

COMPARAÇÃO ENTRE GEOMETRIAS CONVENCIONAIS E NÃO CONVENCIONAIS PARA TANQUES DE ARMAZENAMENTO DE GNV

John Edward Neira Villena

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte Campus Universitário Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brazil, CEP 59072-970

Ada Cristina Scudelari

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte Campus Universitário Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Natal, RN, Brazil, CEP 59072-970

Ângelo Roncali de Oliveira Guerra

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte Campus Universitário Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brazil, CEP 59072-970

Resumo. *O presente trabalho apresenta uma comparação de diferentes reservatórios de geometrias não convencionais para Gás Natural Veicular (GNV). Os reservatórios foram projetados segundo as normas Brasileiras (NBR) para vasos de pressão para armazenamento e transporte de GNV. Foram realizadas simulações dos reservatórios para fazendo uso de um software baseado no Método Dos Elementos Finitos para verificar a sua eficiência. Finalmente são comparadas a capacidade hidráulica, volume de Gás Natural armazenado, peso e material utilizado.*

Palavras –chave: Vasos de pressão, GNV, FEM.

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.

Atualmente existem três diferentes formas para o armazenamento do GNV: gás natural liquefeito (GNL), gás natural comprimido (GNC) e gás natural adsorvido (GNA) [1].

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 [1], porém com elevados 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 o tipo de armazenamento mais utilizado atualmente para uso veicular, este é armazenado a uma pressão entre 15 e 25 MPa [1]. 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.

O GNA, aparece como uma alternativa para o GNC, onde sólidos microporosos empacotados no reservatório aumentam a densidade de armazenamento, possibilitando operações a baixas pressões (3,5 a 4.0 MPa) [1] o que conseqüentemente acarreta na 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 [2] respectivamente. 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 confeccionar tais protótipos com ligas de menor rigidez e peso.

2. METODOLOGIA

Os parâmetros das diferentes geometrias não convencionais que surgem como alternativas para os novos reservatórios foram calculados através do estudo matemático das tensões internas de trabalho. Em seguida, foi realizada a simulação do comportamento das novas geometrias fazendo uso do software comercial ALGOR® o qual se baseia no Método dos Elementos Finitos (MEF). A comparação da eficiência dos reservatórios simulados sob a pressão imposta pelo gás neste trabalho, tomou como base a norma NBR 12790 da ABNT [3]. Finalmente realizou-se a comparação entre as características dos modelos não convencionais e com as propriedades dos cilindros existentes no mercado.

3. FORMULAÇÃO

Para uma melhor compreensão do comportamento de reservatórios de gás a altas pressões, do ponto de vista da resistência dos materiais, fez-se um estudo matemático das tensões desenvolvidas em geometrias consideradas simples (primitivas).

3.1. Geometria esférica

Considerando 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 (Fig. 1 a) a analisar. Considerando-se esse raciocínio pode-se obter a tensão única a partir do diagrama de corpo livre de uma seção em corte com plano de referencia passando pelo centro do vaso de pressão (Fig. 1 b)

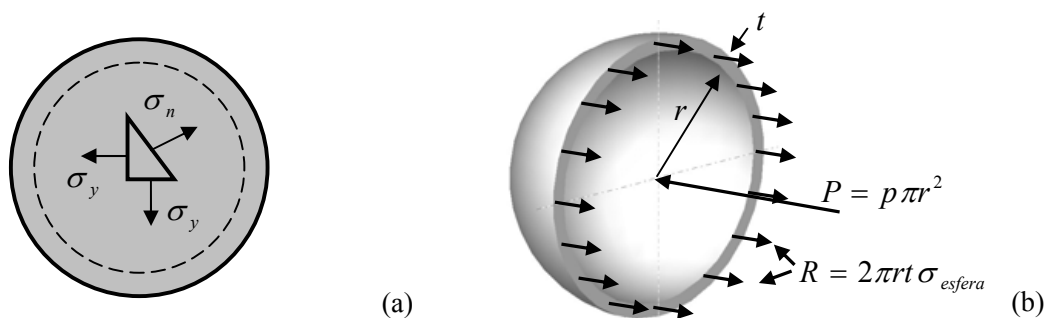


Fig. 1. Geometria esférica (a) Diagrama do elemento infinitesimal (b) Diagrama de corpo livre

