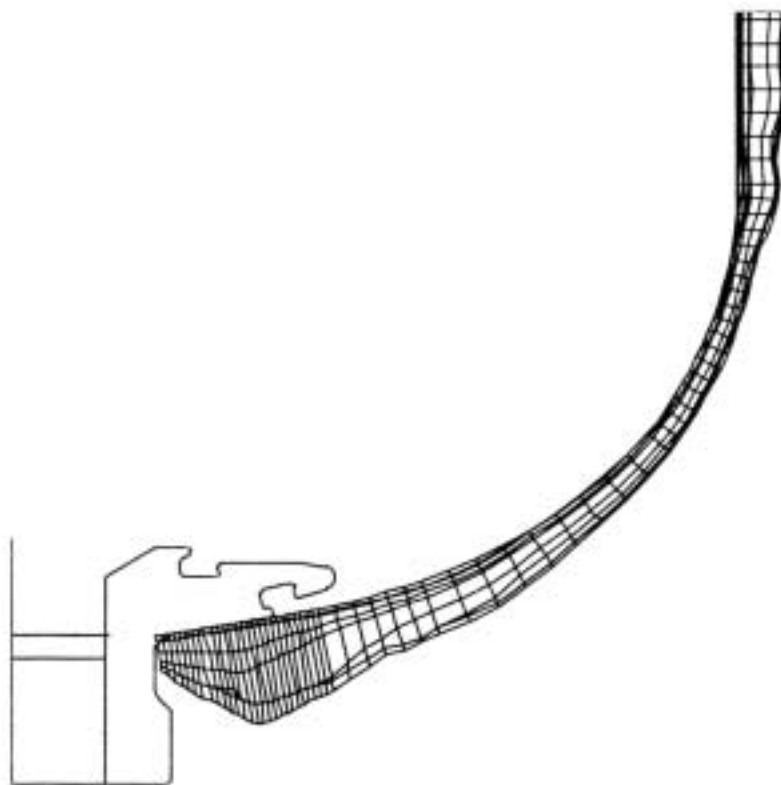


FIGURA 2.14 – Malha do modelo FEM, (TILLER & EIHUSEN, 1998).

Os modelos foram fixados axialmente no lado livre do cilindro para evitar o movimento de corpo livre e permitir a expansão em ambas as direções. A pressão sobre toda a superfície interior foi uniforme, e o carregamento do fluxo de saída foi aplicado uniformemente na face do corpo de entrada. Esta configuração permitiu a determinação exata das tensões no corpo de entrada assim como nos materiais compósitos do cilindro. O modelo também permite obter as grandes deflexões (não lineares) e o comportamento não linear do material.

Foram utilizados dispositivos de alívio de pressão térmicamente ativados (PRD's), graduados a uma temperatura de 125°C.

O sistema de montagem foi projetado para trabalhar nas condições de carregamento de dilatação e de carregamentos dinâmicos.

Os chamados carregamentos de dilatação são oriundos das reações do sistema de suporte pela pressurização do tanque. A estrutura de suporte deve acomodar-se aos crescimentos radiais e axiais do tanque como reação à pressão interna.

Os carregamentos dinâmicos podem ser divididos em carregamentos de trabalho, originados pelo funcionamento normal do ônibus e carregamentos de choque, constituídos pelos carregamentos oriundos de alguma colisão. Neste caso os requerimentos de impacto especificados, para veículos certificados no Canadá, são:

- Vinte vezes o peso do tanque cheio na direção longitudinal do veículo. (Figura 2.15)
- Oito vezes o peso do tanque cheio em qualquer outra direção. (Figura 2.15)

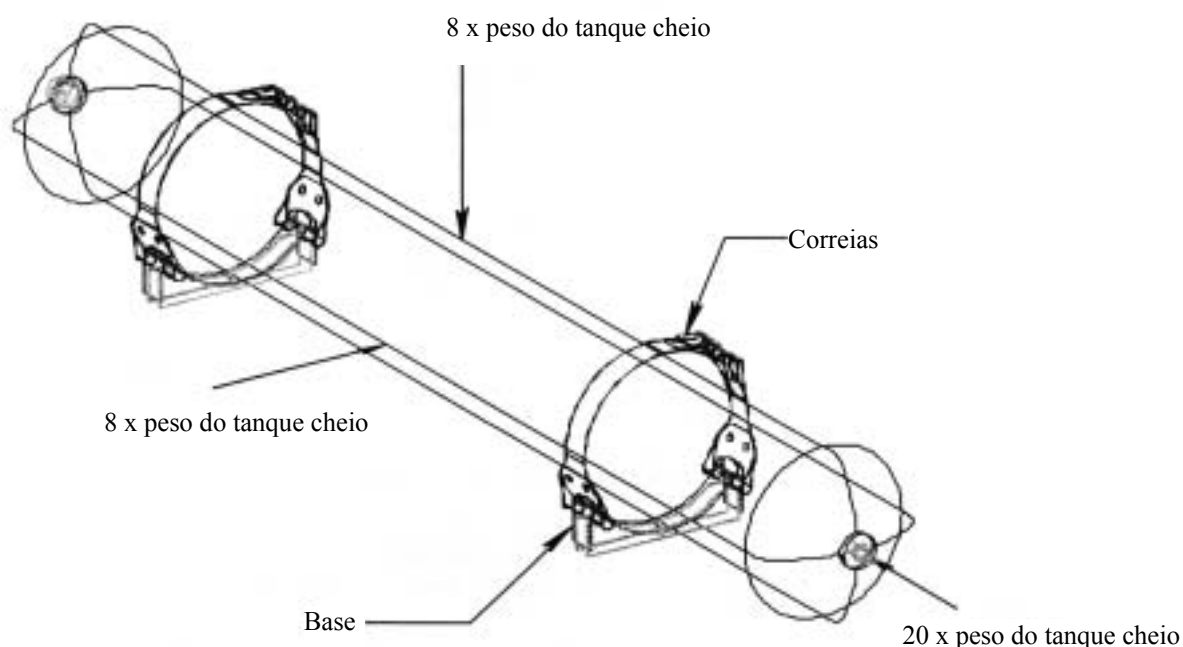


FIGURA 2.15 – Sistema de montagem do tanque e carregamentos requeridos. (TILLER & EIHUSEN, 1998).

Foi estudada também a possibilidade de um sistema modular integrado “*Roof-top*” (Figura 2.16), que seria instalado no teto do ônibus. O sistema modular foi projetado para ser facilmente adaptável a grande variedade de modelos de ônibus. Com a padronização do modelo poderiam-se atingir benefícios óbvios, como redução de tempo de fabricação e montagem e redução de custos. Depois de realizados todos os testes, os tanques foram certificados segundo a normatização e obtiveram a certificação com todos os resultados dentro do exigido.

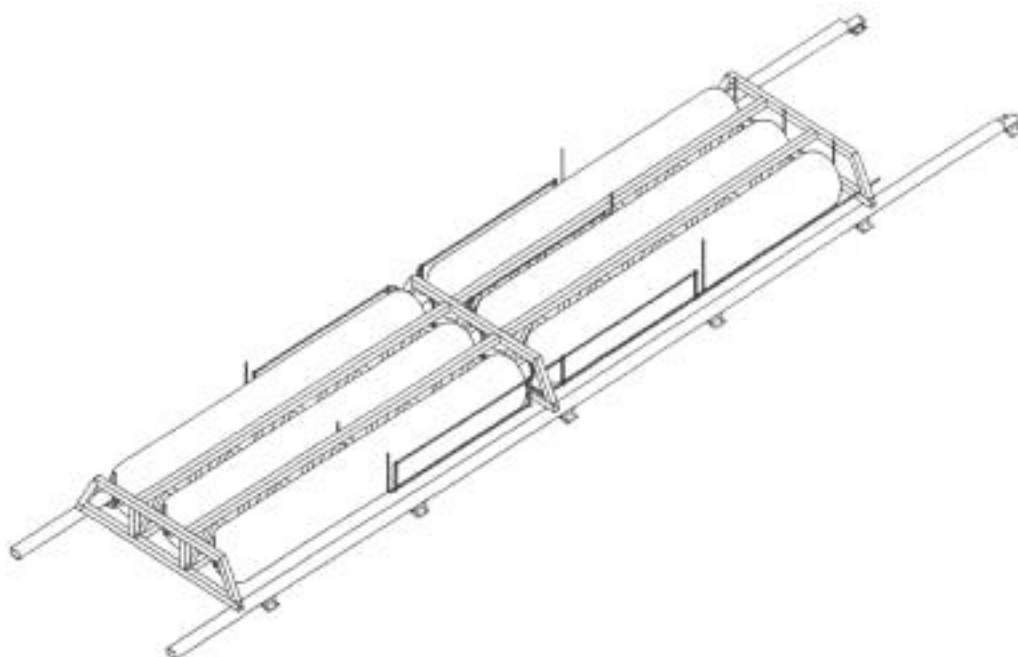


FIGURA 2.16 – Sistema modular Roof Top (sobre o teto) para cilindros com GNC. (TILLER & EIHUSEN, 1998).

TILLER & WOZNIAK (1998) desenvolveram um sistema integrado de armazenamento de gás natural para veículos médios. Discutiram o desenvolvimento de um sistema de armazenamento de GNC chamado de Sistema Integrado de Armazenamento (*Integrate Storage Sytem-ISS*). O ISS incorpora múltiplas células de pressão totalmente em compósito (*overwrapped all-composite pressure cell*) encapsuladas com um protetor de fibra de vidro espumado, absorvedor de impacto, tendo uma aparência externa similar à um tanque de gasolina convencional (Figura 2.17). Todas as válvulas associadas, linhas e dispositivos de segurança são integrados na

unidade que é protegida de impactos físicos. O ISS permite reduzir o custo, peso, e complexidade de armazenamento de GNC, melhorar a segurança na colisão, e expandir aplicações potenciais de GNV. Além disso para GNV's, o ISS também tem potencial em outras tecnologias de veículos semelhante aos sistemas híbridos GNV/eletricidade e armazenamento de hidrogênio para veículos movidos por células de combustível.

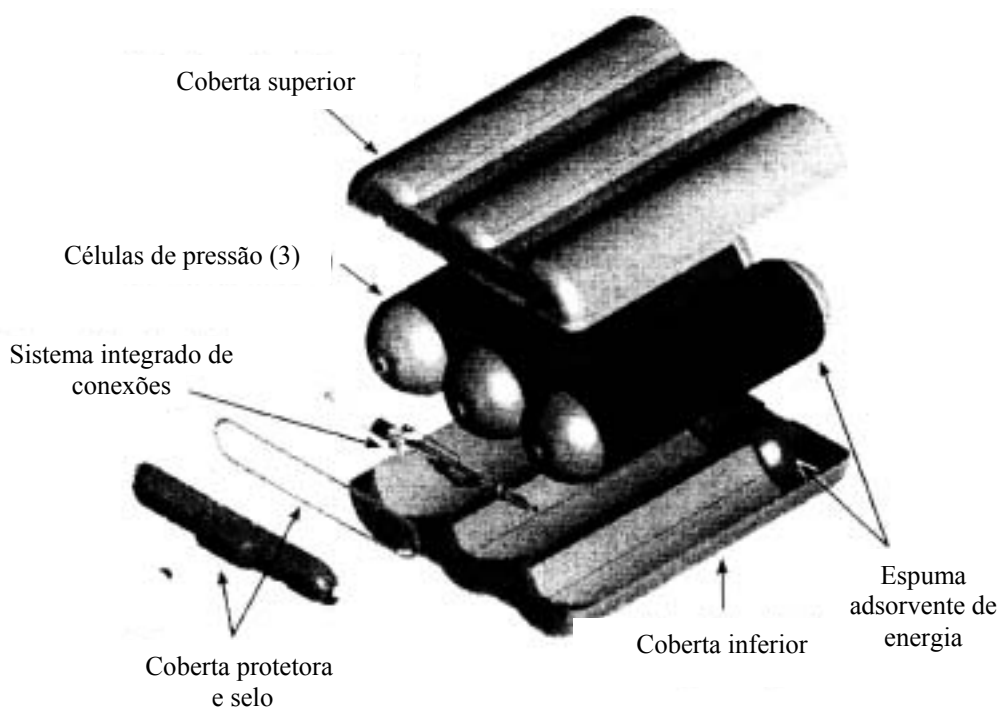


FIGURA 2.17 – Sistema integrado de armazenamento (ISS), (TILLER & WOZNIAK, 1998).

O ISS foi projetado para ser incorporado em um carro de tamanho médio. A base do conceito ISS é o particionamento de cilindros de pressão, tolerância ao dano, otimização de cada função através do uso do material composto e pelo desenho de empacotamento. Válvulas, linhas, e PRD's, são completamente integrados e protegidos de danos com a cobertura de fibra de vidro que pode ser removida para concertos de componentes. O ISS é tratado como um simples recipiente de GNC e tem uma válvula manual, válvula solenóide e PRD. Todos os cilindros de GNC unidos permitem ser fixados no veículo por correias convencionais.

O reservatório (cilindro) e o protetor de fibra foram testados segundo as normas de segurança impostas pela *American National Standard, ANSI/AGA NGV3.1-1995, "Fuel System Components for Natural Gas Powered Vehicles"*. Tanto o reservatório quanto o protetor de fibra obtiveram certificado por apresentarem resultados que atendem aos requisitos da normatização utilizada.

VASILIEV et al. (2000) realizaram um estudo com GNA, utilizando fibras de carvão ativado "Busofit". Este tipo de carvão foi escolhido devido a vantagens apresentadas como: alto nível de adsorção e dessorção; distribuição uniforme de poros na superfície; número pequeno de macroporos e número pequeno de mesoporos.

Os testes foram realizados utilizando um reservatório com 7 cilindros tendo um volume total de 43 dm³. Foram obtidas as isotermas de adsorção do metano num intervalo de temperatura de 0 °C a 60 °C e de pressão de 0,1 a 5,0 MPa, para o processo de adsorção/dessorção (Figura 2.18). Foram analisadas três variações do carvão Busofit: Busofit-4-055, Busofit-055 e Busofit AYTM-055.

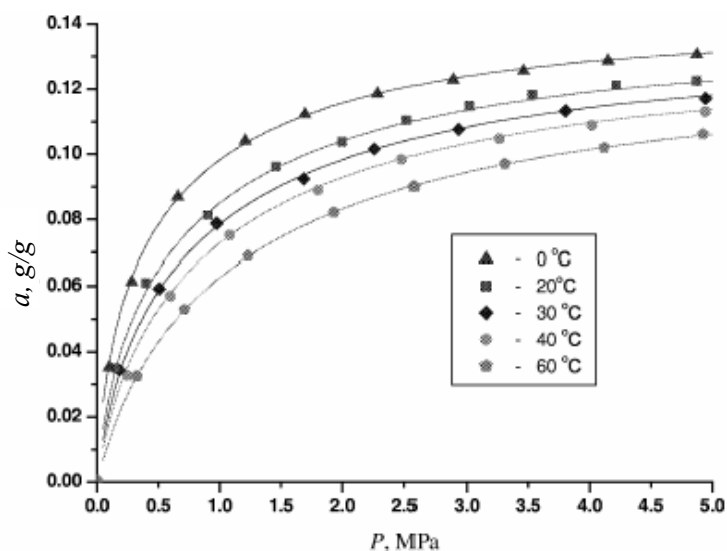


FIGURA 2.18 – Isotermas de adsorção de metano para a fibra de carvão "Busofit AYTM -055", (VASILIEV et al, 2000).

A evolução das isotermas durante o ciclo de adsorção/dessorção para o carvão 207C são mostradas na Figura 2.19. Baseados nos resultados concluíram que o carbono Busofit tem caráter competitivo com os melhores adsorventes, possuindo uma capacidade de adsorção de 113 - 115 kg·kg⁻¹ a 273 K, e uma relação V/V próxima a 150 a uma pressão de 3,56 MPa. Durante os experimentos, o reservatório de ANG isolado (condições adiabáticas) foi esvaziado a uma taxa constante de 25 dm³·min⁻¹. Foi observada uma queda de temperatura no leito adsorvente devido ao calor de dessorção de 285 K a 260 K.

Notou-se que o principal inconveniente do carvão Busofit é o elevado custo. Foi realizada uma comparação com outro carvão ativado de menor preço, o “207C”. Notaram que as isotermas (Figura 2.19) foram similares as do Busofit. Foi utilizado um sistema reservatório com 7 cilindros ANG de aço inoxidável. Cada cilindro é dotado de uma tubulação perfurada para a distribuição do gás, situada ao longo do seu eixo, garantindo o fluxo radial através do leito adsorvente (Figura 2.20). A principal diferença foi na taxa de adsorção. Concluíram também que o tipo de leito adsorvente tem uma grande influência na capacidade de adsorção.

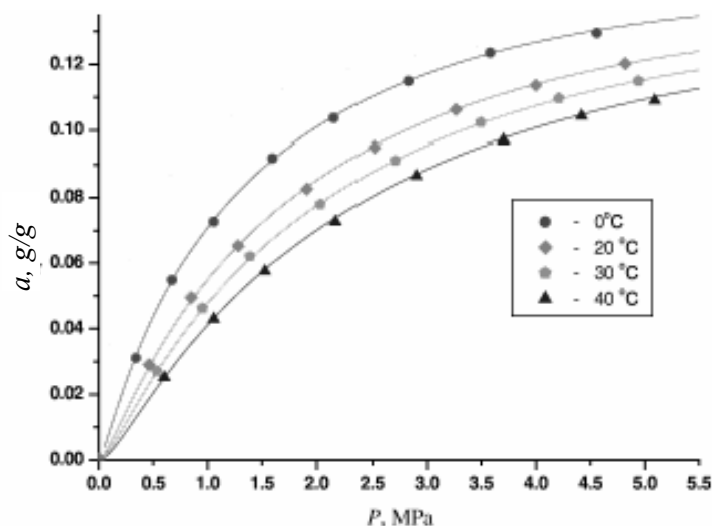


FIGURA 2.19 – Isotermas de adsorção de metano para o carvão “207C”, (VASILIEV et al, 2000).

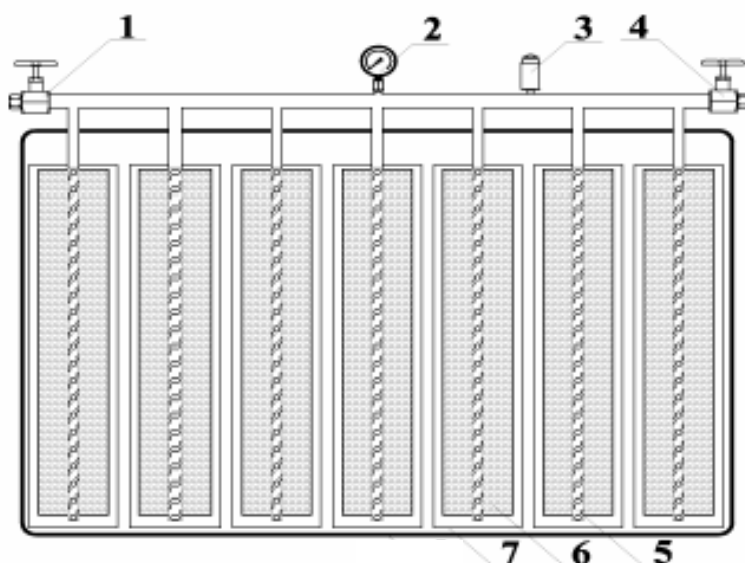


FIGURA 2.20 – Reservatório de GNA com sistema de distribuição radial de gás. 1. Válvula para a entrada do gás, 2. Medidor de pressão, 3. Válvula, 4. Válvula de saída do gás para o motor, 5. Tubulação perfurada para distribuição radial do gás, 6. Leito adsorvente, 7. Reservatório GNA. (VASILIEV et al, 2000).

Os autores realizaram também um estudo relacionado com o controle de temperatura no reservatório. Utilizaram um reservatório para armazenagem e transporte com 14 galerias de GNA (Figura 2.21), feito de alumínio, fabricado por extrusão, com seis tubulações com a função de trocadores de calor dotados de aletas para a intensificação da transmissão de calor. As aletas têm a função de aquecer o leito adsorvente durante a fase de descarga. Os trocadores de calor têm a função de resfriar o leito adsorvente durante o enchimento do tanque com metano. O reservatório, também é dotado de “canais de gás” que garantem uma eficiente saída durante o tempo de serviço. Os trocadores têm um bom desempenho com os gases provenientes da combustão, ou pelo calor fornecido por um aquecedor elétrico. O adsorvente foi colocado em forma de monolitos para assegurar o bom contato com as aletas dos trocadores de calor. A geometria dos monolitos tem boa condutividade térmica na direção radial, o que ajuda a diminuir a temperatura durante a liberação do gás do leito adsorvente.

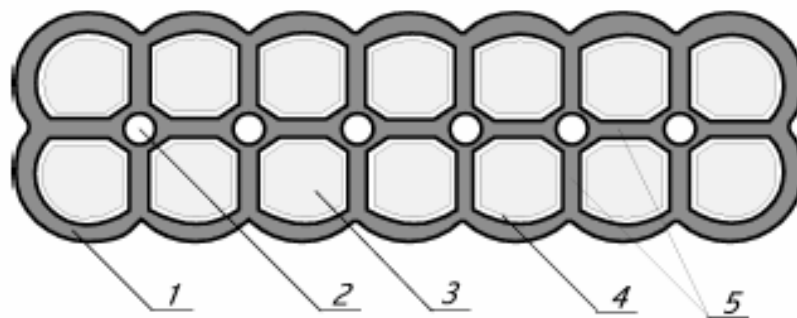


FIGURA 2.21 – Reservatório de GNA com trocadores de calor, secção transversal 1. Envoltório do reservatório, 2. Trocadores de calor, 3. Leito adsorvente, 4. Canais de gás, 5. Aletas de metal, (VASILIEV et al, 2000).

SOUZA et al. (2002) estudaram a viabilidade de novos formatos de reservatórios para GNV. Simularam o comportamento das novas geometrias, fazendo uso do software comercial ALGOR® o qual se baseia no MEF. Os reservatórios foram projetados para trabalhar com GNA a uma pressão interna de 4,0 MPa. Testaram três novos formatos: modelo retangular, modelo elíptico, e um modelo modular. As características de cada um destes modelos são mostradas na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Características do modelos propostos comparadas com as do cilindro comercial.

Propriedade	Cilindro comercial	Modelo Elíptico	Modelo em Retângulo	Modelo com grupos cilindros.
Volume (m ³)	~ 15	~ 26,5	~ 32	2,2 p/ (unidade)
Volume (l)	~ 50	~ 106	~ 128	8,8 p/ (unidade)
Material	A513	A513	A513	Alumínio 2014 – T6
Largura (mm)	350	250	250	100
Altura (mm)	350	500	500	100
Profund. (mm)	920	1300	1300	1300
Espessura (mm)	8	10	10	3

Verificaram que a alternativa em reservatórios modulados apresenta um ganho no que diz respeito ao abastecimento, quando comparado com outras geometrias. Sendo a capacidade hidráulica de cada módulo próximo a 8,8 litros, um conjunto de 5 cilindros pode armazenar 44 litros com 100mm de largura tomados do porta-malas e com dois empilhamentos (um atrás do outro), sendo assim tem-se 10 cilindros, 88 litros (22 m³ de CNG) 200 mm tomados do porta-malas.

Os autores verificaram os deslocamentos obtidos nas análises de deformação crítica. A geometria retangular apresentou um deslocamento superior aos 10 mm (Figura 2.22), a qual resultaria no colapso. Sugeriram que para se obter um processo estável de armazenamento seria preciso trabalhar com comprimentos menores, paredes muito mais espessas ou materiais super resistentes, tornando a fabricação do protótipo pesado, com alto custo e pequenas vantagens.