A tensão da esfera σ_{esfera} é obtida realizando a análise do diagrama de corpo livre em corte [4]:

$$\sigma_{esfera} = \frac{pr}{2t} \quad (1)$$

3.2. Geometria cilíndrica

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 (Fig. 2 a), no caso σ_1 e σ_2 , para os quais tem-se tensão radial e tensão longitudinal respectivamente [3].

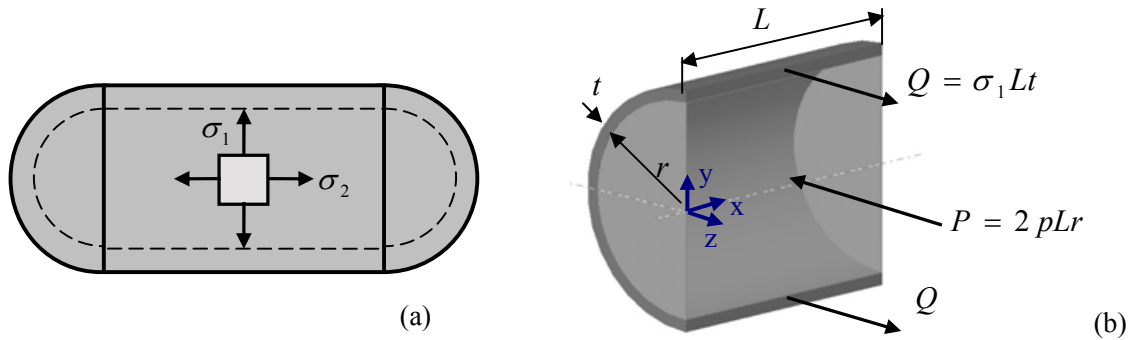


Fig. 2. Geometria cilíndrica (a) Diagrama do Elemento infinitesimal (b) Diagrama de corpo livre

As tensões no elemento infinitesimal são obtidas efetuando a análise do diagrama de corpo livre em corte, no plano “xy” para σ_1 (Fig 2 b). A determinação de σ_2 é semelhante ao anteriormente descrito, para a esfera.

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t}; \quad \sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (2), (3)$$

3.3. Geometria elíptica

Considerando um vaso de pressão de geometria elíptica com semi-eixos a e b , comprimento L , e espessura t , as tensões no elemento infinitesimal (Fig. 3 a), σ_1 e σ_2 , são determinadas efetuando a análise do diagrama de corpo livre em corte (Fig 3 b,c,d).

A determinação de σ_1 é dada pela análise do diagrama de corpo livre em corte, efetuada nos planos “xy” e “xz” perpendiculares aos semi-eixos “a” e “b” respectivamente, resultando dessa maneira duas tensões radiais denominadas σ_{1a} e σ_{1b} (Fig. 3 a, c, d). A tensão longitudinal σ_2 é obtida realizando o equilíbrio de forças no plano “yz” (Fig. 3 b).

$$\sigma_{1a} = \frac{pa}{t}; \quad \sigma_{1b} = \frac{pb}{t}; \quad \sigma_2 = \frac{p(a*b)}{\left(2\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}\right)t} \quad (4), (5), (6)$$

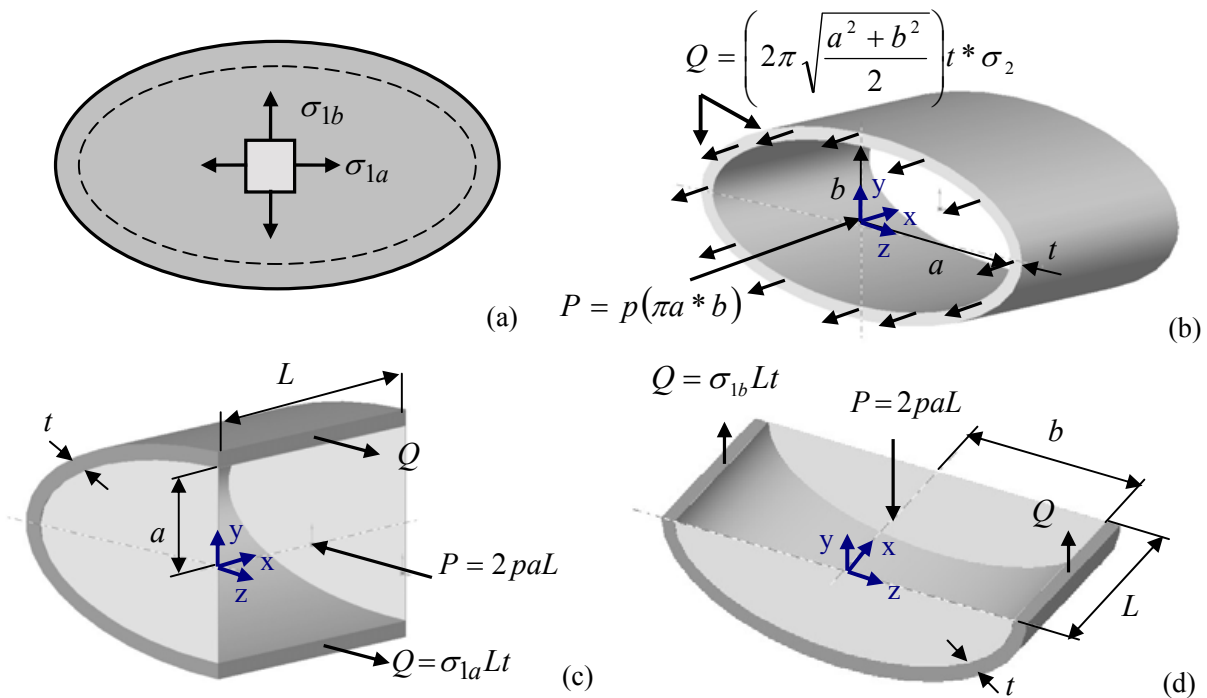


Fig. 3. Geometria elíptica (a) Diagrama do elemento infinitesimal (b,c,d) Diagrama de corpo livre

3.4. Geometria toroidal

Por último será analisada a geometria toroidal. Considerando um vaso de pressão de geometria toroidal com raio externo R , raio interno r , e espessura t .