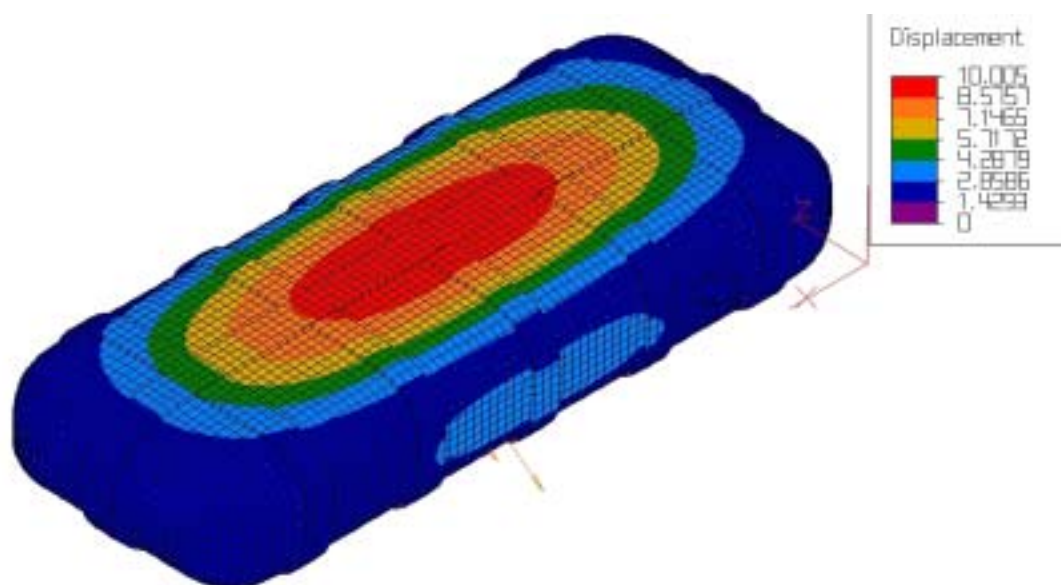


FIGURA 2.22 – Distribuição dos deslocamentos no reservatório retangular (mm), (SOUZA et al, 2002)

Testaram a geometria elíptica para evitar o uso de superfícies planas, e obtiveram deslocamentos superiores aos 13 mm (Figura 2.23). Em função de tais deslocamentos, a viabilidade de construção desta geometria foi descartada.

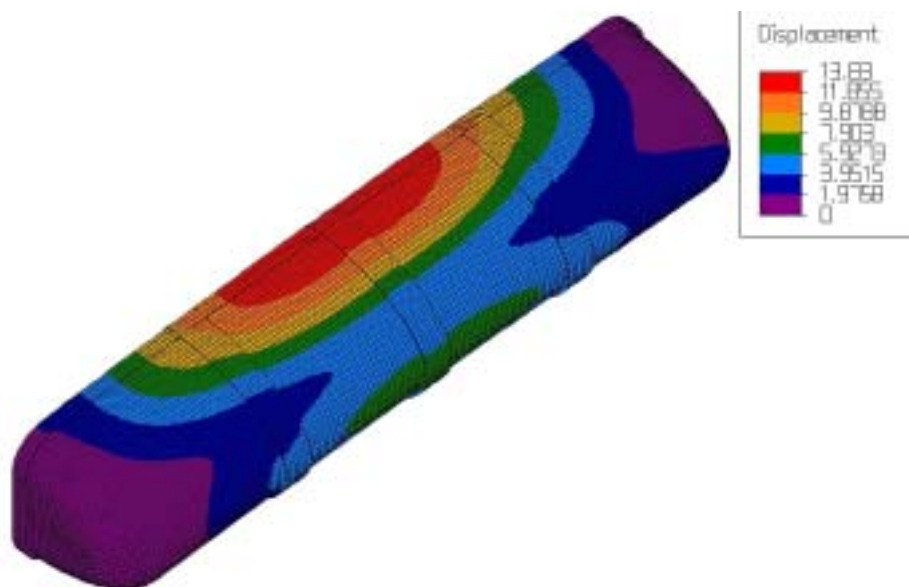


FIGURA 2.23 – Distribuição dos deslocamentos no reservatório elíptico (mm), SOUZA et al. (2002).

Por último analisaram um sistema modular, com várias geometrias as quais ficariam conectadas por meio de vasos comunicantes, cujo número é função da necessidade do usuário. Obtiveram deslocamentos menores aos 0,06 mm (Figura 2.24). Concluíram então que a forma cilíndrica é fundamental para o transporte de fluidos sob alta pressão com o mínimo de tentativa para diminuição de alocação de espaço, uma vez que o ideal seria um corpo esférico.

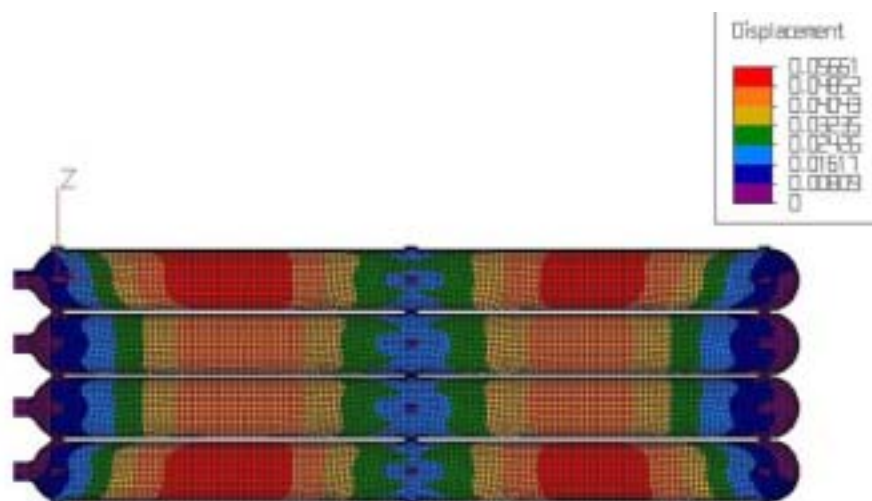


FIGURA 2.24 – Distribuição dos deslocamentos no reservatório modular (mm). SOUZA et al. (2002)

SOUZA & GUERRA (2003) estudaram um reservatório modular com galerias de geometria elíptica. Simularam o comportamento do reservatório fazendo uso do software comercial ALGOR® o qual é baseado no MEF. Aproveitaram os efeitos da pressão interna oferecida pelo gás com uma contrapressão de outro corpo elíptico (Figura 2.25), possibilitando ainda a existência de galerias (Figura 2.26), que minimizam os problemas referentes às altas temperaturas no processo de enchimento e resfriamento excessivo durante o consumo do combustível estocado.

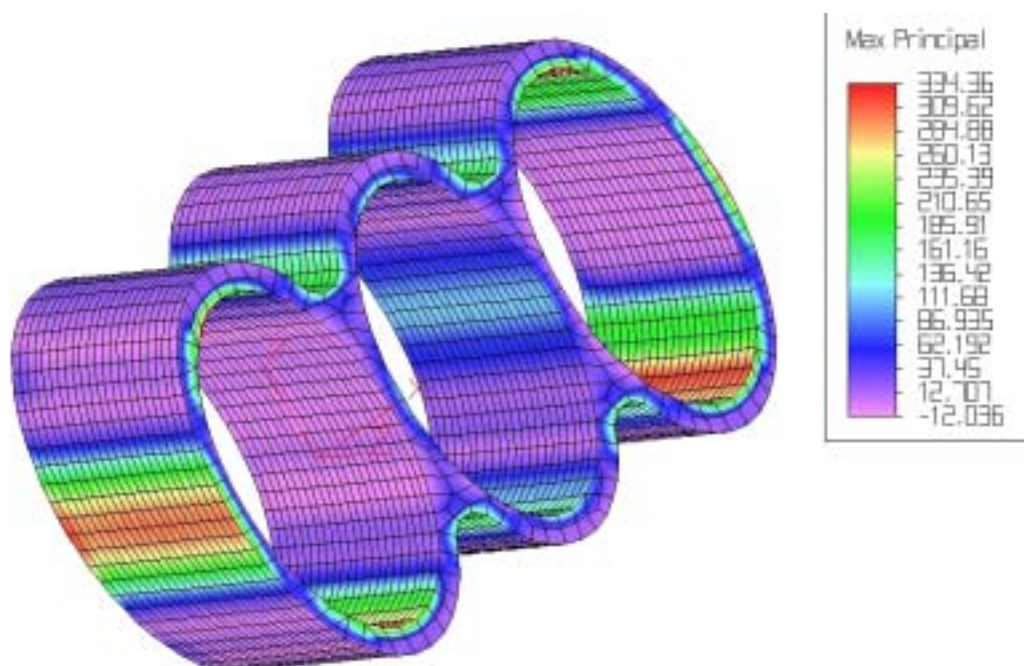


FIGURA 2.25 – Distribuição das tensões (MPa) em corpos elípticos, (SOUZA & GUERRA, 2003).

As regiões que apresentam altos valores de tensões, nos módulos da direita e esquerda, observadas na Figura 2.25, foram eliminadas na proposta final com corpos de metade elíptica e metade cilíndrica (Figura 2.26).

Os autores verificaram a distribuição de tensões, utilizando o critério da tensão principal máxima, e obtiveram uma tensão máxima de 135 MPa. (Figura 2.26), valor que corresponde a 56% da tensão de escoamento do material definido (241,3 MPa).

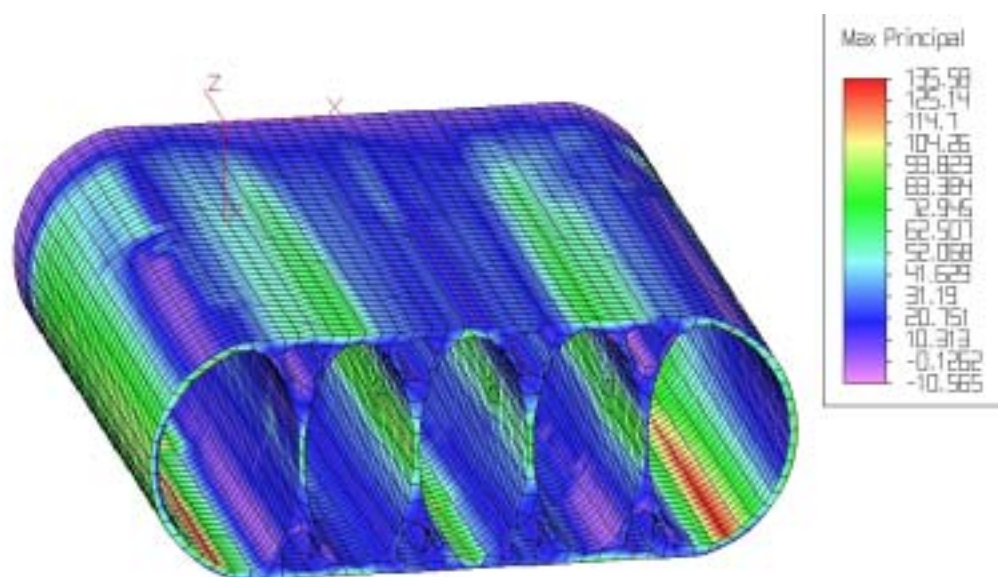


FIGURA 2.26 – Distribuição das tensões (MPa) no protótipo do reservatório de gás natural. $\sigma_{\max} \sim 135$ MPa, (SOUZA & GUERRA, 2003).

Na Tabela 2.2 são comparadas as características gerais do reservatório com galerias elípticas com as do cilindro atual no mercado.

TABELA 2.2 – Dados referentes ao cilindro comercial e modelo de galerias elípticas.

Propriedade	Cilindro comercial	Modelo de galerias elípticas
Volume de Gás Natural (m ³)	15	11 (ANG)
Volume Hidráulico (Litros)	50	~64
Material Pesquisado	4130	6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	900	241,3
Largura (mm)	350	500
Altura (mm)	350	180
Profundidade (mm)	920	1000
Espessura Pesquisada (mm)	8	3,6
Peso (Kg)	77,7	43,2
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	200	40

Verificaram que a alternativa de galerias elípticas apresenta uma diminuição no que diz respeito ao peso, quando comparado com o cilindro atualmente utilizado; porém a autonomia do veículo apresentaria uma diminuição de aproximadamente 30%.

3. FORMULAÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos verificou-se um crescente aumento do consumo de Gás Natural Veicular (GNV) no mundo, uma vez que as vantagens oferecidas pela utilização do GNV são incontáveis do ponto de vista ambiental e econômico. (MOTA, 1998).

O GNL é obtido a temperaturas criogênicas ($\sim -161^{\circ}\text{C}$) e a pressão ambiente. Apresentando uma redução de cerca de 600 vezes o volume original (HOLROYD et al., 1999).

O GNC é o tipo de armazenamento mais utilizado atualmente para uso veicular, este é armazenado a uma pressão entre 15 e 25 MPa (HOLROYD et al., 1999). Um dos principais problemas da utilização do GNC é o peso elevado do tanque de armazenamento em função da alta pressão a que deve ser submetido o mesmo. Este fato diminui a potência do veículo e também aumenta o trabalho do sistema de amortecimento. Outro fator a ser levado em conta é que o elevado volume do tanque diminui o espaço útil do veículo. Estes fatores geram uma necessidade crescente de desenvolver novas tecnologias tanto no campo da geometria, como no uso de novos materiais no projeto dos tanques de armazenamento de GNV.

Como alternativa para o GNC, aparece o GNA, onde sólidos microporosos empacotados no reservatório aumentam a densidade de armazenamento, possibilitando operações a baixas pressões de 3,5 a 4,0 MPa (HOLROYD et al., 1999) o que conseqüentemente acarreta uma redução das tensões aplicadas às

paredes dos reservatórios. Outro parâmetro de comparação entre o GNC e o GNA é a relação de volume de gás natural sobre volume do reservatório (V/V), as quais são de aproximadamente de 220 V/V e 150 V/V respectivamente (COOK & HORNE, 1997).

3.2 METODOLOGIA

Conforme foi observado no capítulo anterior, o uso dos reservatórios de geometria cilíndrica diminui a potência do veículo e também aumenta o trabalho do sistema de amortecimento em função de apresentar peso elevado. Também o elevado volume do tanque diminui o espaço útil do veículo. Com a possibilidade de uso de novos materiais na fabricação de cilindros foi conseguida uma diminuição do peso de até 80% de peso do cilindro atual (MOREIRA, 2001). Porém, o fato de se manter a geometria cilíndrica não resolve o problema da diminuição do espaço do veículo. COOK & HORNE (1997) estudaram um tanque de geometria retangular com estrutura multicelular para GNA, obtendo bons resultados. Este formato permitia o posicionamento embaixo do veículo, e assim a retomada do espaço do porta-malas. SOUZA et al. (2002) estudaram a possibilidade do uso de novas geometrias para GNA, analisaram um tanque com formato retangular, e outro com formato elíptico. Concluíram que estes tipos de formatos não eram viáveis para o GNA. Estudaram também um reservatório constituído de vários cilindros em módulo obtendo resultados favoráveis. SOUZA & GUERRA (2003) estudaram um reservatório com galerias elípticas para GNA, obtendo resultados favoráveis. Assim, verifica-se que a geometria cilíndrica não é insubstituível para o uso com GNV. Dessa forma, surgem como solução, geometrias não convencionais para o corpo dos referidos tanques, objetivando redução da perda do espaço interno no porta-malas e a confecção de tais protótipos com ligas de menor rigidez e peso.

No presente trabalho serão analisados cinco tipos de reservatórios. O primeiro será o cilindro comercial, o qual será tomado como referência (Figura 3.1 a). Em função dos resultados favoráveis obtidos por SOUZA et al. (2002) e SOUZA & GUERRA (2003) serão analisados os reservatórios de cilindros em módulo (modular) (Figura 3.1 b), e o de galerias elípticas (Figura 3.1 c). Serão analisados

também um reservatório com seção longitudinal circular e seção transversal elíptica (Figura 3.1 d); e outro com formato toroidal (Figura 3.1 e).

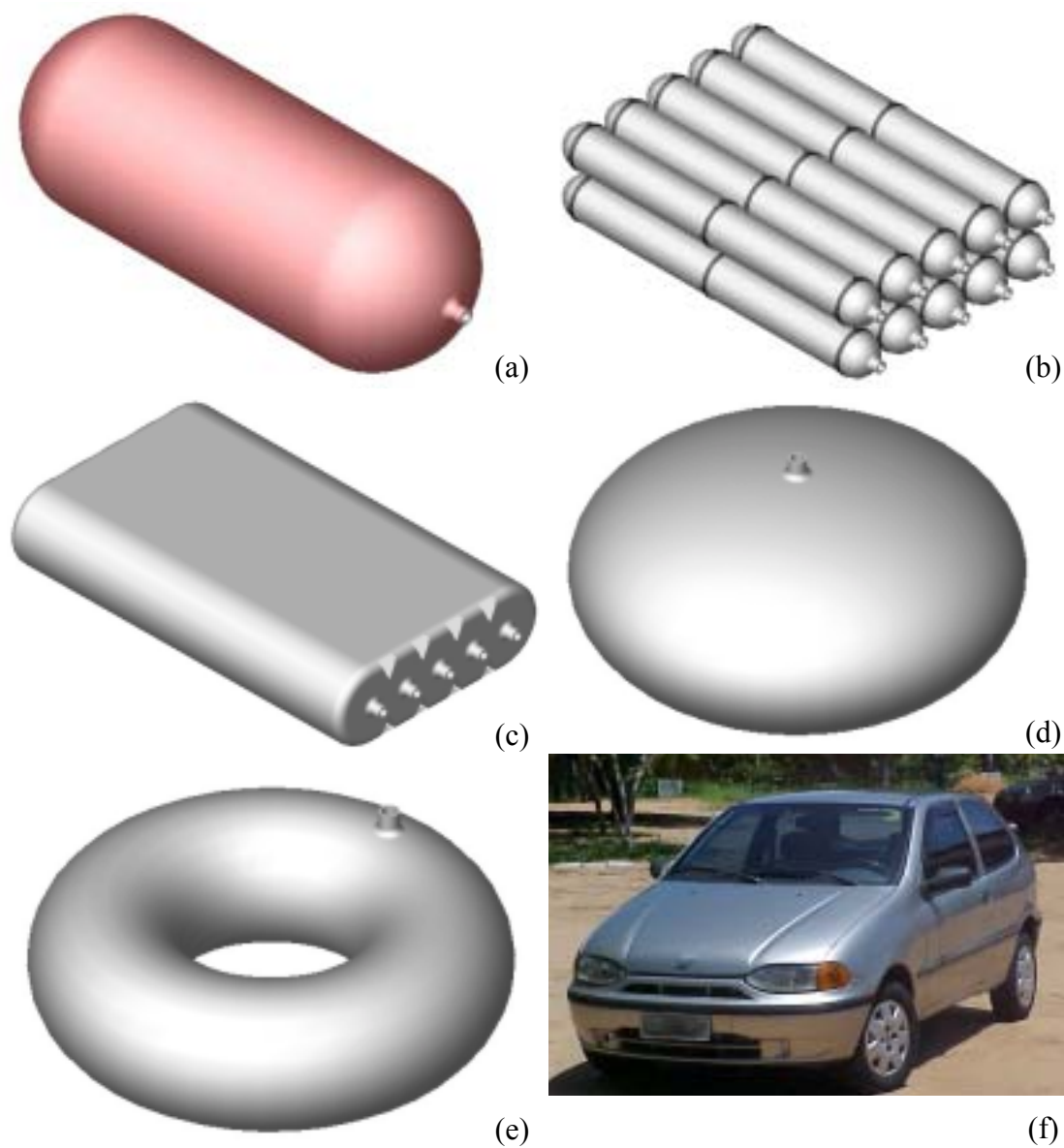


FIGURA 3.1 – (a) Cilindro comercial (b) Reservatório modular (c) Reservatório de galerias elípticas (d) Reservatório elíptico (e) Reservatório toroidal (f) Fiat Palio EX.

Os parâmetros dos reservatórios em estudo são calculados realizando o estudo matemático das tensões internas de trabalho no reservatório. O presente estudo é

dirigido ao veículo Automóvel Fiat Palio EX (Figura 3.1 f) restringindo assim às dimensões dos reservatórios às dimensões do compartimento do porta-malas do referido veículo. Os novos reservatórios são modelados utilizando o software comercial de projeto assistido por computador (CAD) SolidWorks 2001 Plus. Depois é realizada a simulação do comportamento mecânico fazendo uso do software comercial ALGOR o qual se baseia no Método dos Elementos Finitos (MEF), para realizar a comprovação da eficiência dos reservatórios sob a pressão imposta pelo gás tomando como base a norma NBR 12790 ABNT (1995), e a otimização dos reservatórios se for necessário. Por último é realizada a comparação entre as características dos modelos não convencionais e o cilindro comercial.

3.3 ANÁLISE MATEMÁTICA DE TENSÕES

Para uma melhor compreensão do comportamento mecânico dos reservatórios em estudo, do ponto de vista da resistência dos materiais, foi realizada uma análise matemática das tensões desenvolvidas em reservatórios de parede fina sob pressão com geometrias consideradas simples (primitivas); tomando como base a teoria apresentada por HIGDON et al. (1985), POPOV (1998), TIMOSHENKO, et al. (1959); e o estudado por SOUZA et al. (2002), e SOUZA & GUERRA (2003). A análise permitirá calcular os parâmetros dos reservatórios, assim como validar a análise computacional.

3.3.1 Reservatório esférico

A geometria esférica é considerada a geometria ideal para armazenamento de fluidos sob pressão, em função de possuir as tensões internas iguais. No presente estudo não são utilizados reservatórios de geometria esférica mas a análise dessa geometria é tomada como base para a análise das outras geometrias.

Considera-se a situação teoricamente perfeita para armazenamento de fluido sob pressão p . Um vaso de pressão esférico de raio interno r , e espessura de parede t apresenta, por uma razão de simetria, as tensões idênticas nas faces do elemento infinitesimal a analisar (Figura 3.2 a). Considerando-se esse raciocínio pode-se obter

a tensão única a partir do diagrama de corpo livre de uma seção em corte com o plano de referência passando pelo centro do vaso de pressão (Figura 3.2 b).

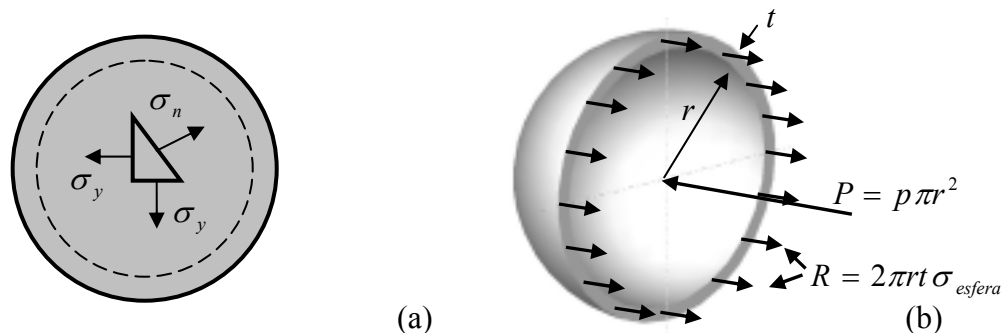


FIGURA 3.2 – Geometria esférica (a) Diagrama do elemento infinitesimal (b) Diagrama de corpo livre

A tensão da esfera σ_{esfera} é obtida realizando a análise do diagrama de corpo livre em corte (HIGDON et al, 1985):

$$\sum F_{Plano} = 0 \quad (1)$$

$$\sigma_{esfera}(2\pi r t) - p(\pi \cdot r^2) = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_{esfera}(2\pi r t) = p(\pi \cdot r^2)$$

$$\sigma_{esfera} = \frac{p(\pi \cdot r^2)}{2\pi r t}$$

$$\sigma_{esfera} = \frac{pr}{2t} \quad (3)$$

3.3.2 Reservatório cilíndrico

Na análise da 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 principais no elemento infinitesimal (Figura 3.3), no caso σ_1 e σ_2 , para os quais tem-se tensão radial e tensão longitudinal respectivamente (HIGDON et al, 1985).

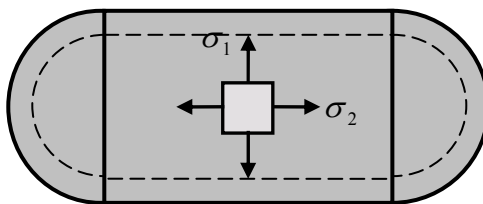


FIGURA 3.3 – Diagrama do elemento infinitesimal para o reservatório cilíndrico

É importante considerar que os esforços internos atuantes em determinada porção da parede são tangentes à superfície do vaso. Sendo assim, as tensões resultantes em um elemento infinitesimal da parede, tem atuação em um plano tangente à superfície do cilindro (Figura 3.4).

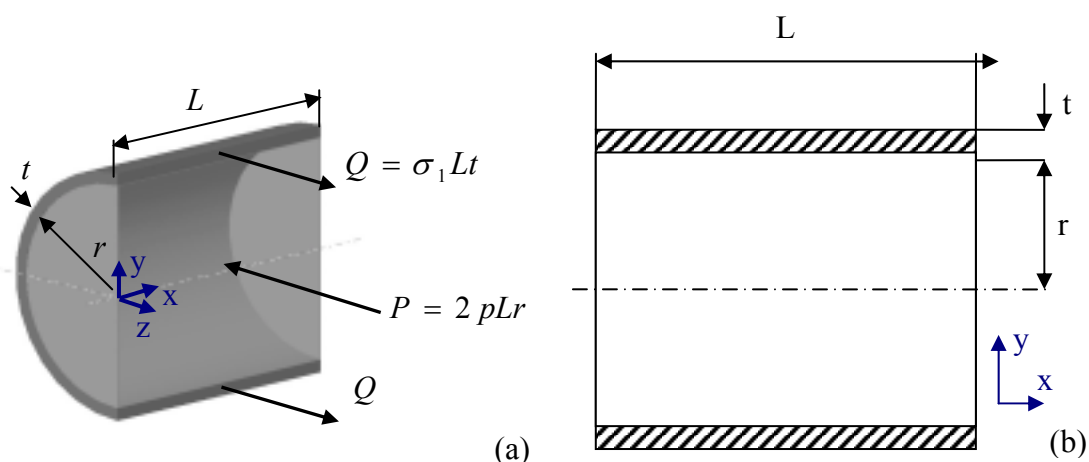


FIGURA 3.4 – Reservatório cilíndrico (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_1), (b) Esquema do corte no plano "xy".

A determinação de σ_1 consiste na análise do diagrama de corpo livre em corte, onde este é limitado por um plano paralelo a "xy" passando pelo centro do cilindro, como também, dois outros planos paralelos a "yz" e entre si a uma distância L . Com isso pode-se identificar as forças de reação no sentido positivo do eixo "z", de maneira que a equação resulta no produto da tensão a determinar pela área da

seção transversal da parede (Figura 3.4). Outro conjunto de forças a verificar é proveniente da própria pressão aplicada em oposição ao eixo “z”. Essa tem seu valor multiplicado à área da “casca” interna, definida por πrL , resultando, por fim, na força resultante para o somatório. Escrevendo a equação de equilíbrio:

$$\sum F_z = 0 \quad (4)$$

$$P - 2Q = 0$$

$$\sigma_1(2t\Delta x) - p(2r\Delta x) = 0 \quad (5)$$

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \quad (6)$$

A determinação da tensão longitudinal é semelhante ao anteriormente descrito para a esfera. As forças atuantes no plano de referência são as de reação, determinadas com o produto de σ_2 pela área da seção transversal (coroa circular) e as forças devido à pressão atuante na área da “tampa” quantificada pela multiplicação das referidas grandezas (Figura 3.5).

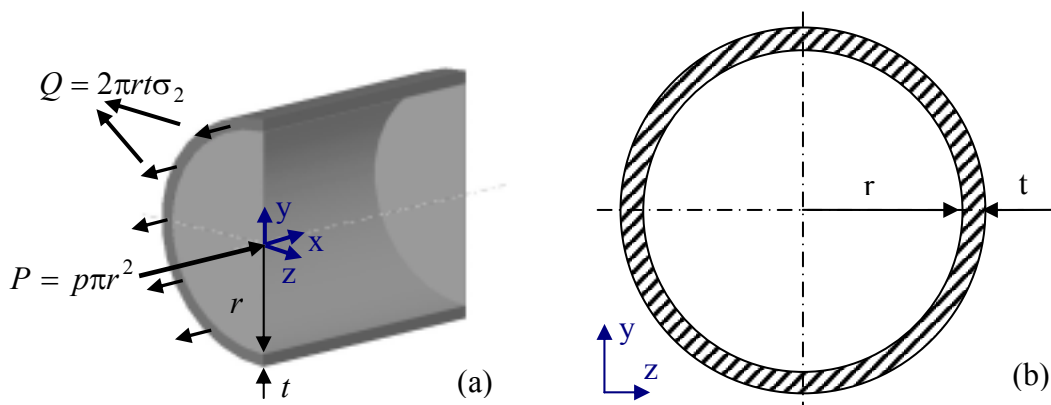


FIGURA 3.5 – Reservatório cilíndrico (a) Diagrama de corpo livre para a tensão longitudinal (σ_2), (b) Esquema do corte no plano “zy”.

Dessa forma σ_2 fica definida como:

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (7)$$

3.3.3 Reservatório de galerias elípticas

Considerou-se um vaso de pressão de galerias elípticas com semi-eixos a e b , comprimento L , e espessura t .

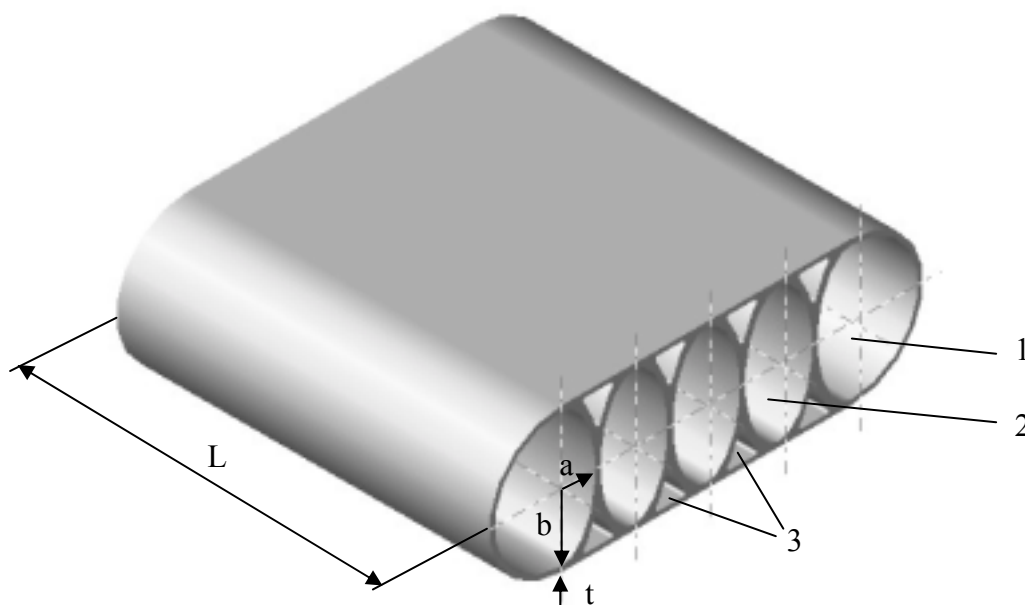


FIGURA 3.6 – Esquema do reservatório de galerias elípticas em corte. 1. Galerias semicirculares semielípticas; 2. Galeria elíptica 3. Galerias a serem usadas como trocadores de calor.

Na Figura 3.6 pode-se observar que o reservatório apresenta dois tipos de galerias submetidas à pressão do gás, as galerias semicirculares semielípticas e as galerias elípticas, em função disso será realizada uma análise individual para cada tipo de galeria.

A) Análise das galerias elípticas

No caso da tensão radial σ_1 , enquanto que na esfera e no cilindro os planos de atuação da pressão são sempre os mesmos, para qualquer inclinação, o reservatório de galerias elípticas apresenta um plano para cada corte longitudinal investigado, resultando assim o surgimento de duas tensões radiais σ_{1a} e σ_{1b} (Figura 3.7). A determinação das tensões σ_{1a} , σ_{1b} e σ_2 no elemento infinitesimal (Figura 3.7), decorre da análise do diagrama de corpo livre em corte realizada nos planos da geometria em análise.

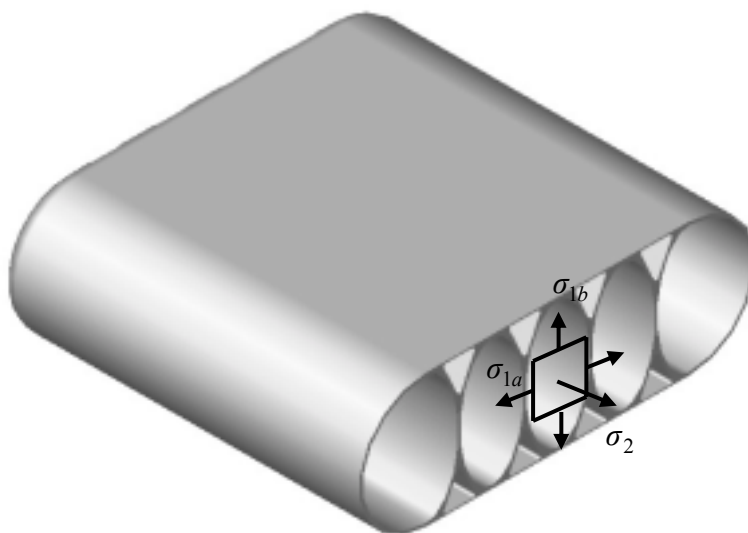


FIGURA 3.7 – Diagrama do elemento infinitesimal do reservatório de galerias elípticas.

As tensões σ_{1a} e σ_{1b} são determinadas efetuando a análise do diagrama de corpo livre em corte, efetuada nos planos “yz” e “xz” perpendiculares aos semi-eixos “a” e “b” respectivamente (Figuras 3.8 e 3.9 a, b).

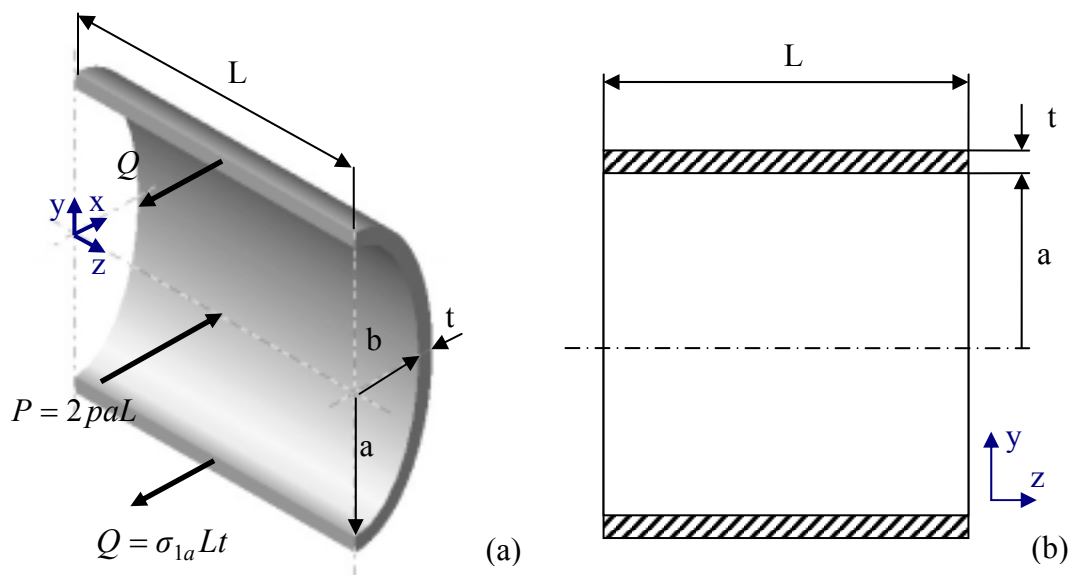


FIGURA 3.8 – Reservatório de galerias elípticas, galeria elíptica (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_{1a}), (b) Esquema do corte no plano “yz”.

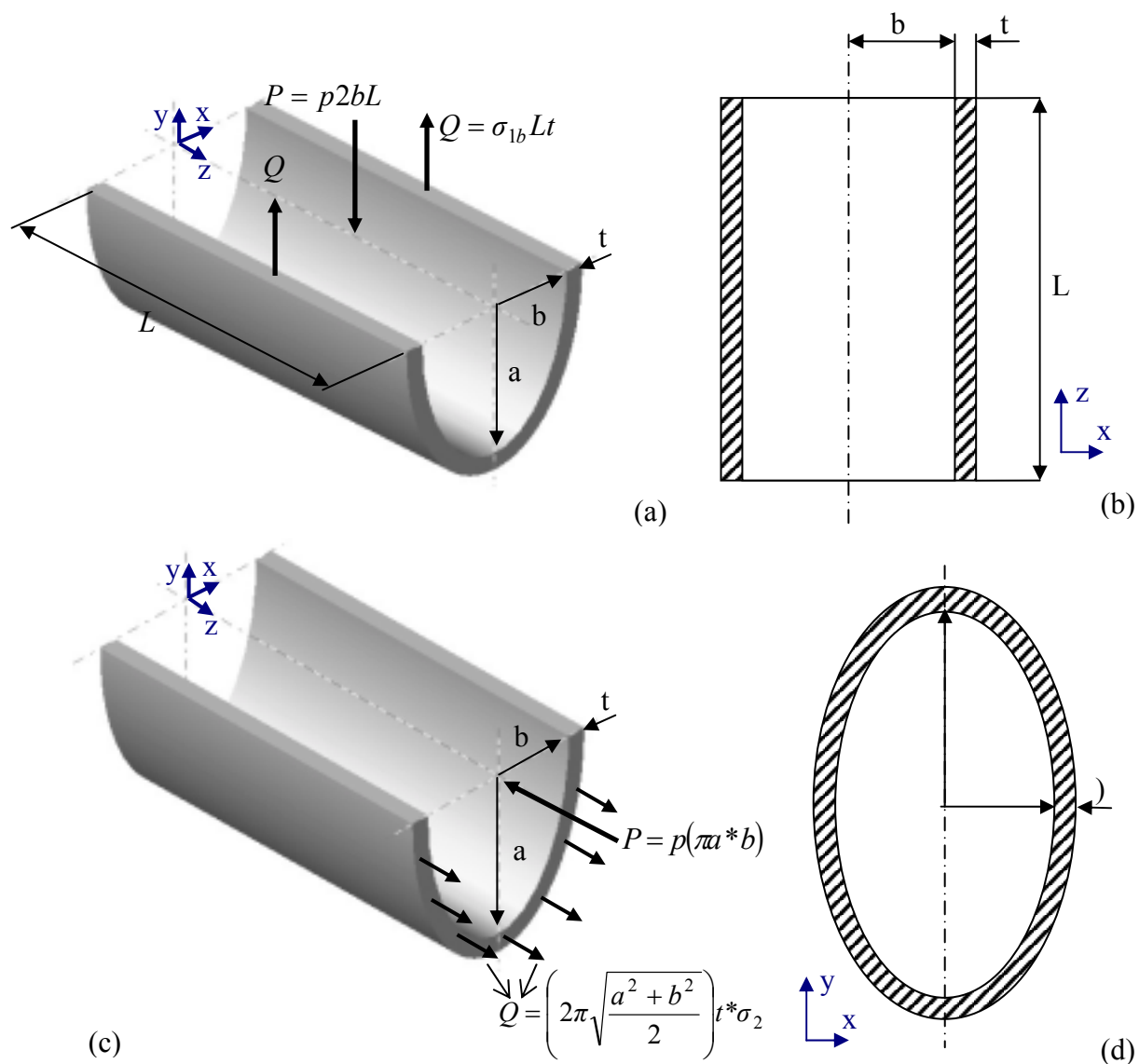


FIGURA 3.9 – Reservatório de galerias elípticas, galeria elíptica (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_{1b}), (b) Esquema do corte no plano “xz”, (c) Diagrama de corpo livre para a tensão longitudinal (σ_2), (d) Esquema do corte no plano “xy”.

Dessa maneira as tensões σ_{1a} e σ_{1b} ficam definidas como:

$$\sigma_{1a} = \frac{pa}{t} \quad (8)$$

$$\sigma_{1b} = \frac{pb}{t} \quad (9)$$

A tensão longitudinal σ_2 é obtida realizando o equilíbrio de forças no plano “yz” (Figura 3.9 c, d).

$$\sigma_2 = \frac{p(a*b)}{\left(2\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}\right)t} \quad (10)$$

B) Análise das galerias semicirculares semielípticas

O elemento infinitesimal das galerias semicirculares semielípticas apresenta três tensões as serem determinadas σ_{1a} , σ_{1b} e σ_2 (Figura 3.10).

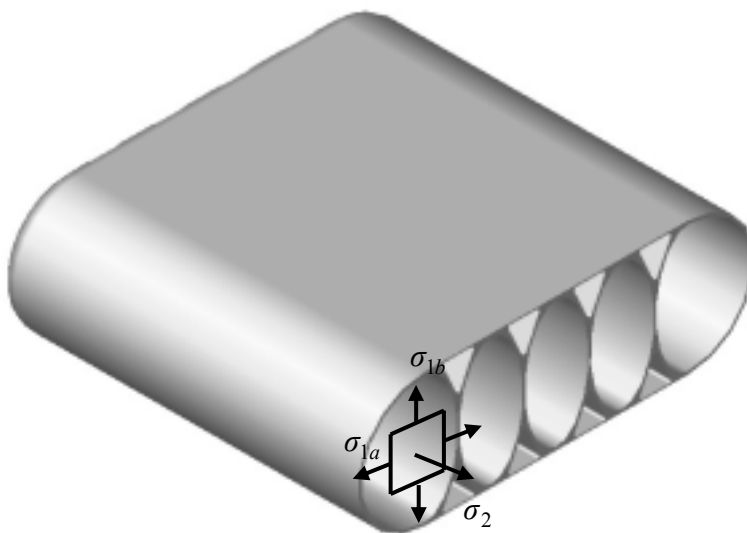


FIGURA 3.10 – Diagrama do elemento infinitesimal do reservatório de galerias elípticas.

Assim as tensões σ_{1a} e σ_{1b} são determinadas efetuando a análise do diagrama de corpo livre em corte, efetuada nos planos “yz” e “xz” perpendiculares aos semi-eixos “a” e “b” respectivamente (Figura 3.11).

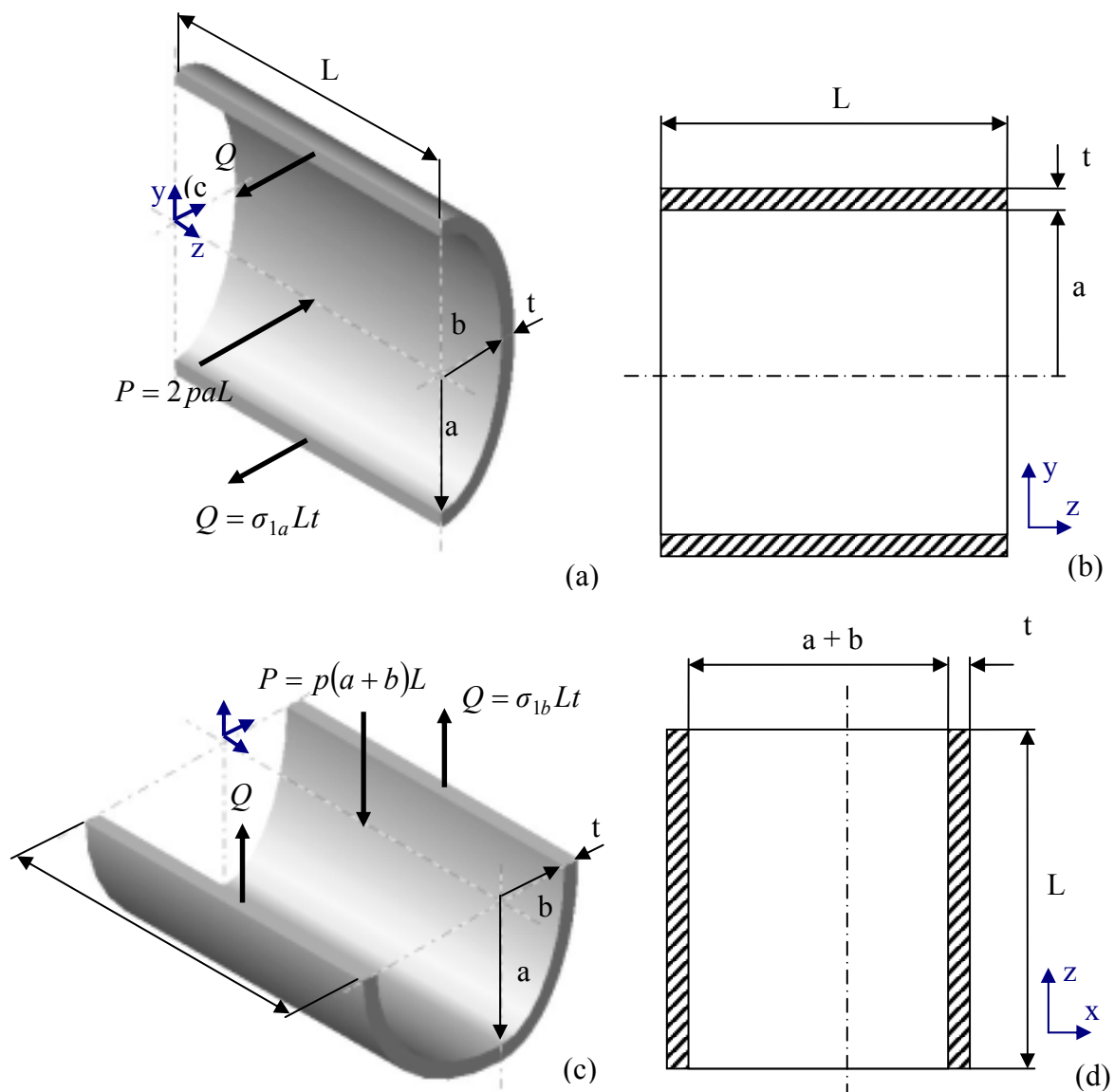


FIGURA 3.11 – Reservatório de galerias elípticas, galeria semicircular semielíptica
 (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_{1a}), (b) Esquema do corte no plano “yz”. (c) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_{1b}), (d) Esquema do corte no plano “xz”.