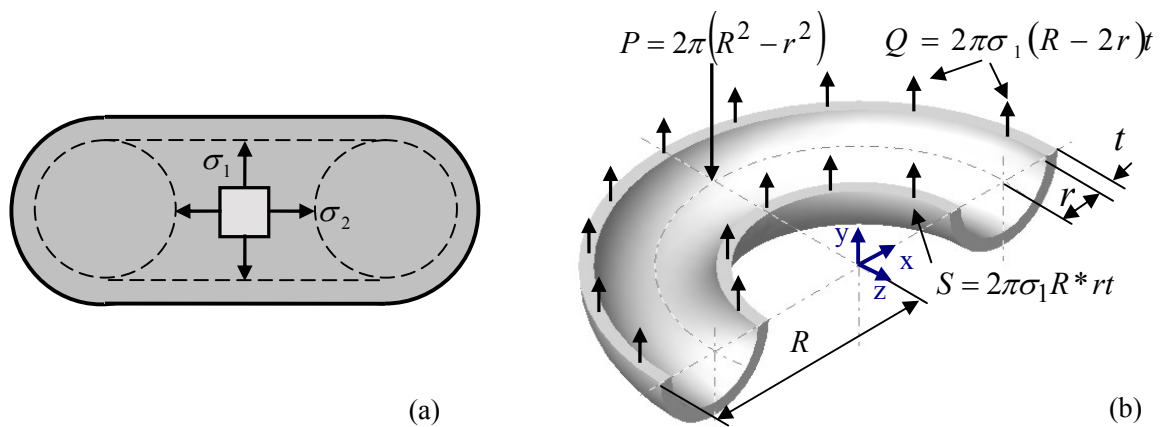


Fig. 4. Geometria toroidal (a) Diagrama do elemento infinitesimal (b) Diagrama de corpo livre

As tensões no elemento infinitesimal (Fig. 4 a), σ_1 e σ_2 , são determinadas efetuando a análise do diagrama de corpo livre em corte (Fig. 4 b), no plano “xz” para o caso de σ_1 . Para o caso de σ_2 a análise é realizada de maneira semelhante a do cilindro e a esfera.

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (R^2 - r^2)}{2t \cdot [(R - 2r) + R]}; \quad \sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (7), (8)$$

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tomando como base a teoria apresentada anteriormente foram calculados os parâmetros do cilindro Cilbras de 15 m³ disponível no mercado (Fig. 5 a) o qual foi tomado como referencia, e de três reservatórios de geometria não convencional, de galerias elípticas, estudado previamente por Sousa [5] (Fig. 5 b), elíptico (Fig. 5 c), e toroidal (Fig. 5 d).; para dois materiais diferentes disponíveis atualmente no mercado, aço 4130 e alumínio 6061-T6.

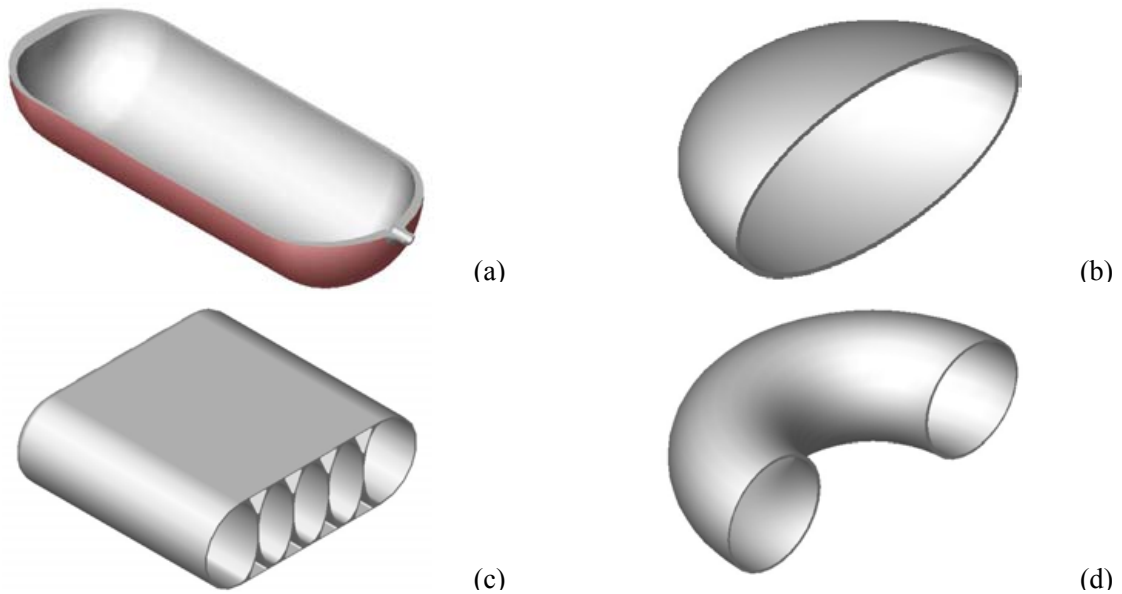


Fig. 5. Vista do reservatório em corte (a) Cilindro de mercado (b) Elíptico (c) Galerias elípticas (d) Toroidal