As tensões σ_{1a} e σ_{1b} ficam definidas como:

$$\sigma_{1a} = \frac{pa}{t} \quad (11)$$

$$\sigma_{1b} = \frac{p(a+b)}{2t} \quad (12)$$

A tensão radial (σ_2) é obtida efetuando o equilíbrio de forças no plano “xy”.
(Figura 3.12).

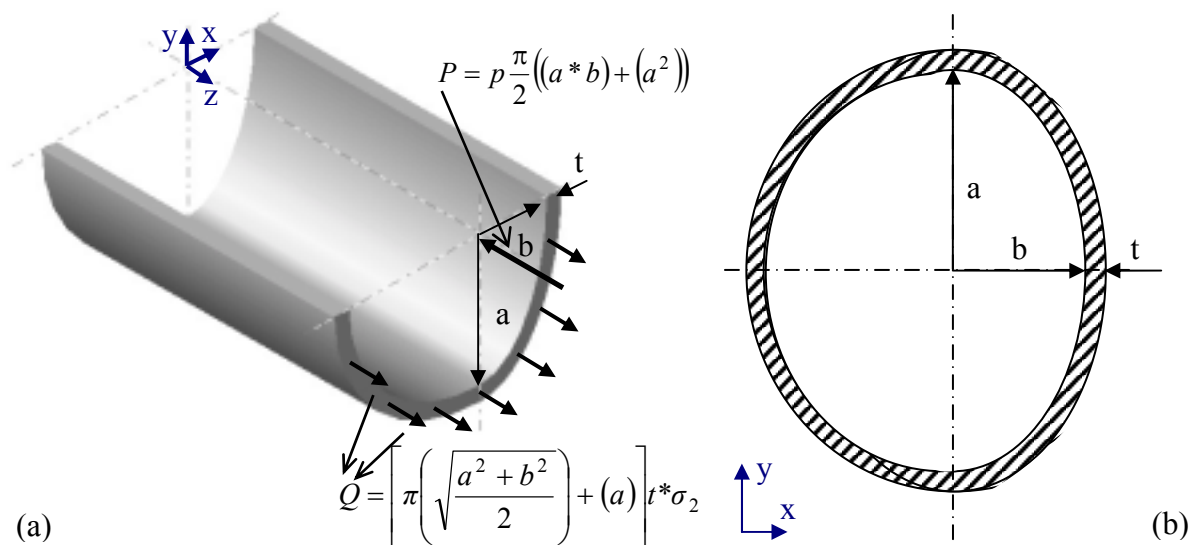


FIGURA 3.12 – Reservatório de galerias elípticas, galeria semicircular semielíptica
(a) Diagrama de corpo livre para a tensão longitudinal (σ_2), (b) Esquema do corte no plano “xy”.

A tensão σ_2 fica definida como:

$$\sigma_2 = \frac{\frac{p}{2} ((a*b) + (a^2))}{\left[\left(\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} \right) + (a) \right] t} \quad (13)$$

3.3.4 Reservatório elíptico

Considerou-se um vaso de pressão de seção longitudinal circular e seção transversal elíptica com semi-eixos a e b , comprimento L , e espessura t . A determinação das tensões σ_1 e σ_2 , no elemento infinitesimal (Figura 3.13), decorre da análise do diagrama de corpo livre em corte realizada nos planos da geometria em análise.

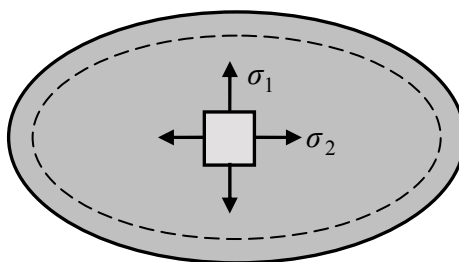


FIGURA 3.13 – Diagrama do elemento infinitesimal do reservatório elíptico

As tensões σ_1 e σ_2 são determinadas efetuando a análise do diagrama de corpo livre em corte, efetuada nos planos “xz” e “xy” respectivamente (Figuras 3.14).

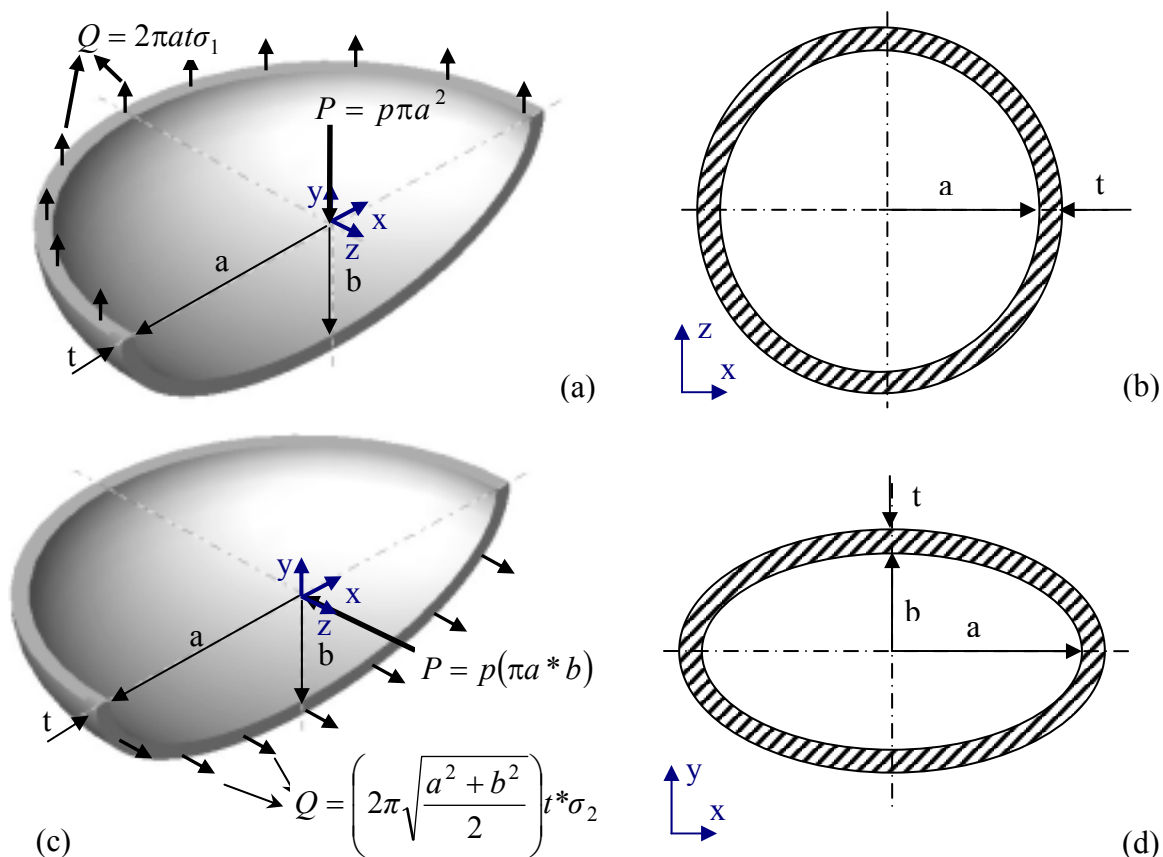


FIGURA 3.14 – Reservatório elíptico (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_1), (b) Esquema do corte no plano “xz”, (c) Diagrama de corpo livre para a tensão longitudinal (σ_2), (d) Esquema do corte no plano “xy”.

As tensões σ_1 e σ_2 ficam definidas como:

$$\sigma_1 = \frac{pr}{2t} \quad (14)$$

$$\sigma_2 = \frac{p(a*b)}{\left(2\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}\right)t} \quad (15)$$

3.3.5 Reservatório toroidal

Por último será analisado o reservatório toroidal. Considerando um vaso de pressão de geometria toroidal com raio externo R , raio interno r , e espessura t . A determinação das tensões σ_1 e σ_2 , no elemento infinitesimal (Figura 3.15), decorre da análise do diagrama de corpo livre em corte realizada nos planos da geometria em análise.

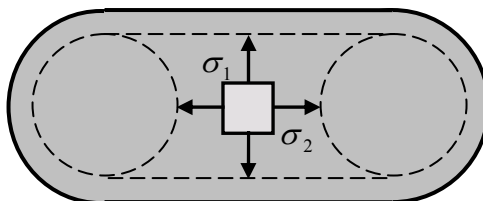


FIGURA 3.15 – Geometria toroidal (a) Diagrama do elemento infinitesimal (b) Diagrama de corpo livre.

As tensões σ_1 e σ_2 , são determinadas efetuando a análise do diagrama de corpo livre em corte nos planos “xz” e “xy” respectivamente (Figura 3.16) e ficam definidas como:

$$\sigma_1 = \frac{p.(R^2 - r^2)}{2t.[(R - 2r) + R]} \quad (15)$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (16)$$

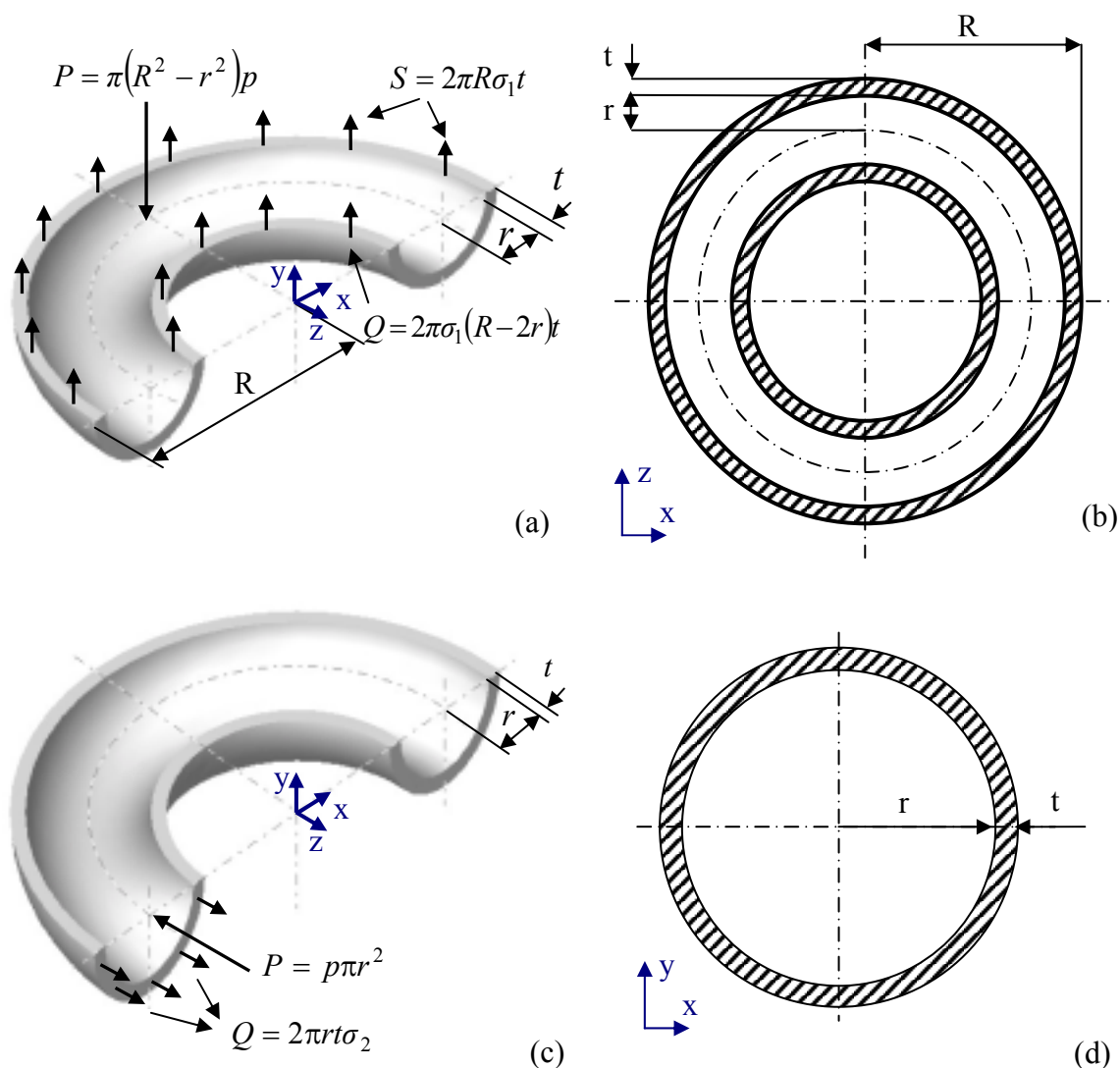


FIGURA 3.16 – Reservatório elíptico (a) Diagrama de corpo livre para a tensão radial (σ_1), (b) Esquema do corte no plano “xz”. (c) Diagrama de corpo livre para a tensão longitudinal (σ_2), (d) Esquema do corte no plano “xy”.

3.4 CÁLCULO DAS ESPESURAS DE PAREDE

As expressões para determinar a espessura de parede foram obtidas a partir das equações (6) a (15). Para o cálculo das espessuras de parede é necessário considerar o fator de segurança (s).

A) Reservatório de Geometria Cilíndrica

Espessura de parede em função da tensão radial (σ_1).

$$t = \frac{pr}{\left(\frac{\sigma_1}{s}\right)} \quad (17)$$

Espessura de parede em função da tensão longitudinal (σ_2)

$$t = \frac{pr}{2\left(\frac{\sigma_2}{s}\right)} \quad (18)$$

B) Reservatório de Galerias Elípticas.

Galeria elíptica

Espessura de parede em função da tensão radial (σ_{1a}).

$$t = \frac{pa}{\left(\frac{\sigma_{1a}}{s}\right)} \quad (19)$$

Espessura de parede em função da tensão radial (σ_{1b}).

$$t = \frac{pb}{\left(\frac{\sigma_{1b}}{s}\right)} \quad (20)$$

Espessura de parede em função da tensão longitudinal (σ_2).

$$t = \frac{p(a*b)}{\left(2\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}\right)\left(\frac{\sigma_2}{s}\right)} \quad (21)$$

Galeria semicircular semielíptica

Espessura de parede em função da tensão radial (σ_{1a}).

$$t = \frac{p(a+b)}{2\left(\frac{\sigma_{1a}}{s}\right)} \quad (22)$$

Espessura de parede em função da tensão radial (σ_{1b}).

$$t = \frac{pb}{\left(\frac{\sigma_{1b}}{s}\right)} \quad (23)$$

Espessura de parede em função da tensão longitudinal (σ_2).

$$t = \frac{\frac{p}{2}((a*b) + (a^2))}{\left[\left(\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}\right) + (a)\right]\left(\frac{\sigma_2}{s}\right)} \quad (24)$$

C) Reservatório elíptico.

Espessura de parede em função da tensão radial (σ_1).

$$t = \frac{pa}{2\left(\frac{\sigma_1}{s}\right)} \quad (25)$$

Espessura de parede em função da tensão longitudinal (σ_2).

$$t = \frac{p(a*b)}{\left(2\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}\right)\left(\frac{\sigma_2}{s}\right)} \quad (26)$$

D) Reservatório toroidal

Espessura de parede em função da tensão radial (σ_1).

$$t = \frac{p(R^2 - r^2)}{2\left(\frac{\sigma_1}{s}\right)[(R - 2r) + R]} \quad (27)$$

Espessura de parede em função da tensão longitudinal (σ_2).

$$t = \frac{pr}{2\sigma_2} \quad (28)$$

3.5 MODELAGEM

Uma vez calculados os parâmetros dos reservatórios fazendo uso de análise analítica, a modelagem é realizada no software comercial de CAD SolidWorks 2001. As ferramentas disponíveis no pacote proporcionam informações como o peso, volume, capacidade hidráulica dos reservatórios modelados; também permitem alterar parâmetros como material e espessura de parede.

3.6 SIMULAÇÃO COM ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica para determinar uma solução aproximada das equações diferenciais que representam os vários problemas em engenharia. Consiste em transformar as equações que estão escritas em forma contínua num sistema de equações discretas, cujas incógnitas são valores pontuais. Em outras palavras, faz-se a aproximação do meio contínuo por um modelo discreto.

A utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) permite simular o comportamento mecânico apresentado por modelos geométricos, permitindo também realizar uma sucessão de análises e modificações das características, com o objetivo de se alcançar uma solução satisfatória.

Quando surge a necessidade de resolver um problema pelo MEF, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas, parâmetros dos quais depende o tipo de análise a ser utilizado. Utilizando o MEF podem ser realizados os seguintes tipos de análises:

- Análise de deformações e tensões em peças mecânicas;
- Vibração mecânica (frequências naturais e modos de vibração);
- Transferência de calor (condução, convecção, radiação);
- Mecânica dos fluidos;

- Fenômenos elétricos, acústicos, etc.

O software utilizado, ALGOR® disponibiliza uma série de tipos de análises. Para a simulação do comportamento dos reservatórios é realizada a análise linear estática, a qual, segundo ALGOR USER'S GUIDE (2000); é realizada considerando os seguintes parâmetros.

- As magnitudes ou o sentido do carregamento não mudam com o tempo.
- A mudança no sentido do carregamento devido à deformação é pequena.
- O carregamento origina somente deflexões e/ou rotações pequenas (dentro da região elástica da curva de tensão-deformação).
- As condições de contorno não mudarão significativamente.
- São desconsiderados os efeitos da inércia.

As ferramentas apresentadas pelo ALGOR® permitem também selecionar o tipo de geometria, tipo de elementos, material e pressão interna. Para as análises realizadas, devido à complexidade dos modelos, o tipo da geometria é considerado como sólida. Em função da geometria sólida os elementos são considerados sólidos tridimensionais e o modelo do material isotrópico.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Tomando como base a teoria apresentada no capítulo anterior foram calculados os parâmetros dos seguintes reservatórios:

- Cilindro comercial Cilbras de 15 m³ (Figura 4.1 a), o qual foi tomado como referência.
- Modelo com cilindros menores em módulo, o qual foi denominado como reservatório modular (Figura 4.1 b) e que foi estudado por SOUZA et al., (2002)
- Reservatório de galerias elípticas (Figura 4.1. c) estudado por SOUZA & GUERRA (2003)
- Reservatório com seção longitudinal circular e de seção transversal elíptica o qual será denominado como reservatório elíptico (Figura 4. 1 d).
- Reservatório toroidal (Figura 4. 1 e);

Os parâmetros de todos os reservatórios foram calculados para GNC e GNA; usando dois materiais diferentes disponíveis atualmente no mercado, aço 4130 e alumínio 6061-T6.

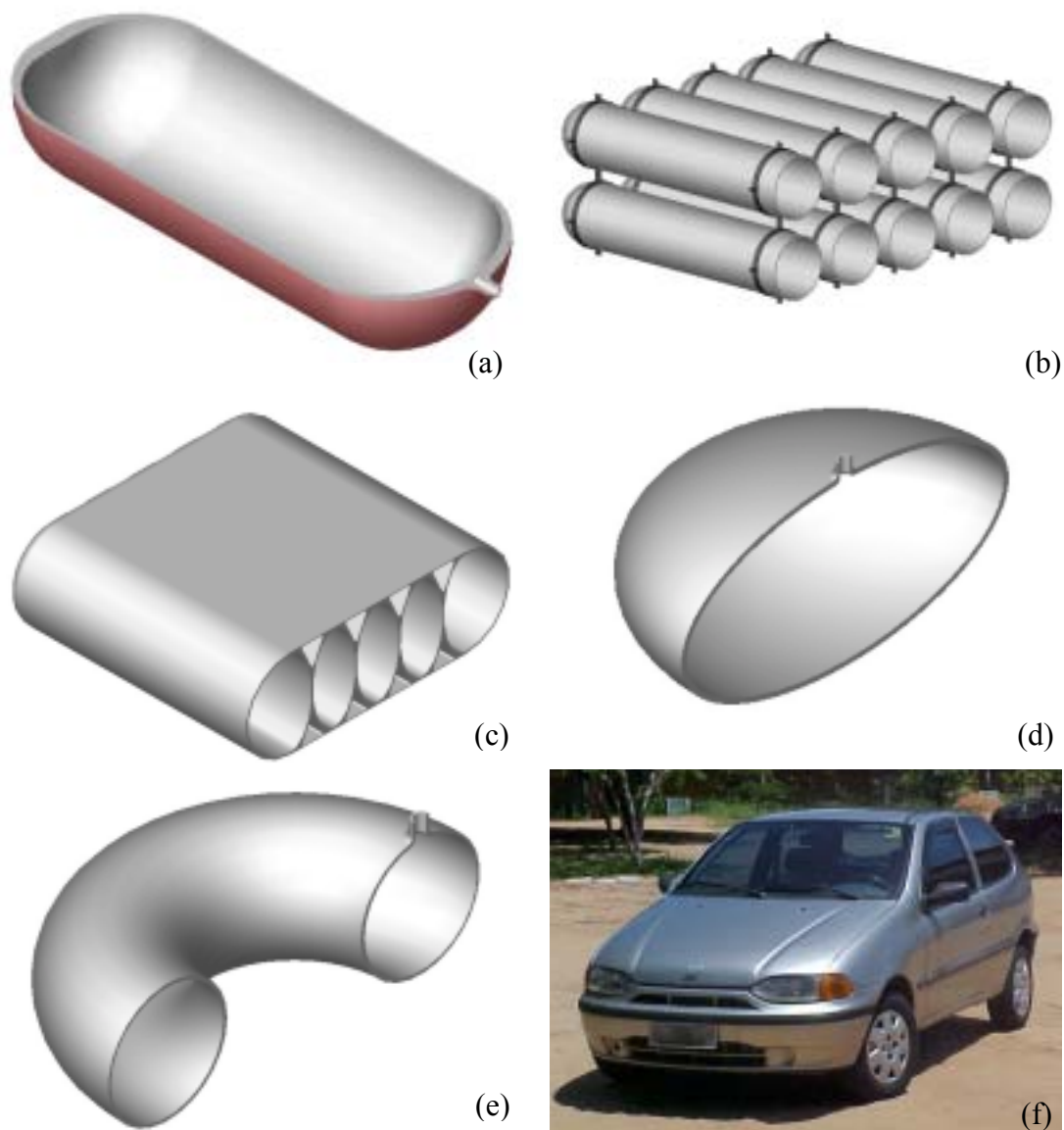


FIGURA 4.1 – (a) Seção transversal do cilindro comercial (b) Seção transversal do reservatório modular (c) Seção transversal do reservatório de galerias elípticas (d) Seção transversal do reservatório elíptico (e) Seção transversal do reservatório toroidal (f) Automóvel Fiat Palio EX

O modelo de veículo tomado como referência para a instalação do protótipo é um Automóvel Fiat Palio EX (Figura 4.1 f) restringindo assim às dimensões dos reservatórios às dimensões do compartimento do porta-malas do referido veículo (Figura 4.2 a). O surgimento dos reservatórios modular (de cilindros em módulo), e

de galerias elípticas, estudados previamente por SOUZA et al., (2002) e SOUZA & GUERRA, (2003), vem da necessidade de diminuir o espaço ocupado no porta-malas pelo cilindro (Figura 4. 2 b), sendo esses posicionados no fundo do porta-malas (Figura 4.3 a, b), com menor altura à do cilindro comercial.