O modelo de veículo tomado como referencia para a instalação do protótipo é um Automóvel Fiat Palio EX restringindo assim às dimensões dos reservatórios às dimensões do compartimento do porta-malas do referido veículo. O surgimento do reservatório de galerias elípticas vem da necessidade de diminuir o espaço ocupado no porta-malas pelo cilindro (Fig. 6 a), sendo este posicionado no fundo do porta-malas (Fig. 6 b), com menor altura à do cilindro comercial.

O posicionamento do protótipo de galerias elípticas acarretaria em um problema nos veículos que possuem a cavidade do pneu de reserva no porta-malas (Fig. 6 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 (Fig. 6 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 (Fig. 6 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 de galerias elípticas seja instalado, possibilitando também a combinação dos

reservatórios de galerias elípticas e toroidal, em casos que seja requerida uma maior autonomia do veículo. A combinação dos reservatórios de galerias elípticas e elíptico, não seria possível em função do reservatório elíptico possuir uma altura maior do que a cavidade do pneu.



Fig. 6. Fiat Palio EX (a) Porta-malas ocupado pelo cilindro comercial (b) Protótipo de galerias elípticas posicionado 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.

A norma NBR 12790 ABNT [3] 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 [3] em função das pressões internas impostas pelo gás, GNC (200 MPa) e GNA (40 MPa) com Aço 4130 e Alumínio 6061-T6. Para o caso do alumínio a tensão foi calculada tomando como referencia a do aço resultando esta em 140 MPa. Foram realizadas as simulações das geometrias utilizando o programa comercial Algor® o qual se baseia no MEF (Fig. 7).

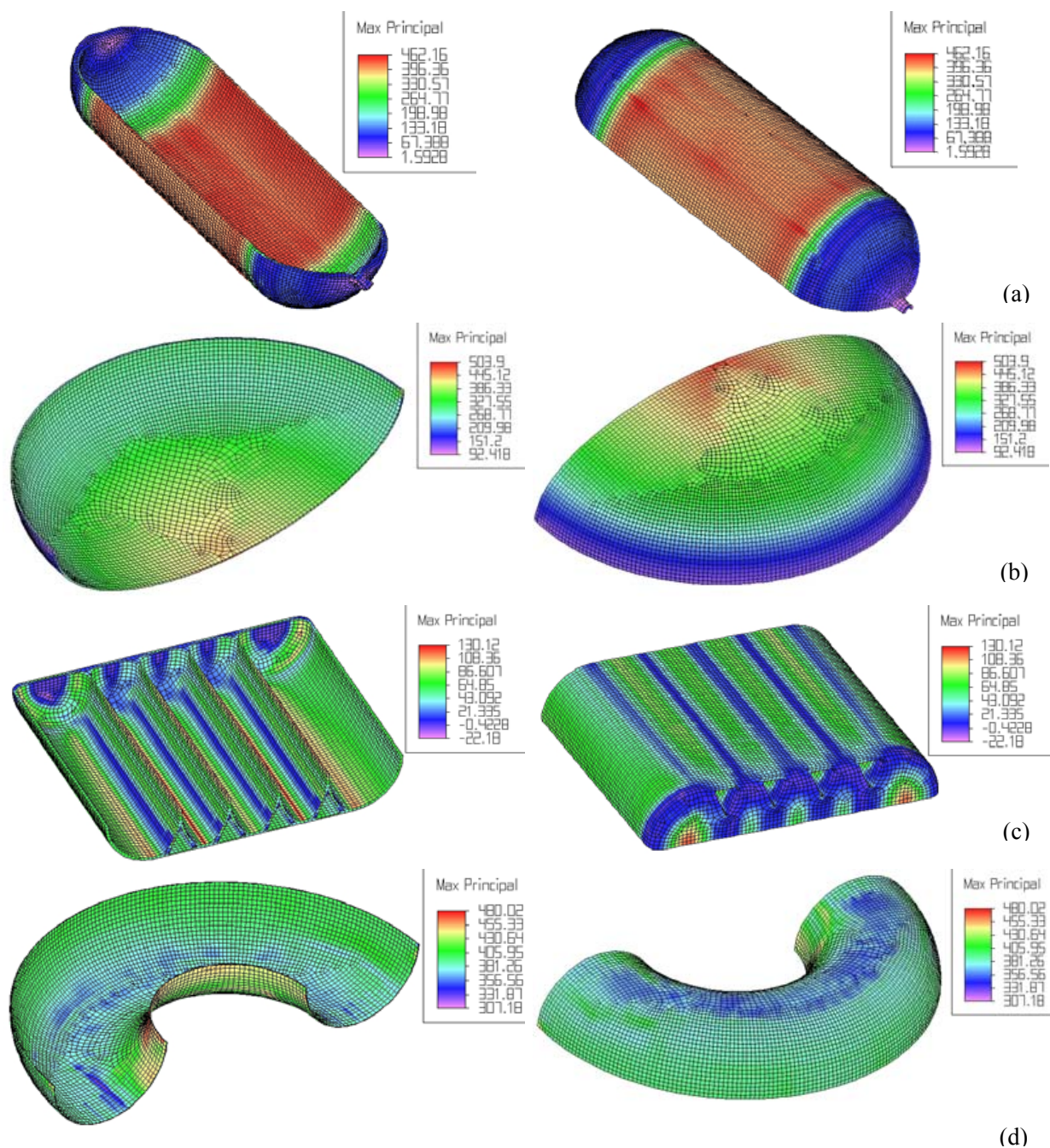


Fig. 10. Distribuição de tensões em MPa. dos reservatórios com GNA: (a) Cilindro de mercado em Aço 4130 (b) Reservatório elíptico em Aço 4130 (c) Reservatório de galerias elípticas em Alumínio 6061 T-6 (d) Reservatório toroidal em Aço 4130.

O reservatório elíptico foi projetado com espessura uniforme, para o caso dos reservatórios de galerias elípticas e toroidal em função de apresentar tensões internas diferentes em função da geometria foram projetados com duas espessuras diferentes.

Os parâmetros dos reservatórios projetados em Aço 4130 são apresentados e comparados com os do cilindro de mercado na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos reservatórios projetados em Aço 4130 comparadas com as do cilindro de mercado.

Propriedade	Cilindro de Mercado	Galerias Elípticas	Modelo Elíptico	Modelo Toroidal
Capacidade hidráulica (m ³)	0,068	0,072	0,072	0,044
Relação V/V	220	150	150	150
Volume de Gás Natural (m ³)	15	10,8	10,8	6,6
Material	Aço 4130	Aço 4130	Aço 4130	Aço 4130
Tensão de Escoamento (MPa)	910	910	910	910
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	7800	7800
Largura (mm)	350	500	650	500
Altura (mm)	350	180	325	200
Profundidade (mm)	920	900	650	650
Espessura Pesquisada (mm)	8	2,5 - 08	3,0	1,3 – 0,85
Peso (kg)	78,2	59,4	21,9	7,0

Na tabela 1 pode-se observar que a capacidade de armazenamento de gás nos reservatórios de galerias elípticas e elíptico diminui aproximadamente para 65% em relação à do cilindro comercial, em contraposição o peso diminui para aproximadamente 83% e 28% respectivamente. No caso do reservatório toroidal a capacidade de armazenamento diminui para aproximadamente 44% em relação à do cilindro de mercado mas o peso cai para aproximadamente 9%.

Os parâmetros dos reservatórios projetados em Alumínio 6061-T6 são apresentados e comparados com os do cilindro de mercado na Tabela 2.