O posicionamento dos protótipos modular e de galerias elípticas acarretaria em um problema nos veículos que possuem a cavidade do pneu de reserva no porta-malas (Figura 4.3 c) tornando-se um obstáculo para a retirada do pneu em questão. Os formatos toroidal e elíptico têm a possibilidade de instalação na cavidade do pneu (Figura 4.3 d, e). Tendo-se ocupada a cavidade do pneu de reserva pelo reservatório, surge a necessidade do reposicionamento do mesmo. Uma solução viável seria realizar a adaptação do automóvel colocando o pneu na parte posterior da porta traseira (Figura 4.3 f). Pode-se observar que o reposicionamento não interfere na visualização tanto das lanternas traseiras assim como da placa do veículo. Esta solução pode ser aplicada também no caso em que o reservatório modular e o reservatório de galerias elípticas sejam instalados, possibilitando também as combinações dos reservatórios modular e toroidal; e de galerias elípticas e toroidal, em casos que seja requerida uma maior autonomia do veículo. A combinação dos reservatórios modular e elíptico; assim como de galerias elípticas e elíptico, não seria possível em função do reservatório elíptico possuir uma altura maior do que a cavidade do pneu.

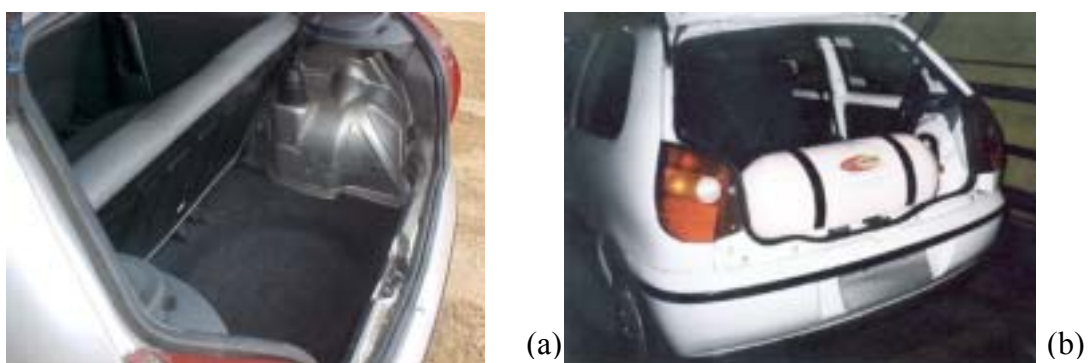


FIGURA 4.2 – (a) Porta-malas do automóvel Fiat Palio EX (b) Porta-malas do automóvel ocupado pelo cilindro comercial



FIGURA 4.3 – Fiat Palio EX (a) Reservatório modular instalado no porta-malas (b) Reservatório de galerias elípticas instalado no porta-malas (c) Cavidade para o pneu reserva (d) Protótipo elíptico posicionado na cavidade do pneu de reserva (e) Protótipo toroidal posicionado na cavidade do pneu de reserva. (f) Reposicionamento do pneu de reserva na porta traseira do veículo.

4.2 RESULTADOS NUMÉRICOS E ANÁLISE

Como primeiro passo foi realizado o estudo da geometria cilíndrica existente no mercado atual. Esse estudo foi tomado como referência de comparação para os novos modelos propostos. A norma NBR 12790 ABNT (1995) estabelece que a espessura da parede dos reservatórios de GNV, deve ser tal que a tensão na parede não ultrapasse os 520 MPa. As espessuras dos reservatórios foram calculadas baseando-se na norma NBR 12790 ABNT (1995) em função das pressões internas impostas pelo gás, GNC (20 MPa) e GNA (4 MPa) com Aço 4130 (Cr-Mo) e Alumínio 6061-T6. Para o caso do alumínio a tensão foi calculada tomando como referência a do aço resultando esta em 140 MPa.

4.2.1 Reservatório cilíndrico

Foi analisado um cilindro comercial CILBRAS de 15m³ com espessura de parede na ordem de 8 mm, comprimento total de 920 mm, diâmetro de 350 mm e corpo cilíndrico de aproximadamente 650mm. A pressão de trabalho é de 200 kgf/cm² (20 Mpa). As ogivas do recipiente apresentam um aumento de espessura que chega até 30 mm em sua base e próximo ao gargalo, como consequência do processo de fabricação, que é o repuxamento com conformação das extremidades.

A possibilidade de trabalhar com materiais mais leves é bastante coerente quando se pensa em manter a geometria cilíndrica para abastecimento através do GNA, reduzindo-se, portanto, a pressão de trabalho. Como primeira alternativa pode-se reduzir a espessura da parede do cilindro ou aumentar seu raio mantendo os 8 mm de espessura e conservando-se a composição. Outro caminho a seguir é a produção de recipientes com materiais mais leves.

A alternativa de aumentar o raio do cilindro resultaria numa perda do espaço do porta-malas ainda maior, o que torna inviável esta alternativa para os objetivos do presente trabalho. As alternativas, de reduzir a espessura da parede e o uso de matérias mais leves, foram avaliadas.

Assim foram calculados os parâmetros do cilindro comercial submetido às pressões internas impostas pelos dois tipos de armazenamento de gás (GNC e GNA), utilizando dois materiais disponíveis atualmente no mercado, Aço 4130 e Alumínio 6061 T-6. O aço 4130 é o material usado atualmente na fabricação dos cilindros comerciais Cilbras. O alumínio 6061-T6, é utilizado como selante na fabricação de cilindros para GNC tipo 2 e 3 (MDIC-IMETRO PORTARIA Nº 74, 2001).

Os parâmetros para o cilindro comercial com GNC em Aço 4130 e Alumínio 6061-T6 são mostrados na tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Características do cilindro comercial com GNC de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6.

Propriedade	Cilindro comercial em Aço 4130	Cilindro comercial em Alumínio 6061- T6
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,068
Relação V/V	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	15	15
Tensão de Escoamento (MPa)	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	2700
Largura (mm)	350	350
Altura (mm)	350	350
Profundidade (mm)	920	920
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	200	200
Espessura calculada (mm)	8	29
Peso (kg)	78,2	121,4

Na tabela 4.1. pode-se observar que para o caso do reservatório fabricado em Alumínio, o peso se incrementa para 155% do cilindro comercial em Aço. Embora o alumínio seja um material mais leve, em função de apresentar menor densidade que a do aço, pode-se observar que a tensão de escoamento do mesmo (alumínio) é muito menor à do aço, o que requer o uso de maiores espessuras de parede.

Os parâmetros para o cilindro comercial com GNA em Aço 4130 e Alumínio 6061-T6 são mostrados na tabela 4.2.

TABELA 4.2 – Características do cilindro comercial com GNA de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6.

Propriedade	Cilindro comercial em Aço 4130	Cilindro comercial em Alumínio 6061- T6
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,068
Relação V/V	150	150
Volume de Gás Natural (m ³)	10,2	10,2
Tensão de Escoamento (MPa)	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	2700
Largura (mm)	350	350
Altura (mm)	350	350
Profundidade (mm)	920	920
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	40	40
Espessura calculada (mm)	1,6	5,9
Peso (kg)	15,5	34,0

Na tabela 4.2. pode-se observar que com o uso do GNA a espessura e em conseqüência o peso do reservatório diminuem para 20% do caso com GNC, nota-se também que a capacidade de armazenamento de gás (Volume de Gás Natural) diminui em função da diminuição da relação V/V.

Pode-se observar que para ambos os casos, o GNC e o GNA, os reservatórios projetados em Aço apresentaram menor peso do que os projetados em Alumínio.

Por último foi realizada uma análise linear estática através do ALGOR®, para obter a distribuição da tensão máxima principal, dos reservatórios de aço em função de terem apresentado o menor peso (Aço), e conseqüentemente a melhor solução. Devido ao fato de que as análises requerem um grande esforço computacional, foi

analisada a metade do modelo considerando condições de contorno de simetria. Os resultados das simulações são apresentados na Figuras 4.4 e 4.5 para GNC e GNA respectivamente.

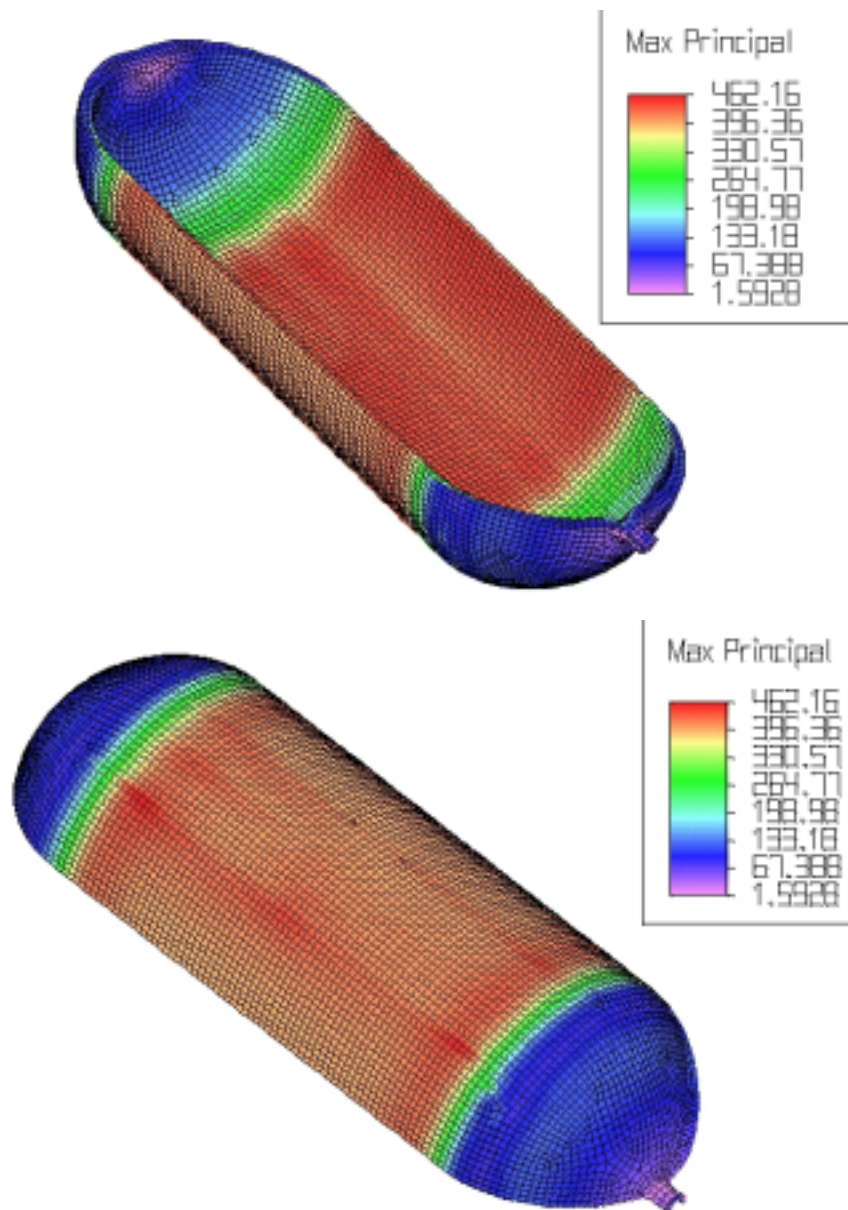


FIGURA 4.4 – Distribuição das tensões principais máximas em (MPa) do cilindro comercial de Aço 4130 com espessura de parede de 8,0 mm, com GNC submetido à pressão interna de 20 MPa.

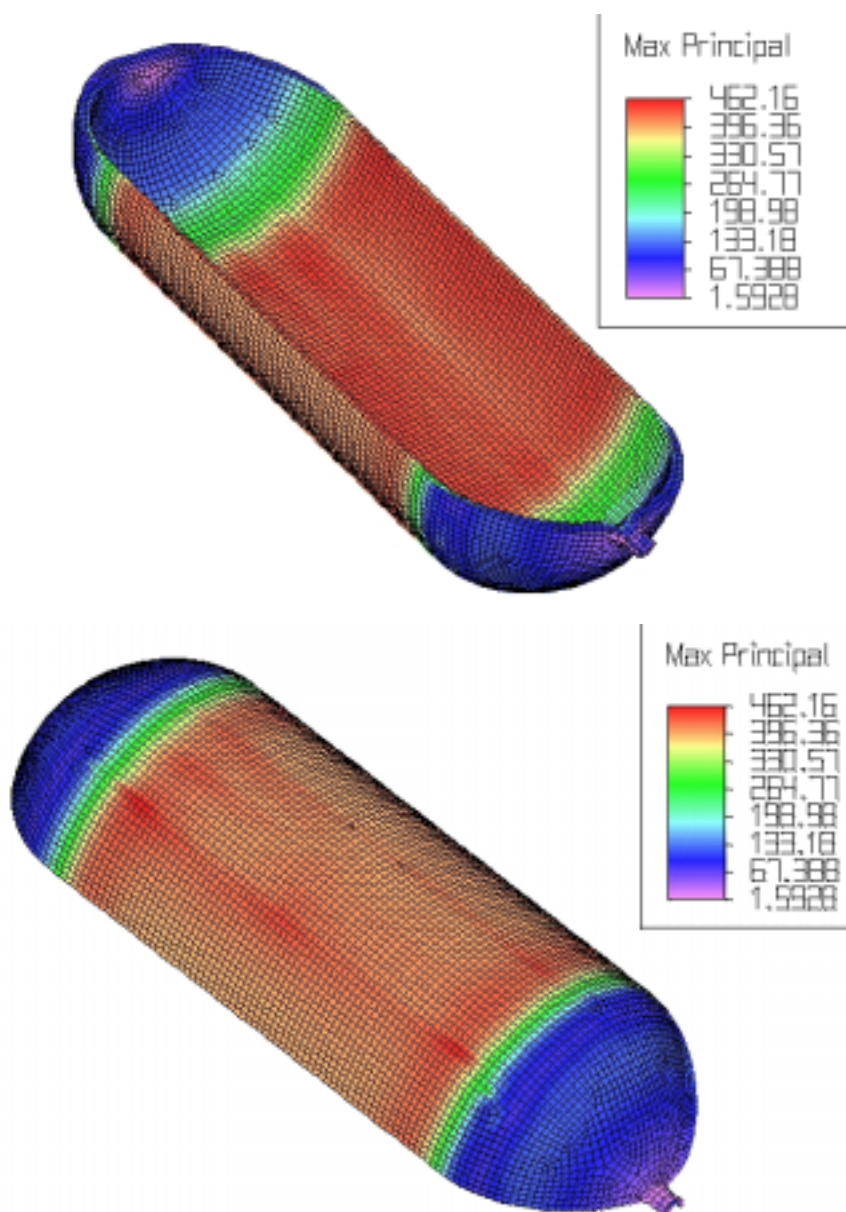


FIGURA 4.5 – Distribuição das tensões principais máximas em (MPa) do cilindro comercial de Aço 4130 com espessura de parede de 1,6 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 pode-se observar que a tensão máxima principal (~462 MPa) não excede a tensão permitida da norma NBR 12790 ABNT (1995) (520 MPa), o que verifica a eficiência dos reservatórios frente às condições impostas pela pressão.

4.2.2 Reservatório modular

Outra solução viável para as formas gerais de veículos é o uso de proposta com geometrias cilíndricas com menores diâmetros. Essas seriam conectadas por meio de vasos comunicantes e seu número é função da necessidade do usuário, mantendo-se a vantagem da economia de espaço físico.

Como primeiro passo foi calculada a espessura de parede utilizando a formulação apresentada no capítulo 3. As dimensões do reservatório estão restritas às dimensões do compartimento do porta-malas do veículo tomado como referência (Fiat Palio EX) para instalação do modelo. Os parâmetros utilizados para o cálculo são apresentados na tabela 4.3.

TABELA 4.3 – Parâmetros utilizados para espessura de parede do reservatório modular cilíndrico para GNC e GNA.

Propriedade	GNC		GNA	
	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Material	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Tensão de Escoamento (σ) (MPa)	900	241	900	241
Raio interno (r) (mm)	20	20	20	20
Pressão de Trabalho (N/mm ²)	20	20	4	4
Fator de segurança (s)	3	3	3	3
Espessura em função de σ_1 (t_{σ_1}) (mm)	3.3	12.4	0.7	2.5
Espessura em função de σ_2 (t_{σ_2}) (mm)	1.7	6.2	0.3	1.2

Na tabela 4.3 observar-se que as espessuras de parede (t_{σ_1} e t_{σ_2}) são diferentes e que a espessura t_{σ_1} é maior em todos os casos. Logo, a espessura t_{σ_1} será assumida para a modelagem das galerias do reservatório.

Como passo seguinte, foi realizada uma série de análises (análise linear estática) no software Algor®, o que possibilitou a comprovação da eficiência dos reservatórios sob a pressão imposta pelo gás e a otimização dos reservatórios em

função da espessura de parede calculada. Dessa maneira foi possível obter as espessuras de parede que apresentassem o melhor comportamento sob diferentes condições de pressão (GNC e GNA) e em função dos materiais utilizados (Aço 4130 e Alumínio 6061 T-6).

Os parâmetros do reservatório modular são apresentados e comparados aos do cilindro comercial, ambos com GNC, na tabela 4.4.

TABELA 4.4 – Características do reservatório modular de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial ambos com GNC.

Propriedade	Cilindro comercial	Reservatório Modular (por unidade)	
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,0068	0,0068
Relação V/V	220	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	15	1.5	1.5
Material	Aço 4130	Aço 4130	Al 6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	2700
Largura (mm)	350	100	100
Altura (mm)	350	100	100
Profundidade (mm)	920	900	900
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	200	200	200
Espessura calculada (mm)	8	2,5	9,2
Peso (kg)	78,2	5,7	11,1

Na tabela 4.4 pode-se observar que a capacidade de armazenamento de volume de gás dos reservatórios em módulo é 10% a do cilindro comercial. Assim, seria necessário um módulo de 10 cilindros para alcançar uma autonomia igual a do cilindro comercial, o que resultaria em um peso total de 57 kg para o caso do Aço e de 111 kg para o caso do Alumínio, equivalentes a 72% e 141% do peso do cilindro comercial.

Os parâmetros do reservatório modular são apresentados e comparados aos do cilindro comercial, ambos contendo GNA, na tabela 4.5.

TABELA 4.5 – Características do reservatório modular de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial ambos com GNA.

Propriedade	Cilindro comercial	Reservatório Modular (por unidade)	
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,0068	0,0068
Relação V/V	150	150	150
Volume de Gás Natural (m ³)	10,2	1,0	1,0
Material	Aço 4130	Aço 4130	Al 6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	2700
Largura (mm)	350	100	100
Altura (mm)	350	100	100
Profundidade (mm)	920	900	900
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	40	40	40
Espessura calculada (mm)	1,6	0,5	1,9
Peso (kg)	15,5	1,1	2,1

Na tabela 4.5 pode-se observar que a capacidade de armazenamento de volume de gás dos reservatórios em módulo é 10% a do cilindro comercial. Assim, seria necessário um módulo de 10 cilindros para alcançar uma autonomia igual à do cilindro comercial, o que resultaria em um peso total de 11 kg para o caso do Aço e de 21 kg para o caso do Alumínio, equivalentes a 70% e 140% do peso do cilindro comercial projetado para GNA.

Por último são apresentados os resultados da análise linear estática realizada nos reservatórios em aço para o GNC e GNA (Figuras 4.6 e 4.7) em função de terem apresentado o menor peso e conseqüentemente a melhor solução.

Para reduzir o esforço computacional foi analisada a quarta parte do modelo considerando condições de contorno de simetria.

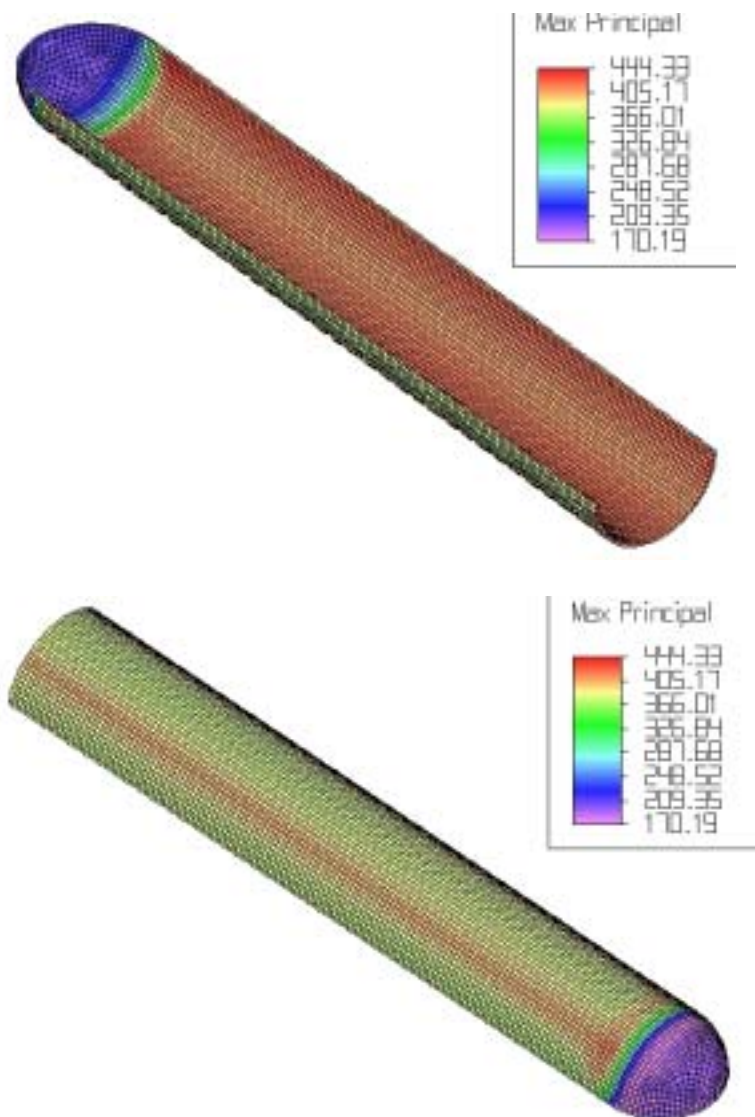


FIGURA 4.6 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do cilindro do reservatório modular de Aço 4130 com espessura de parede de 2,5 mm, com GNC submetido à pressão interna de 20 MPa.