Tabela 2: Características dos reservatórios projetados em Alumínio 6061-T6 comparadas com as do cilindro de mercado em Aço 4130.

Propriedade	Cilindro de Mercado	Galerias Elípticas	Modelo Elíptico	Modelo Toroidal
Volume do reservatório (m ³)	0,068	0,072	0,072	0,044
Relação V/V	220	150	150	150
Volume de Gás Natural (m ³)	15	10,8	10,8	6,6
Material	Aço 4130	Al 6061-T6	Al 6061-T6	Al 6061-T6
Tensão de Escoamento (MPa)	910	241	241	241
Densidade (kg/m ³)	7800	7800	7800	7800
Largura (mm)	350	500	650	500
Diâmetro da seção transv. (mm)	350	180	325	200
Profundidade (mm)	920	900	650	650
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	200	40	40	40
Espessura Pesquisada (mm)	8	3,3 – 5,5	11,1	4,6 – 3,0
Peso (kg)	78,2	39,7	28,7	8,8

A capacidade de armazenamento para o caso dos reservatórios em Aço e Alumínio 6061-T-6 é a mesma. Na tabela 2 pode-se observar que o peso no reservatório de galerias elípticas cai aproximadamente para 50%, do elíptico para 65%, e do toroide para 11% do peso do cilindro de mercado.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que o uso de geometrias não convencionais para reservatórios de GNV é bastante viável. Para o caso dos reservatórios projetados em Aço 4130 os reservatórios elíptico e toroidal apresentaram menor peso, além de ter a vantagem do menor preço do aço frente ao alumínio. Para o caso do alumínio o reservatório de galerias elípticas apresentou o menor peso.

Embora a autonomia seja reduzida, a redução do peso minimiza os esforços sofridos na estrutura do automóvel, além de possibilitar a retomada da conveniência do porta-malas.

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

As análises realizadas mostraram um bom desempenho frente às pressões impostas pelo confinamento do gás para todas as geometrias. Contudo os resultados positivos incentivam o aprofundamento da pesquisa levando-se em conta a utilização de materiais cada vez mais leves, como compósitos, e principalmente o aumento do volume armazenado para as características atribuídas aos modelos.

6. AGRADECIMENTOS

À FINEP, CNPQ, Petrobrás, CEMPES e CTGás, pelo apoio, sem o qual a realização deste trabalho não teria sido possível.

7. REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] Cook, T. L., Horne, B. H., 1997, "Low pressure adsorbed natural gas vehicle demonstration", 20th Word Gas Conference, Copenhagen, Denmark.
- [3] NBR 12790 ABNT, 1995, "Cilindro de aço especificado sem costura, para armazenamento e transporte de gases a alta pressão". Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [4] Higdon, A., Ohlsen, E.H., Stiles, W.B., Weese, J.A., Riley, W.F., 1985, "Mechanics of Materials", New York: John Wiley & Sons.
- [5] 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.

A COMPARISON BETWEEN TRADITIONAL AND NON-TRADITIONAL CAD GEOMETRIES FOR STORAGE GAS TANKS OF GNVs

John Edward Neira Villena

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte Campus Universitário Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brazil, CEP 59072-970

Ada Cristina Scudelari

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte Campus Universitário Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Natal, RN, Brazil, CEP 59072-970

Ângelo Roncali de Oliveira Guerra

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte Campus Universitário Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brazil, CEP 59072-970

Abstract. *The present work presents a comparison between different non-conventional geometries for Natural Gas Vehicle storage tanks. The tanks have been designed according to Brazilian standards (NBR) for pressure vessels. Different tank geometries are analyzed by finite element tools to verify the model efficiency. Finally, a comparison of the different designs is carried out, based on hydraulical capacity, volume of Natural Gas storage, weight and material.*

Keywords: *Pressure Vessels, NGVs, FEM.*