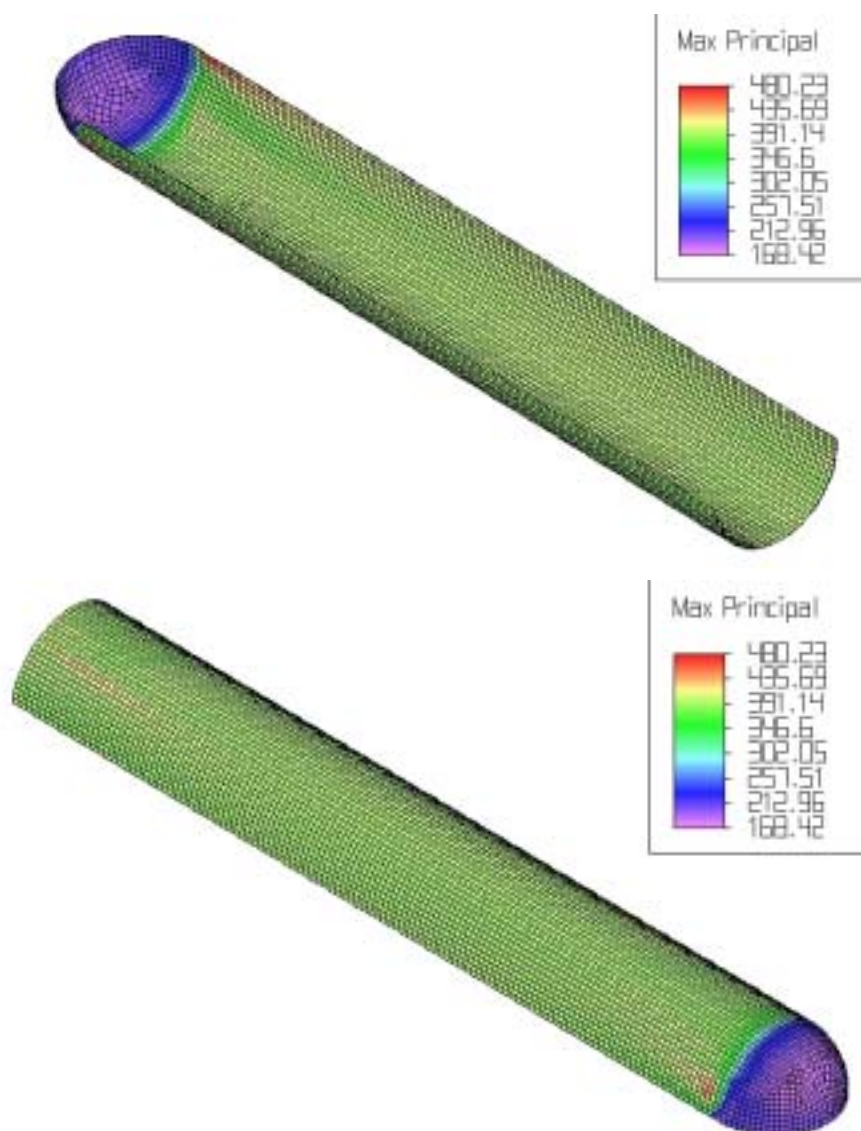


FIGURA 4.7 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do cilindro do reservatório modular de Aço 4130 com espessura de parede de 1.1 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 pode-se observar que para ambos os casos, o GNC e o GNA, a tensão máxima principal (444 e 480 MPa) não excede a tensão permitida da norma NBR 12790 ABNT (1995) (520 MPa). O que verifica a eficiência dos reservatórios frente às condições impostas pela pressão.

4.2.3 Reservatório de galerias elípticas

O reservatório de galerias elípticas aparece como outra solução. Com menor altura que a do cilindro, seria posicionado no fundo do porta-malas, resultando assim num incremento do espaço útil do porta-malas. O reservatório consta de várias galerias internas, as quais seriam conectadas por meio de vasos comunicantes. Esta proposta oferece à possibilidade de se aliviar os efeitos da pressão interna oferecida pelo gás (Figura 4.8 a) com uma contrapressão de outro corpo elíptico (Figura 4.8 b), possibilitando, ainda a existência de galerias (Figura 4.9) que poderiam ser utilizadas como trocadores de calor para diminuir os efeitos da temperatura para o caso de GNA, onde verificaram altas temperaturas no processo de enchimento e resfriamento excessivo durante o consumo do combustível estocado.

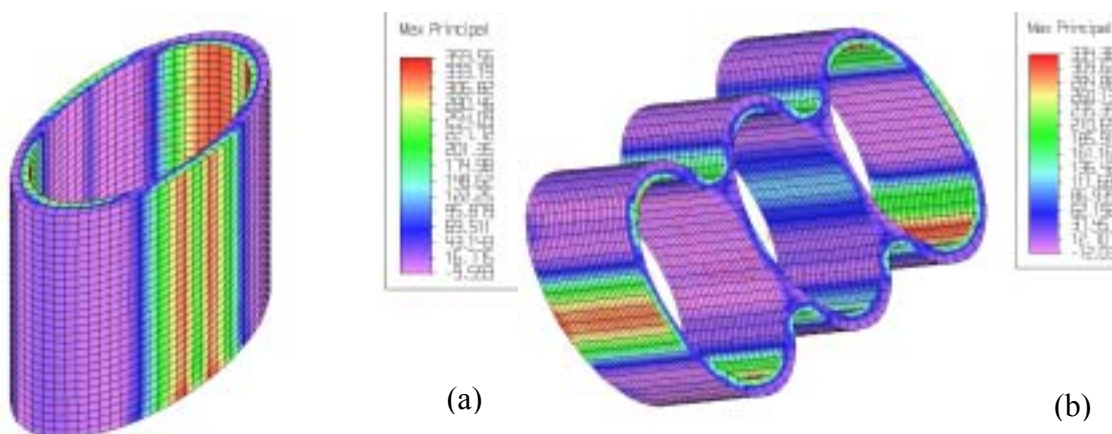


FIGURA 4.8 – Distribuição das tensões (MPa) em corpos elípticos. (a) Comportamento da galeria elíptica isolada; (b) Redução das tensões aproveitando a contrapressão.

Na Figura 4.8 pode-se observar que regiões que apresentam altos valores de tensões, nas regiões da direita e esquerda (Figura 4.8 a), foram eliminadas na proposta final com corpos de metade elíptica e metade cilíndrica (Figura 4.8 b). Com isso, as tensões nos extremos do reservatório serão absorvidas de forma similar ao verificado em geometrias de seção circular (Figura 4.9).

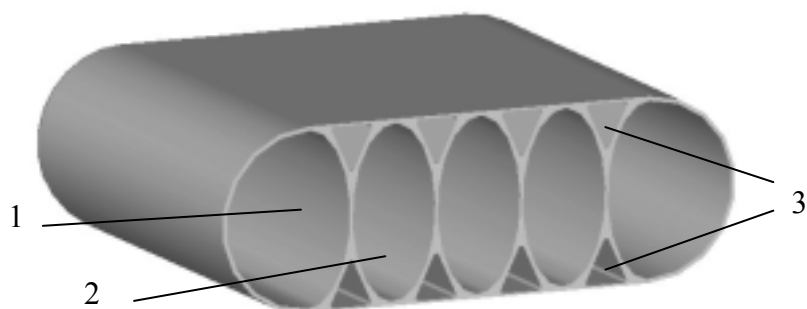


FIGURA 4.9 – Reservatório de galerias elípticas 1. Galeria semicircular semielíptica; 2. Galeria elíptica 3. Galerias a serem usadas como trocadores de calor.

O primeiro passo foi calcular a espessura de parede utilizando a formulação apresentada no capítulo 3. As dimensões do reservatório estão restritas às dimensões do compartimento do porta-malas do veículo tomado como referência (Fiat Palio EX) para instalação do modelo. Os parâmetros utilizados para o cálculo são apresentados nas tabelas 4.6 e 4.7.

TABELA 4.6 – Espessura de parede para as galerias elípticas do reservatório de galerias elípticas para GNC e GNA.

Propriedade	GNC		GNA	
	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Material	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Tensão de Escoamento (σ) (MPa)	900	241	900	241
Semi-eixo a (a) (mm)	90	90	90	90
Semi-eixo b (b) (mm)	180	180	180	180
Pressão de Trabalho (p) (N/mm ²)	20	20	4	4
Fator de segurança (s)	3	3	3	3
Espessura em função de σ_{1a} ($t_{\sigma_{1a}}$) (mm)	12.0	44.8	2.4	9.0
Espessura em função de σ_{1b} ($t_{\sigma_{1b}}$) (mm)	6.0	22.4	1.2	4.5
Espessura em função de σ_2 (t_{σ_2}) (mm)	2.8	10.6	1.7	6.3

Na tabela 4.6 observa-se que as espessuras de parede ($t_{\sigma 1a}$, $t_{\sigma 1b}$ e $t_{\sigma 2}$) são diferentes e que a espessura $t_{\sigma 1a}$ é maior em todos os casos. Logo, a espessura $t_{\sigma 1a}$ será assumida para a modelagem das galerias elípticas do reservatório.

TABELA 4.7 – Espessura de parede para as galerias semicirculares semielípticas do reservatório de galerias elípticas para GNC e GNA.

Propriedade	GNC		GNA	
	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Material	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Tensão de Escoamento (σ) (MPa)	900	241	900	241
Semi-eixo a (a) (mm)	90	90	90	90
Semi-eixo b (b) (mm)	180	180	180	180
Pressão de Trabalho (p) (N/mm ²)	20	20	4	4
Fator de segurança (s)	3	3	3	3
Espessura em função de σ_{1a} ($t_{\sigma 1a}$) (mm)	12.0	44.8	2.4	9.0
Espessura em função de σ_{1b} ($t_{\sigma 1b}$) (mm)	9.0	33.6	1.8	6.7
Espessura em função de σ_2 ($t_{\sigma 2}$) (mm)	2.8	10.4	0.6	2.1

Na tabela 4.7 observar-se que as espessuras de parede ($t_{\sigma 1a}$, $t_{\sigma 1b}$ e $t_{\sigma 2}$) são diferentes e que a espessura $t_{\sigma 1a}$ é maior em todos os casos. Logo, a espessura $t_{\sigma 1a}$ será assumida para a modelagem das galerias semicirculares semielípticas do reservatório.

Como passo seguinte, foi realizada uma série de análises (análise linear estática) no software Algor®, o que possibilitou a comprovação da eficiência dos reservatórios sob a pressão imposta pelo gás, e a otimização dos reservatórios em função da espessura de parede calculada. Dessa maneira foi possível obter as espessuras de parede que apresentassem o melhor comportamento sob as

diferentes condições de pressão (GNC e GNA) e em função dos materiais utilizados (Aço 4130 e Alumínio 6061 T-6).

Os parâmetros do reservatório de galerias elípticas com GNC são apresentados e comparados aos do cilindro comercial com GNC, na tabela 4.8.

TABELA 4.8 – Características do reservatório de galerias elípticas de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial com GNC.

Propriedade	Cilindro	Reservatório de galerias	
	comercial	elípticas	
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,072	0,072
Relação V/V	220	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	15	15,9	15,9
Material	Aço 4130	Aço 4130	Al 6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	2700
Largura (mm)	350	500	500
Altura (mm)	350	180	180
Profundidade (mm)	920	900	900
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	200	200	200
Espessura calculada (mm)	8	7,5 – 4,0	20,0 – 16,5
Peso (kg)	78,2	138,7	143,5

Na Tabela 4.8 pode-se observar que embora a capacidade de armazenamento de gás do modelo elíptico, para ambos os casos (Aço e Alumínio), se incrementa em 5%, o peso duplica em comparação ao do cilindro comercial. Também se pode observar que o reservatório apresenta duas espessuras, em função do reservatório apresentar tensões diferentes, sendo estas maiores nas galerias semicirculares semielípticas, conseqüentemente com a espessura de parede maior.

Os parâmetros do reservatório de galerias elípticas com GNA são apresentados e comparados aos do cilindro comercial com GNA, na tabela 4.8.

TABELA 4.9 – Características do reservatório de galerias elípticas de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas com as do cilindro comercial com GNA.

Propriedade	Cilindro comercial	Reservatório de galerias elípticas	
		Aço 4130	Al 6061-T6
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,072	0,072
Relação V/V	220	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	10,2	10,8	10,8
Material	Aço 4130	Aço 4130	Al 6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	2700
Largura (mm)	350	500	500
Altura (mm)	350	180	180
Profundidade (mm)	920	900	900
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	40	40	40
Espessura calculada (mm)	1,6	2,5 - 0,8	5,3 - 3,3
Peso (kg)	15,5	59,4	39,7

Na tabela 4.9 pode-se observar que embora a capacidade de armazenamento do gás do modelo elíptico, para ambos os casos (Aço e Alumínio), se incrementa em 5%; o peso se incrementa em 400% para o caso do aço e 250% para o caso do alumínio, comparado com o do cilindro comercial.

Por último são apresentados os resultados da análise linear estática realizada nos reservatórios em aço para o GNC e GNA (Figuras 4.10 e 4.11) em função de terem apresentado o menor peso e conseqüentemente a melhor solução.

Para reduzir o esforço computacional foi analisada a metade do modelo considerando condições de contorno de simetria.

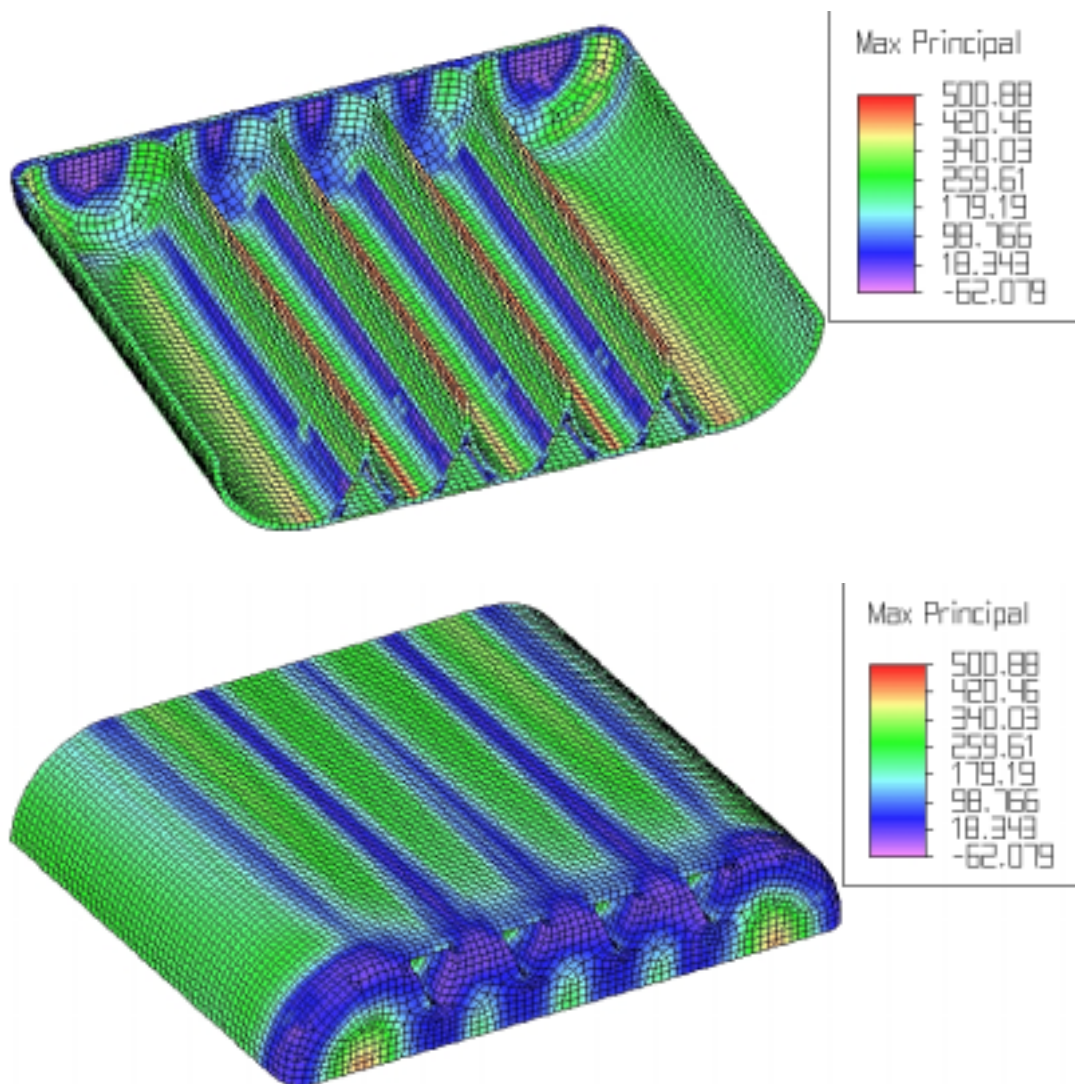


FIGURA 4.10 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório de galerias elípticas de Aço 4130 com espessuras de parede de 7,5 e 4,0 mm, com GNC submetido à pressão de interna 20 MPa.

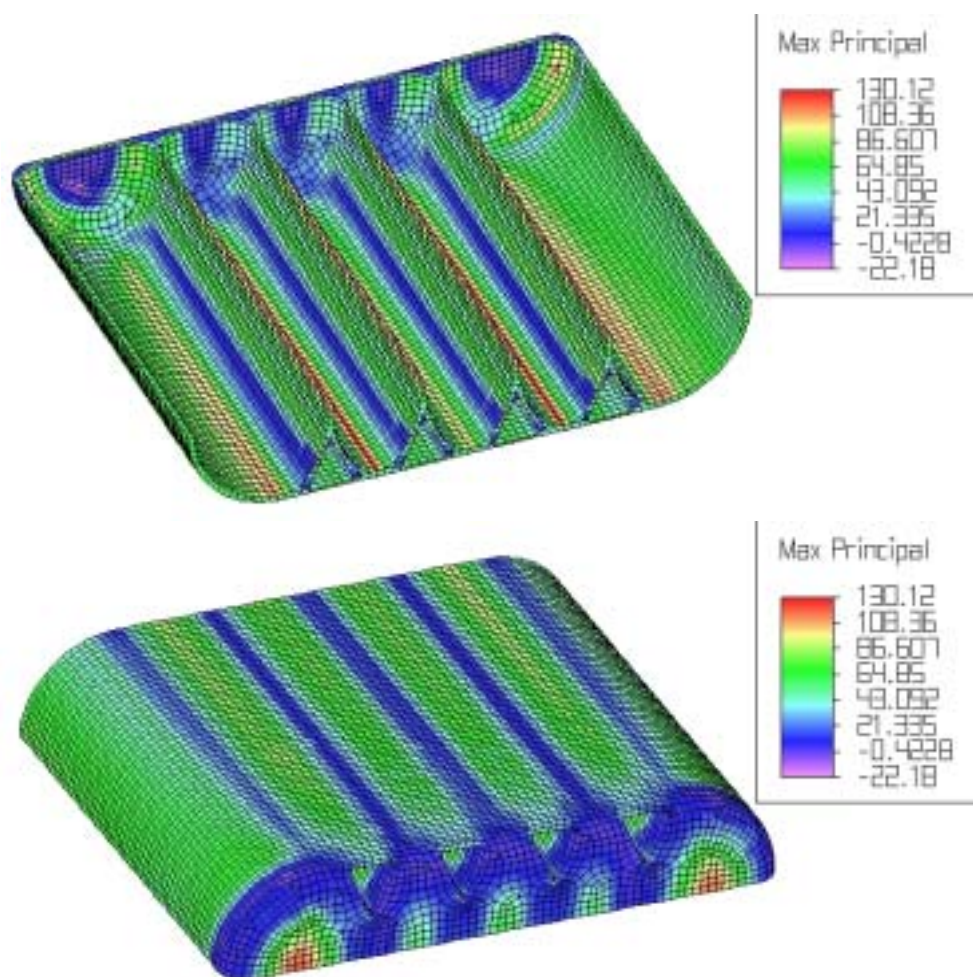


FIGURA 4.11 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório de galerias elípticas de Alumínio 6061-T6 com espessuras de parede de 5,3 e 3,3 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa.

Pode-se observar que para ambos os casos o GNC e o GNA (Figuras 4.10 e 4.11), a tensão máxima principal (500 e 130 MPa) não excede a tensão permitida da norma NBR 12790 ABNT (1995) de 520 MPa para o aço e a calculada para o alumínio de 140 Mpa., o que verifica a eficiência dos reservatórios frente às condições impostas pela pressão.

No que tange ao processo de fabricação o reservatório de galerias elípticas seria fabricado por extrusão.

4.2.4 Reservatório elíptico

O reservatório elíptico surge como solução na alternativa ao problema oriundo do posicionamento dos reservatórios modular e de galerias elípticas nos veículos que possuem a cavidade do pneu de reserva no porta-malas, os quais tornam-se um obstáculo para a retirada do pneu em questão. Este modelo aproveita as vantagens da geometria esférica em combinação com as do elíptico, permitindo assim uma geometria que oferece a possibilidade de instalação na cavidade do pneu.

Como primeiro passo foi calculada a espessura de parede utilizando a formulação apresentada no capítulo 3. As dimensões do reservatório estão restritas às dimensões do compartimento do porta-malas do veículo tomado como referência (Fiat Palio EX) para instalação do modelo. Os parâmetros utilizados para o cálculo são apresentados na tabela 4.10.

TABELA 4.10 – Espessura de parede do reservatório elíptico para GNC e GNA.

Propriedade	GNC		GNA	
	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Material	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Tensão de Escoamento (σ) (MPa)	900	241	900	241
Semi-eixo a (a) (mm)	90	90	90	90
Semi-eixo b (b) (mm)	180	180	180	180
Pressão de Trabalho (p) (N/mm ²)	20	20	4	4
Fator de segurança (s)	3	3	3	3
Espessura em função de σ_1 (t_{σ_1}) (mm)	9.7	36.2	1.9	7.2
Espessura em função de σ_2 (t_{σ_2}) (mm)	10.8	40.5	2.2	8.1

Na tabela 4.10 pode-se observar que as espessuras de parede (t_{σ_1} e t_{σ_2}) são diferentes e que a espessura t_{σ_2} é maior em todos os casos. Logo, a espessura t_{σ_2} será assumida para a modelagem das galerias elípticas do reservatório.

Como passo seguinte, foi realizada uma série de análises (análise linear estática) no software Algor®, o que possibilitou a comprovação da eficiência dos reservatórios sob a pressão imposta pelo gás e a otimização dos reservatórios em função da espessura de parede calculada. Dessa maneira foi possível obter as espessuras de parede que apresentassem o melhor comportamento sob as diferentes condições de pressão (GNC e GNA) em função dos materiais utilizados (Aço 4130 e Alumínio 6061 T-6).

Os parâmetros do reservatório elíptico são apresentados e comparados aos do cilindro comercial ambos com GNC, na Tabela 4.11.

TABELA 4.11 – Características do reservatório elíptico de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial com GNC.

Propriedade	Cilindro comercial	Reservatório elíptico	
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,072	0,072
Relação V/V	220	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	15	15,8	15,8
Material	Aço 4130	Aço 4130	Al 6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	2700
Largura (mm)	350	650	650
Altura (mm)	350	325	325
Profundidade (mm)	920	650	650
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	200	200	200
Espessura calculada (mm)	8	18,5	68,5
Peso (kg)	78,2	133,8	241,2

Na tabela 4.11 pode-se observar que a capacidade de armazenamento de gás do modelo elíptico, para ambos os casos (Aço e Alumínio), se incrementa em 5%, o

peso se incrementa para 171% para o aço e para 308% em comparação com o cilindro comercial.

Os parâmetros do reservatório de galerias elípticas para GNA são apresentados e comparados aos do cilindro comercial com GNA, na tabela 4.12.

TABELA 4.12 – Características do reservatório elíptico de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas com as do cilindro comercial com GNA.

Propriedade	Reservatório elíptico		
	Cilindro comercial	Aço 4130	Al 6061-T6
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,072	0,072
Relação V/V	220	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	10,2	10,8	10,8
Material	Aço 4130	Aço 4130	Al 6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	2700
Largura (mm)	350	650	650
Altura (mm)	350	325	325
Profundidade (mm)	920	650	650
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	40	40	40
Espessura calculada (mm)	1,6	3,0	11,1
Peso (kg)	15,5	21,9	28,7

Na tabela 4.12 pode-se observar que embora a capacidade de armazenamento de gás do modelo elíptico, para ambos os casos (Aço e Alumínio), se incrementa em 5% em relação ao cilindro comercial; o peso supera numa grande percentagem o do cilindro comercial, 141% para o caso do aço e 185% para o caso do alumínio.

Por último são apresentados os resultados da análise linear estática realizados nos reservatórios em aço para o GNC e GNA (Figuras 4.12 e 4.13) em função de terem apresentado o menor peso e conseqüentemente a melhor solução. Para reduzir o esforço computacional foi analisada a quarta parte do modelo considerando condições de contorno de simetria.

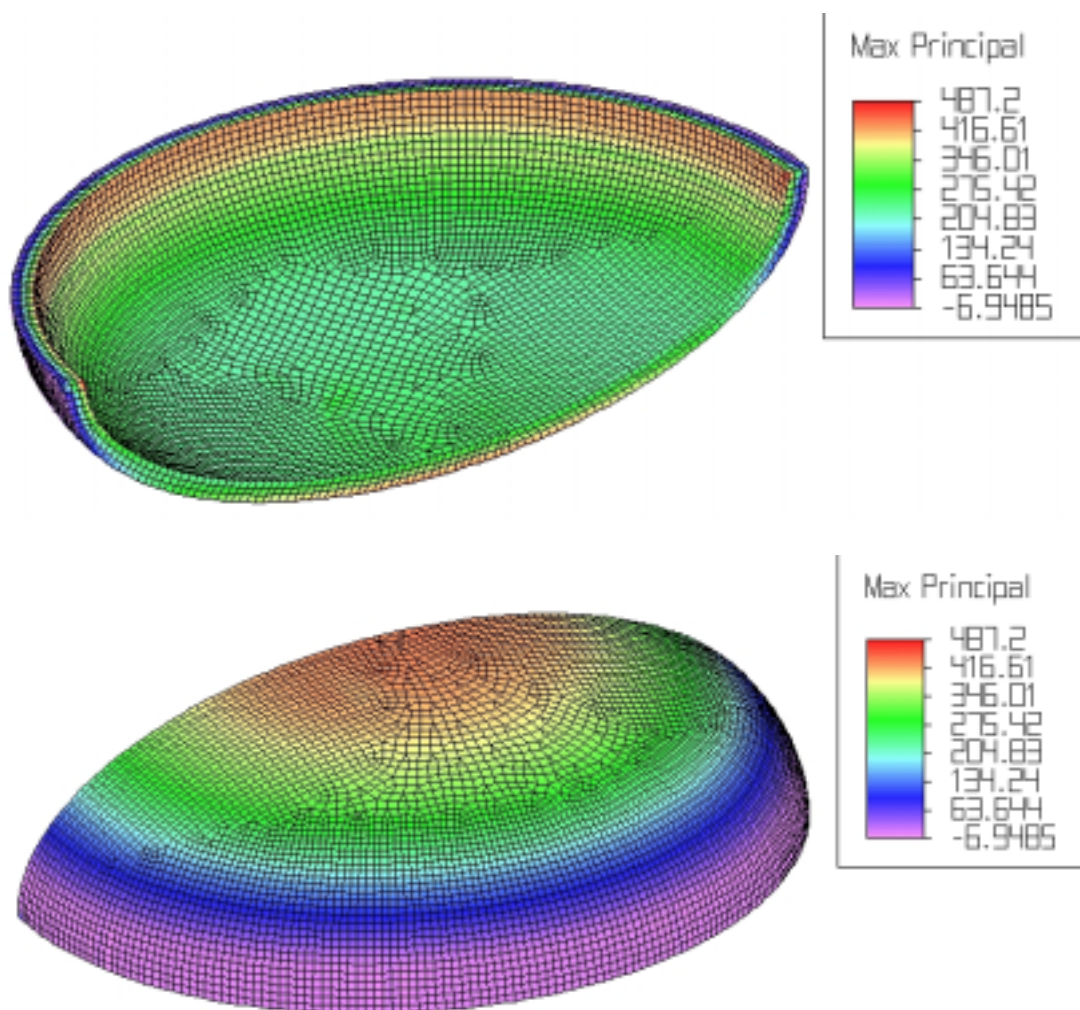


FIGURA 4.12 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório elíptico de Aço 4130 com espessura de parede de 18,5 com GNC submetido à pressão interna de 20 MPa.

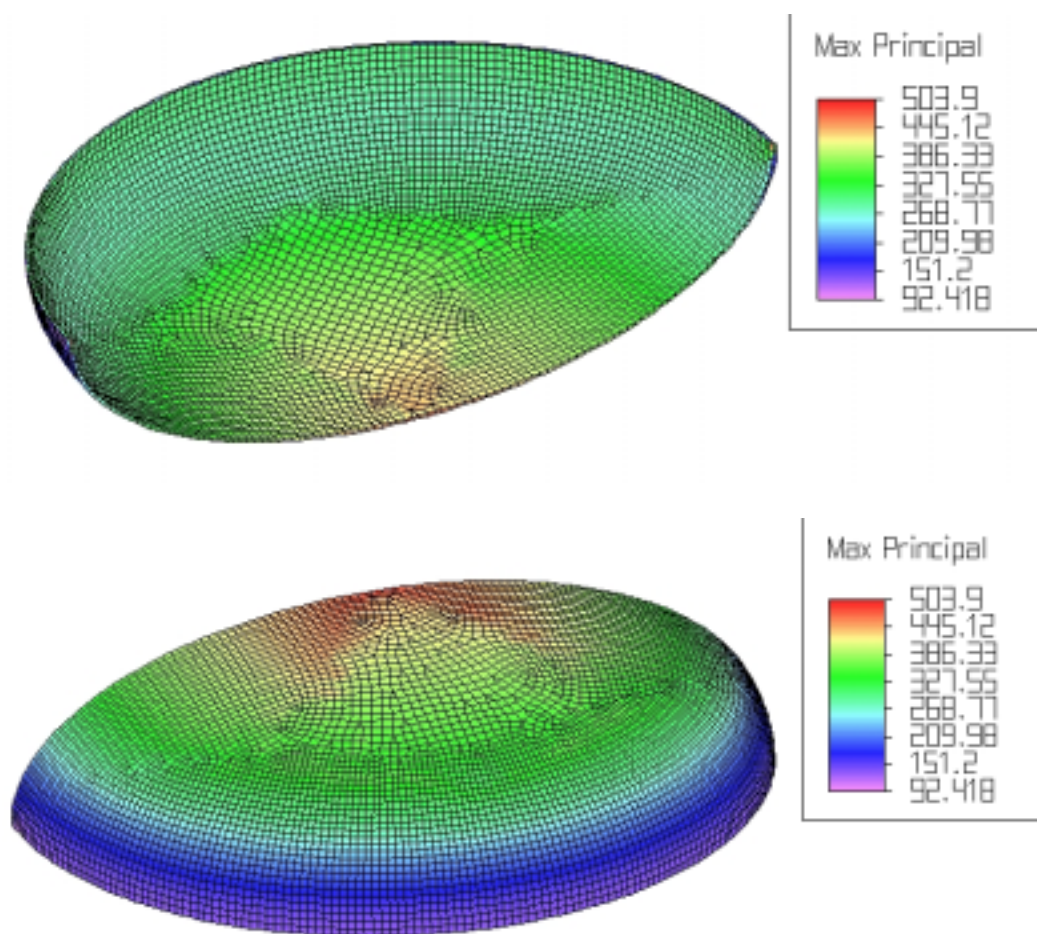


FIGURA 4.13 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório elíptico de Alumínio 6061-T6 com espessuras de parede de 3,0 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa.

Pode-se observar que para ambos os casos, o GNC e o GNA (Figuras 4.12 e 4.13), a tensão máxima principal (487 e 504 MPa) não excede a tensão permitida da norma NBR 12790 ABNT (1995) (520 MPa). o que verifica a eficiência dos reservatórios frente às condições impostas pela pressão.

No que tange ao processo de fabricação o reservatório elíptico seria fabricado bipartido e depois unido por uma solda.

4.2.5 Reservatório toroidal

O protótipo toroidal é oriundo das muitas vantagens apresentadas por sua geometria. Essa possui características de vasos de pressão cilíndrico e esférico, sua seção, de disposição circular, e seu raio interno, que quando tende a zero se aproxima da geometria esférica. Outro argumento para o formato em questão é a instalação desse protótipo na cavidade de acomodamento do pneu reserva. Dessa forma, as dimensões do reservatório permanecem restritas a um compartimento abaixo do piso do porta-malas, oferecendo mais de 95% de aproveitamento de seu volume.

Como primeiro passo foi calculada a espessura de parede utilizando a formulação apresentada no capítulo 3. As dimensões do reservatório estão restritas às dimensões do compartimento do porta-malas do veículo tomado como referência (Fiat Palio EX) para instalação do modelo. Os parâmetros utilizados para o cálculo são apresentados na tabela 4.13.

TABELA 4.13 – Espessura de parede do reservatório toroidal para GNC e GNA.

Propriedade	GNC		GNA	
	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Material	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Tensão de Escoamento (σ) (MPa)	900	241	900	241
Raio interno (r) (mm)	100	100	100	100
Raio externo (R) (mm)	325	325	325	325
Pressão de Trabalho (p) (N/mm ²)	20	20	4	4
Fator de segurança (s)	3	3	3	3
Espessura em função de σ_1 (t_{σ_1}) (mm)	7.1	26.5	1.4	5.3
Espessura em função de σ_2 (t_{σ_2}) (mm)	3.3	12.4	0.7	2.5

Na tabela 4.10 pode-se observar que as espessuras de parede ($t_{\sigma 1}$ e $t_{\sigma 2}$) são diferentes e que a espessura $t_{\sigma 1}$ é maior em todos os casos. Logo, a espessura $t_{\sigma 1}$ será assumida para a modelagem das galerias elípticas do reservatório.

Como passo seguinte, foi realizada uma série de análises (análise linear estática) no software Algor®, o que possibilitou a comprovação da eficiência dos reservatórios sob a pressão imposta pelo gás, e a otimização dos reservatórios em função da espessura de parede calculada. Dessa maneira foi possível obter as espessuras de parede que apresentassem o melhor comportamento sob as diferentes condições de pressão (GNC e GNA) e em função dos materiais utilizados (Aço 4130 e Alumínio 6061 T-6).

Os parâmetros do reservatório toroidal com GNC são apresentados e comparados aos do cilindro comercial com GNC, na tabela 4.14.

TABELA 4.14 – Características do reservatório toroidal de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial com GNC.

Propriedade	Cilindro comercial	Reservatório toroidal	
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,044	0,044
Relação V/V	220	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	15	9,8	9,8
Material	Aço 4130	Aço 4130	Al 6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	2700
Largura (mm)	350	650	650
Altura (mm)	350	200	200
Profundidade (mm)	920	650	650
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	200	200	200
Espessura calculada (mm)	8	6,2 – 4,0	23,0 – 15,0
Peso (kg)	78,2	34,6	46,9

Na tabela 4.14 pode-se observar que a capacidade de armazenamento de gás do modelo toroidal diminui para 64% do cilindro comercial, o peso também cai para 44% para o caso do aço e para 60% para o alumínio. Pode-se observar também que o reservatório apresenta duas espessuras, em função do reservatório apresentar tensões diferentes, sendo esta maior na parte interna e menor na parte externa.

Os parâmetros do reservatório toroidal com GNA são apresentados e comparados aos do cilindro comercial com GNA, na tabela 4.15.

TABELA 4.15 – Características do reservatório toroidal de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas com as do cilindro comercial com GNA.

Propriedade	Cilindro comercial	Reservatório Toroidal	
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,044	0,044
Relação V/V	220	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	10,2	6,6	6,6
Material	Aço 4130	Aço 4130	Al 6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	2700
Largura (mm)	350	650	650
Altura (mm)	350	200	200
Profundidade (mm)	920	650	650
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	40	40	40
Espessura calculada (mm)	1,6	1,3 - 0,9	4,6 - 3,0
Peso (kg)	15,5	7,0	8,8

Na tabela 4.15 pode-se observar que a capacidade de armazenamento de gás do modelo toroidal diminui para 65% do cilindro comercial; o peso também cai para 45% para o caso do aço e 57% para o caso do Alumínio. O reservatório apresenta duas espessuras, em função do reservatório apresentar tensões diferentes, sendo esta maior na parte interna e menor na parte externa.

Por último são apresentados os resultados da análise linear estática realizada nos reservatórios em aço para o GNC e GNA (Figuras 4.14 e 4.15) em função de terem apresentado o menor peso e conseqüentemente a melhor solução. Para reduzir o esforço computacional foi analisada a quarta parte do modelo considerando condições de contorno de simetria.

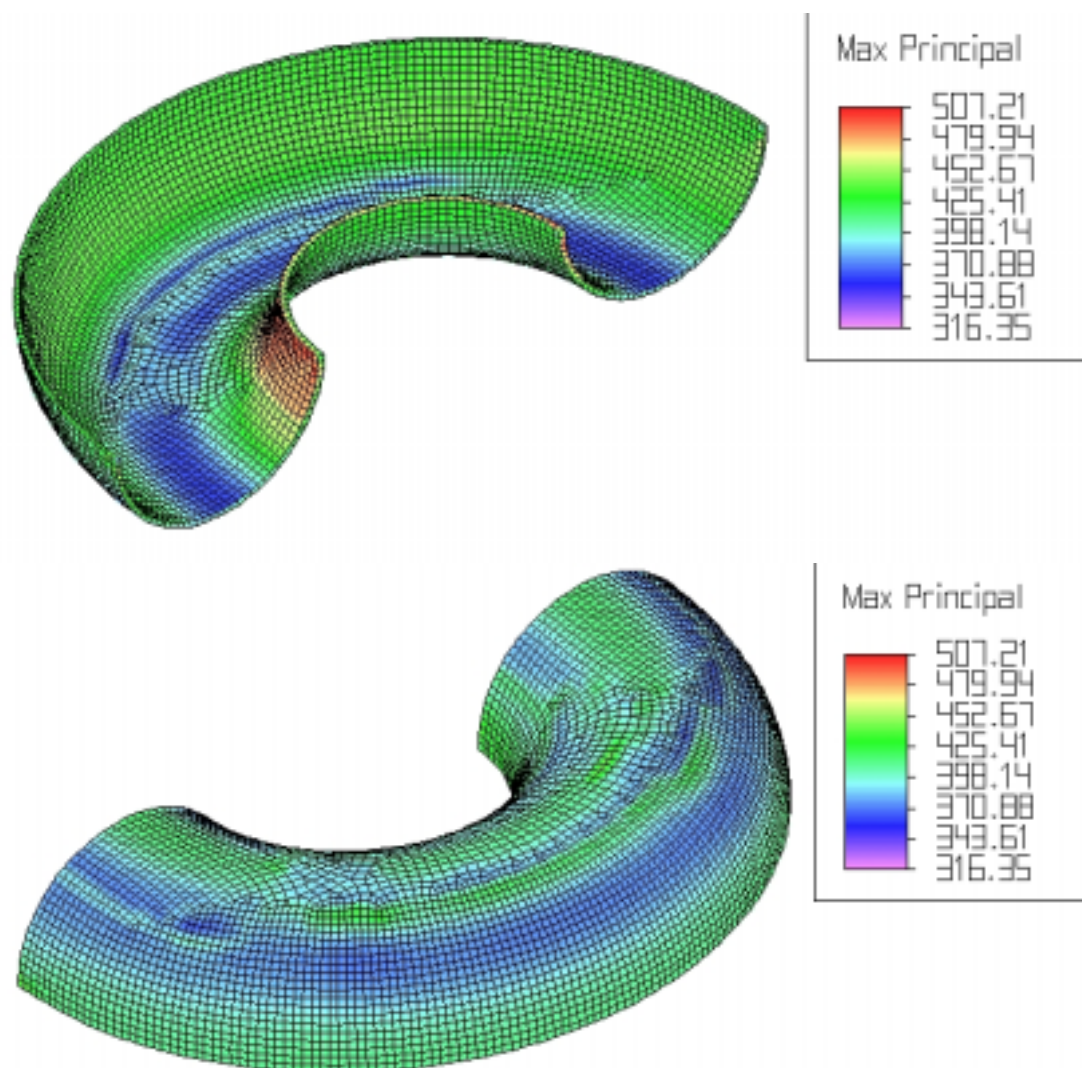


FIGURA 4.14 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório toroidal de Aço 4130 com espessuras de parede de 6,2 e 4,0 mm, com GNC submetido à pressão interna de 20 MPa.

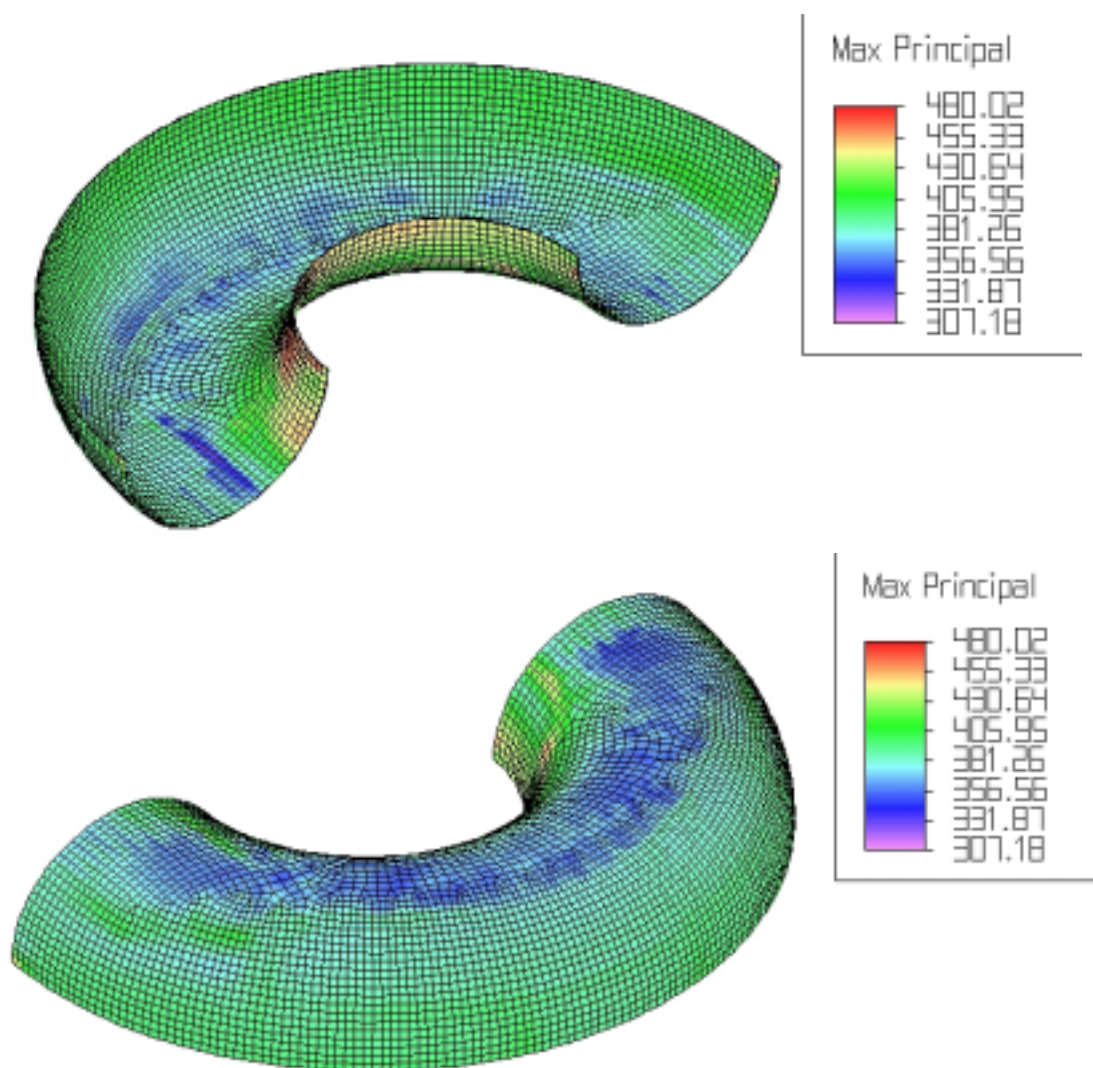


FIGURA 4.15 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório toroidal de Aço 4130 com espessuras de parede de 1,3 e 0,9 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa.

Pode-se observar que para ambos os casos, o GNC e o GNA (Figuras 4.14 e 4.15), a tensão máxima principal (507 e 480 MPa) não excede a tensão permitida da norma NBR 12790 ABNT (1995) (520 MPa) o que verifica a eficiência dos reservatórios frente às condições impostas pela pressão.

Nos parâmetros do reservatório toroidal estudado anteriormente (Tabelas 4.10 e 4.11) pode-se observar uma redução considerável na capacidade de armazenamento

de gás, devido ao fato de que a altura do reservatório se vê limitada pela altura da cavidade do pneu de reserva do veículo (Fiat Palio EX). Com a finalidade de incrementar a capacidade de armazenamento de gás foi estudado um reservatório toroidal incrementando a altura de 200 para 250 mm. O incremento da altura resulta numa perda da capacidade do porta-malas, em função que a altura da cavidade do pneu de reserva é de 200 mm.

Foi calculada a espessura de parede utilizando a formulação apresentada no capítulo 3. As dimensões do reservatório estão restritas às dimensões do compartimento do porta-malas do veículo tomado como referência (Fiat Palio EX) para instalação do modelo. Os parâmetros utilizados para o cálculo são apresentados na tabela 4.16.

TABELA 4.16 – Espessura de parede do reservatório toroidal com altura incrementada, para GNC e GNA.

Propriedade	GNC		GNA	
	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Material	Aço 4130	Al 6061	Aço 4130	Al 6061
Tensão de Escoamento (σ) (MPa)	900	241	900	241
Raio interno (r) (mm)	125	125	125	125
Raio externo (R) (mm)	325	325	325	325
Pressão de Trabalho (p) (N/mm ²)	20	20	4	4
Fator de segurança (s)	3	3	3	3
Espessura em função de σ_1 (t_{σ_1}) (mm)	7.5	28.0	1.5	5.6
Espessura em função de σ_2 (t_{σ_2}) (mm)	4.2	15.6	0.8	3.1

Na tabela 4.10 pode-se observar que as espessuras de parede (t_{σ_1} e t_{σ_2}) são diferentes e que a espessura t_{σ_1} é maior em todos os casos. Logo a espessura t_{σ_1} será assumida para a modelagem das galerias elípticas do reservatório.

Como passo seguinte, foi realizada uma série de análises (análise linear estática) no software Algor®, o que possibilitou a comprovação da eficiência dos reservatórios sob a pressão imposta pelo gás, e a otimização dos reservatórios em função da espessura de parede calculada. Dessa maneira foi possível obter as espessuras de parede que apresentassem o melhor comportamento sob as diferentes condições de pressão (GNC e GNA) e em função dos materiais utilizados (Aço 4130 e Alumínio 6061 T-6).

Os parâmetros do reservatório toroidal, com altura incrementada, com GNC são apresentados e comparados aos do cilindro comercial com GNC, na tabela 4.17.

TABELA 4.17 – Características do reservatório toroidal com altura incrementada, de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas às do cilindro comercial com GNC.

Propriedade	Cilindro comercial		Reservatório toroidal
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,061	0,061
Relação V/V	220	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	15	13,6	13,6
Material	Aço 4130	Aço 4130	Al 6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	2700
Largura (mm)	350	650	650
Altura (mm)	350	250	250
Profundidade (mm)	920	650	650
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	200	200	200
Espessura calculada (mm)	8	10,5 – 4,7	39,3 – 17,7
Peso (kg)	78,2	52,8	71,0

Na tabela 4.17 pode-se observar que a capacidade de armazenamento de gás do modelo toroidal diminui para 88% do cilindro, o peso cai para 67% no caso do aço e para 90% para o alumínio.

Os parâmetros do reservatório toroidal (com altura incrementada) com GNA são apresentados e comparados aos do cilindro comercial com GNA, na tabela 4.18.

TABELA 4.18 – Características do reservatório toroidal com altura incrementada, de Aço 4130 e de Alumínio 6061-T6 comparadas com as do cilindro comercial com GNA.

Propriedade	Cilindro comercial	Reservatório Toroidal	
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,061	0,061
Relação V/V	220	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	10,2	9,3	9,3
Material	Aço 4130	Aço 4130	Al 6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	241
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	2700
Largura (mm)	350	650	650
Altura (mm)	350	250	250
Profundidade (mm)	920	650	650
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	40	40	40
Espessura calculada (mm)	1,6	2,0 – 1,0	7,5 - 3,4
Peso (kg)	15,5	10,5	12,9

Na tabela 4.18 pode-se observar que a capacidade de armazenamento de gás do modelo elíptico diminui para 90%, o peso cai para 67% no caso do aço e 83% no caso do Alumínio, do peso do cilindro comercial.

Por último são apresentados os resultados da análise linear estática realizada nos reservatórios em aço para o GNC e GNA (Figuras 4.16 e 4.17) em função de terem apresentado o menor peso e conseqüentemente a melhor solução. Para reduzir o esforço computacional foi analisada a quarta parte do modelo considerando condições de contorno de simetria.

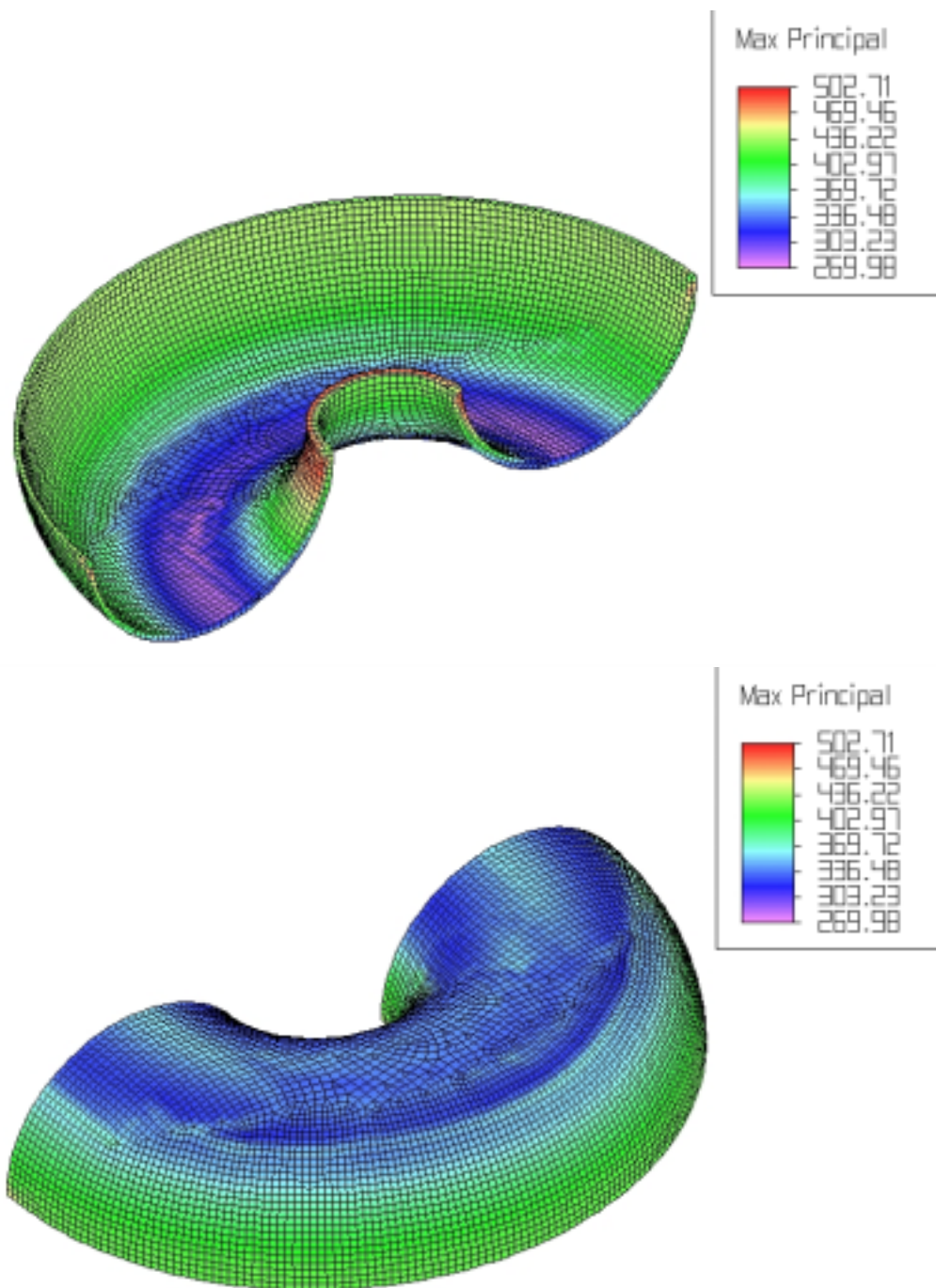


FIGURA 4.16 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório toroidal, com altura incrementada para 250 mm, de Aço 4130 com espessuras de parede de 10,5 e 4,7 mm, com GNC submetido à pressão interna de 20 MPa.

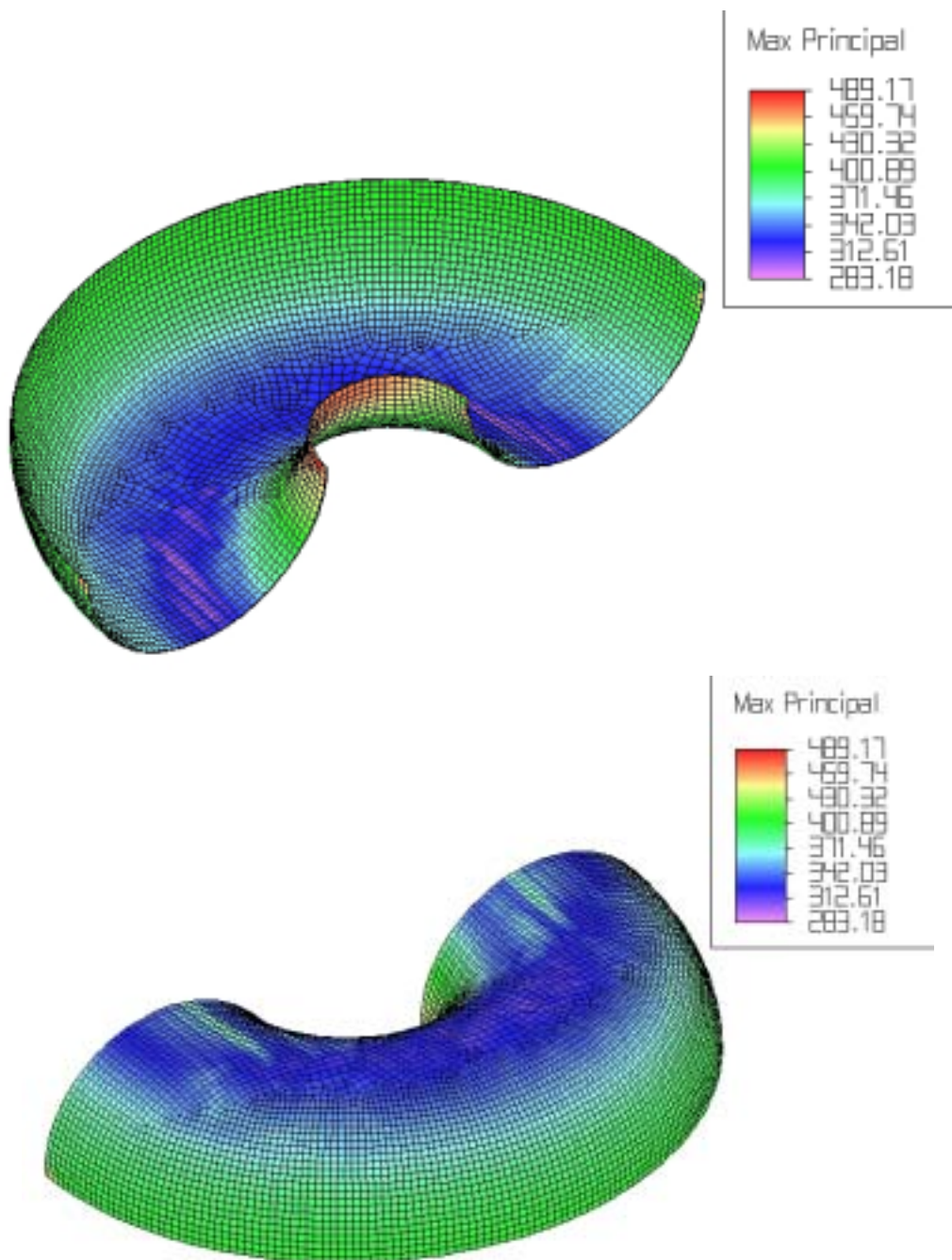


FIGURA 4.17 – Distribuição das tensões principais máximas (MPa) do reservatório toroidal, com altura incrementada para 250 mm, de Aço 4130 com espessuras de parede de 2,0 e 1,0 mm, com GNA submetido à pressão interna de 4 MPa.

Pode-se observar que para ambos os casos, o GNC e o GNA (Figuras 4.16 e 4.17), a tensão máxima principal (503 e 489 MPa) não excede a tensão permitida da norma NBR 12790 ABNT (1995) (520 MPa) o que verifica a eficiência dos reservatórios frente às condições impostas pela pressão.

No que tange a o processo de fabricação o pedido internacional de patente US 4.561.476 (1985) revela um vaso de pressão toroidal de aço constituído por dois módulos soldados entre si, com espessuras de paredes diferentes, maior na parte interna e menor na parte externa. Cada módulo é obtido a partir de um anel sólido por usinagem. A patente GB 2.095.808 (1982) mostra um vaso de pressão toroidal de aço constituído por dois módulos estampados, e soldados entre si. A solda é reforçada por uma cinta de aço. Os dois processos anteriores poderiam ser adotados para a fabricação do reservatório para GNC e GNA.

A patente US 4.475.662 (1984) descreve um vaso de pressão toroidal obtido a partir de um cintamento de fibras de carbono com resina em torno de um vaso toroidal básico, constituído de borracha. Este processo apresentaria uma limitação para o caso do GNA devido às condições de temperatura, mas seria uma solução viável para o caso do GNC permitindo a redução do peso de reservatório devido ao uso de materiais mais leves (compósitos).

4.2.6 Comparação dos reservatórios

Por último será realizada uma comparação dos reservatórios que apresentaram as melhores soluções para o caso do GNC na tabela 4.19 e para o GNA na tabela 4.20. Com a finalidade de analisar a influencia do adsorvente no peso total do reservatório (reservatório mais adsorvente) na tabela 4.20, será considerado o peso do adsorvente. O adsorvente a ser considerado será o carvão tipo NCD-I/ultraporoso da Norcarbbor, com uma densidade igual a 410 kg/m^3 (dado obtido no laboratório de CTGas).

TABELA 4.19 – Características dos reservatórios propostos, comparadas com as do cilindro comercial com GNC.

Propriedade	Cilindro comercial	Reservatório modular (10 unidades)	Reservatório de galerias elípticas	Reservatório elíptico	Reservatório Toroidal	
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,0068	0,072	0,072	0,044	0,061
Relação V/V	220	220	220	220	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	15,0	15,0	15,9	15,8	9,8	13,6
Material	Aço 4130	Aço 4130	Aço 4130	Aço 4130	Aço 4130	Aço 4130
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	900	900	900	900
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	7800	7800	7800	7800
Largura (mm)	350	100	500	650	650	650
Altura (mm)	350	100	180	325	200	250
Profundidade (mm)	920	900	900	650	650	650
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	200	200	200	200	200	200
Espessura calculada (mm)	8	2,5	7,5 – 4,0	18,5	6,2 – 4,0	10,5 – 4,7
Peso (kg)	78,2	57,0	138,7	133,8	34,6	52,8

TABELA 4.20 – Características dos reservatórios propostos, comparadas com as do cilindro comercial com GNA.

Propriedade	Cilindro comercial	Reservatório modular (10 unidades)	Reservatório de galerias elípticas	Reservatório elíptico	Reservatório Toroidal	
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,0068	0,072	0,072	0,044	0,061
Relação V/V	220	220	220	220	220	220
Volume de Gás Natural (m ³)	10,2	10,2	10,8	10,8	6,6	9,3
Material	Aço 4130	Aço 4130	Al 6061-T6	Aço 4130	Aço 4130	Aço 4130
Tensão de Escoamento (MPa)	900	900	241	900	900	900
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	2700	7800	7800	7800
Largura (mm)	350	100	500	650	650	650
Altura (mm)	350	100	180	325	200	250
Profundidade (mm)	920	900	900	650	650	650
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	40	40	40	40	40	40
Espessura calculada (mm)	1,6	0,5	5,3 - 3,3	3,0	1,3 - 0,9	2,0 - 1,0
Peso do reservatório (kg)	15,5	11,0	39,7	21,9	7,0	10,5
Peso do adsorvente (kg)	27,8	27,9	29,6	29,5	18,2	25,3
Peso total (kg)	43,4	39,0	69,3	51,4	25,3	35,7

Para o caso do GNC (Tabela 4.19), pode-se observar que os reservatórios que apresentaram peso menor em relação ao cilindro foram o modular com 72%, e os toroidais com 44% o menor e 75% o maior; o de galerias elípticas e o elíptico duplicaram o peso do cilindro, pelo que foram descartados como soluções para armazenamento de GNC. No que tange à capacidade de armazenamento de gás, o reservatório modular apresentou a mesma capacidade, o toroide menor apresentou 65% da capacidade do cilindro comercial, e o maior 90%.

Para o caso do GNA (Tabela 4.20), pode-se observar que o adsorvente apresenta um elevado peso o que resulta num incremento do peso do conjunto (reservatório e adsorvente). Também os reservatórios que apresentaram peso menor ao cilindro foram o modular com 71%, e os toroidais com 45% o menor e 68% o maior; o de galerias elípticas e o elíptico ultrapassaram o peso do cilindro (256% e 141%), pelo que foram descartados como soluções para armazenamento de GNC. No que tange à capacidade de armazenamento de gás, o reservatório modular apresentou a mesma capacidade, o toroidal menor apresentou 65% da capacidade do cilindro comercial, e o maior 90%.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que o uso de geometrias não convencionais para reservatórios de GNV é bastante viável.

A possibilidade de se utilizar GNA apresenta vantagens em relação ao GNC. Embora a capacidade de armazenamento diminua, a redução do peso dos reservatórios resulta numa diminuição dos esforços sofridos na estrutura do automóvel, assim como no sistema de suspensão do veículo.

Com o uso dos novos reservatórios, embora a autonomia seja reduzida, tanto para o GNC como para o GNA, a redução do peso apresentada pelos reservatórios modular e toroidal, minimiza os esforços sofridos na estrutura do automóvel, além de possibilitar a retomada da conveniência do porta-malas.

Considerando só o peso do reservatório sem adsorvente, os reservatórios projetados para GNA, apresentaram menor peso que os projetados para GNC, em função da diminuição da espessura da parede devido à redução da pressão interna, porém o peso do adsorvente incrementa consideravelmente o peso do conjunto (reservatório e adsorvente), ainda assim o peso dos reservatórios escolhidos como possíveis soluções para o GNA (modular e o toroidal), não ultrapassa o peso do cilindro comercial com GNC.

Para o caso do GNC todos os reservatórios projetados em Aço 4130 apresentaram menor peso do que os projetados em Alumínio 6061-T6, além de ter a vantagem do menor preço do aço frente ao alumínio.

Para o caso do GNA os reservatórios modular, elíptico e toroidal, projetados em Aço 4130 apresentaram menor peso que os projetados em Alumínio. Já no caso do reservatório de galerias elípticas o projetado em Alumínio apresentou o menor peso.

Os reservatórios de galerias elípticas e elíptico apresentaram uma capacidade de armazenamento maior do que a do cilindro comercial, porém, tornaram-se inviáveis em função do elevado peso, tanto para o caso do GNC como do GNA.

Para ambos os casos, o GNC e o GNA, o reservatório modular apresenta-se como uma solução viável, em função de possuir menor peso que o cilindro comercial e a mesma capacidade de armazenamento de gás.

O reservatório toroidal foi o que apresentou menor peso das geometrias estudadas, apresentando-se assim como uma solução viável tanto para GNC como GNA; embora tenha apresentado uma capacidade de armazenamento de gás inferior a do cilindro comercial, a única limitação desse reservatório são as dimensões da cavidade do pneu de reserva.

Em função do aproveitamento do espaço do porta-malas, o reservatório toroidal apresentou-se como a solução mais viável permitindo o uso integral do mesmo, os outros reservatórios ainda continuam ocupando espaço destinado ao porta-malas do veículo, mas em menor escala do que o cilindro comercial.

As análises realizadas mostraram um bom desempenho frente às pressões impostas pelo confinamento do gás para todas as geometrias.

5.2 SUGESTÕES PARA OUTROS TRABALHOS

Formuladas as conclusões, algumas sugestões foram propostas para a elaboração de outros trabalhos, sendo estas, apresentadas a seguir.

- Iniciar outro trabalho de pesquisa levando-se em conta a utilização de materiais mais leves, e de maior resistência, como é o caso dos materiais compósitos.
- Pesquisar novas alternativas de posicionamento dos reservatórios de GNV, que permitam o incremento e aproveitamento do espaço nos veículos.
- Pesquisar novos métodos de fabricação que permitam reduzir o custo, peso e incrementar a eficiência dos reservatórios.
- Estudar o comportamento dos reservatórios frente aos efeitos da temperatura durante o enchimento e descarga, com o uso de GNA.
- Pesquisar novos adsorventes com menor densidade que permitam a possibilidade de redução do peso dos reservatórios para GNA.
- Estudar a viabilidade do uso de trocadores de calor nos reservatórios de GNV.
- Investigar os efeitos das cargas dinâmicas, nos reservatórios.
- Estudar o mecanismo de fixação do reservatório no veículo e os efeitos desse no comportamento mecânico do reservatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 12790, (1995), **Cilindro de aço especificado, sem costura, para armazenagem e transporte de gases a alta pressão**, p. 9
- ALGOR USER'S GUIDE, (2000) Version 13.12-WIN 15-DEC-2001
- CHANG, K. J., TALU T. (1996) **Behavior and performance of adsorptive natural gas storage cylinders during discharge**, Elsevier Science Ltd, Applied thermal engineering, vol 16, nº 5, pp. 359-374.
- COOK, T. L., HORNE, B. H.(1997), **Low pressure adsorbed natural gas vehicle demonstration**, 20th World Gas Conference; Copenhagen, Denmark.
- GB 2.095.808, (1984), **Liquefied gas tank**, United Kingdom Patent
- HIGDON, A., OHLSEN, E.H., STILES, W.B., WEESE, J.A., RILEY, W.F., (1985), **Mechanics of Materials**, John Wiley & Sons, USA.
- HOLROYD, N. J. H., ELLIS, M. B. D., CARRIGAN, J., GORR, J. P., DAVIS, W. F., DAVIS, J. W. (1999) **Customized gas storage fuel systems for natural gas vehicles**. Society for Advanced of material and Process Engineering. Inc. Ohio USA.
- LOBATO, D. S L C. (2001) **Relatório sobre adsorventes empregados em Gás Natural Veicular** , Centro de Tecnologias do Gás. Natal - RN
- MDIC-IMETRO PORTARIA Nº 74 (2001), **Regulamento técnico de cilindros para alta pressão para armazenamento de GNV como combustível a bordo de veículos automotores** (Tradução da norma ISO 11439), 29 de maio de 2001
- MOREIRA, G. P. (2001), **Cilindros leves: usos para GLP e GNV**, Disponível em: www.gasbrasil.com.br

- MOTA, J. P. B (1998). **A theoretical study of the impact of heavy impurities on the performance of natural gas adsorptive storage systems**, FOA6 Elsevier 24-28 May 1998. pp. 1095–1100
- MOTA, J. P. B., (1999) **Impact of gas composition on natural gas storage by adsorption**, AIChE Journal, vol. 45, nº 5.
- MOTA, J. P. B., RODRIGUES, A. E., SAATDJIAN E., TONDEUR, D. (1997) **Dynamics of Natural Gas adsorption storage systems employing activated carbon**, Elsevier Science Ltd., Carbon, vol. nº3. pp. 1259 – 1270.
- POPOV, E.P, (1998) **Introdução à mecânica dos Sólidos**, Editora Edgard Blücher Ltda., Brasil.
- SOUZA, M. R. A., BARBOSA, D. P., GUERRA, A. R. O., AQUINO, E. M. F., (2002), **Análise de Geometrias não convencionais para recipientes de armazenamento de gás natural para abastecimento automotivo**, Congresso 2002 SAE Brasil, São Paulo – SP 19 a 21 de Novembro de 2002.
- SOUZA, M. R. A., GUERRA, A. R. O., (2003), **Estudo da viabilidade de modelos não comerciais para armazenamento de gás natural veicular**, VII Congresso de Mecânica aplicada e computacional, Universidade de Évora, 14 a 16 de Abril de 2003. Portugal.
- TILLER, D. B., EIHUSEN J. A. (1998), **Evolution of CNG Bus fuel systems, Lincoln Composites**; Lincoln Composites, Cologne, Germany.
- TILLER, D. B., WOZNIK, J. J. (1998), **Development of an integrated storage system for a Mid-Size automobile**, Lincoln Composites; Cologne, Germany.
- TIMOSHENKO, S., WOINOWSKI-KRIEGER, S. (1959), **Theory of Plates and Shells**, Mc Graw-Hill Inc. USA.
- US 4,475,662, (1984), **Toroidal Pressure vessel of compound material**, United States Patent.
- US 4,475,662, (1984), **Toroidal Pressure vessel**, United States Patent.
- VASILIEV, L.L., KANONCHIK, L.E., MISHKINIS, D.A., RABETSKY, M.I. (2000), **Adsorbed Natural Gas Storage and Transportation Vessels**, Elsevier Science Ltd 17 July 2000. pp. 1047-1055

ANEXOS

FORMULAÇÃO UTILIZADA PELO ALGOR®

O sistema de equações utilizado pelo Algor® para a análise linear estática é:

$$KD = F \left(K_{ij} D_j = F_{ij} sum \right)$$

Onde

K é a matriz de rigidez.

D é o vetor de deslocamentos/rotações nodais.

F é o vetor de carregamentos e condições de contorno.

$$K = \underset{e=1}{\overset{numel}{A}} k^e$$

$$F = F_n + \underset{e=1}{\overset{numel}{A}} k^e (F_e + F_e^c)$$

Onde

A é o operador de armazenamento.

k^e é o matriz de rigidez do elemento.

f^e é o vetor de forças aplicadas no elemento. (Incluindo tração, *body forces*, cargas térmicas, etc).

f_c^e são as forças centrífugas aplicadas no elemento.

d^e é definido como vetor de deslocamento do elemento

F_n é o vetor de forças/momentos nodais.

Para calcular as forças internas são as seguintes definições:

$$R = -KD = \text{Reações nodais.}$$

F = Forças nodais aplicadas.

$F - KD = \text{Resíduo nodal } (R + F)$

$-k^e d^e = \text{reação no elemento.}$

$f^e + f_c^e = \text{Forças aplicadas no elemento.}$

Nota: R representa o vetor de reações nodais exercidas pelo modelo no domínio externo. Então R representa o balanço de forças externas aplicadas no modelo.

$$(R + F) = 0$$

O processador da tensão linear ignora as equações correspondentes aos nós com condições de contorno $KD = F$. O calculador de forças internas opera no sistema livre.

O processador de tensão linear computa forças centrífugas como forças nodais ao invés de forças de massa.

Contorno, vazios, elementos rígidos não possuem massa e desta forma não contribuem para o carregamento das forças centrífugas.