

ESTUDO DA INSTABILIDADE PLÁSTICA EM VASOS DE PRESSÃO CILÍNDRICO DE PAREDE FINA SEM E COM REFORÇO PARA ENSAIO HIDROSTÁTICO BOBINADO COM FIBRA METÁLICA E CARBONO EM MATRIZ EPÓXI¹

Antonio de Pádua Lima Filho²

Thales Bogaz Hernandez³

Euler Barreto Junior⁴

Edson Del Rio Vieira⁵

Resumo

O presente trabalho visa obter a pressão hidrostática interna máxima suportada por vasos de pressão de parede metálica fina sem reforços e comparar com resultados experimentais obtidos de vasos com paredes reforçadas. Estruturas em cascas cilíndricas utilizando latas de aço com baixo teor de carbono – 0,03%C e alumínio 3004 foram utilizadas. Somente as latas de alumínio foram reforçadas (bobinagem helicoidal – fibra de carbono T300 e arames de aço inoxidável 316L de 300µm de diâmetro em matriz epóxi) para obter uma estrutura em casca de elevadas propriedades mecânicas específicas. As latas de alumínio e aço testadas, suportaram, respectivamente, um carregamento hidrostático interno máximo aproximadamente de 1 MPa e 2 MPa. As estruturas reforçadas somente na região cilíndrica resistiram uma maior pressão antes da falha de 1,8 MPa. Por outro lado, as latas totalmente bobinadas pela fibra de carbono T300 não falharam até a pressão máxima disponível para o ensaio de 3,5 MPa. Corpos de prova de tração foram preparados do material das paredes das latas de alumínio e aço, e apresentaram uma resistência a tração de 292 MPa e 507 MPa respectivamente. Para ambos os materiais a deformação na fratura não ultrapassou a 0,007. Extensômetros tipo roseta 90° foram colados para acompanhar as deformações longitudinais e circunferenciais dos vasos de pressão durante o ensaio hidrostático. Critérios de escoamento de Tresca e von Mises foram usados para calcular a pressão hidrostática máxima suportada pelos vasos de pressão sem reforço e comparar com os dados experimentais obtidos. Uma imagem capturada é mostrada no exato instante da ruptura catastrófica do vaso cilíndrico sem reforço em forma de “boca de peixe”.

Palavras-chave: Estruturas em casca cilíndrica; Vaso de pressão bobinado por fibra contínua; Ensaio hidrostático; Critérios de escoamento.

STUDY OF PLASTIC INSTABILITY IN REINFORCED AND NON REINFORCED CYLINDRICAL PRESSURE VESSELS SUBJECT TO HYDROSTATIC TESTING EMPLOYING HELICAL WINDINGS OF METALLIC AND CARBON FIBRE IN EPOXI MATRIX

Abstract

The aim of this work is to calculate the maximum hydrostatic pressure sustainable by thin wall pressure vessels without reinforcement, and to compare and assay this with the experimental results from composite pressure vessels. Shell structures utilizing both steel (low carbon content – 0.03%) and aluminium (3004) beverage cans were used in this work. Only aluminium cans were reinforced (helical winding with carbon fibre T300 and 300 µm diameter 316L stainless steel wire in an epoxy matrix) separately to obtain a shell structure with high specific mechanical properties. The non reinforced aluminium and steel cans supported a maximum internal hydrostatic loading of approximately 1 MPa and 2 MPa respectively. The aluminium structures which were reinforced around the cylindrical region withstood a greater pressure before failure (1,8 MPa). However, cans reinforced solely with wound carbon fibre T300 did not fail at the maximum pressure available for testing (500 psi \cong 3,5 MPa). Tensile testing specimens were prepared from the material of the aluminium and steel can wall and showed a tensile strength of 292 MPa and 507 MPa respectively. For both materials the deformation at the fracture did not exceed 0.007. An extensometer type rosette 90° was used to follow the longitudinal and transversal strain during hydrostatic testing. Tresca and von Mises yielding criteria were used to calculate the maximum hydrostatic pressure sustainable for these pressure vessels without reinforcement, and then compared with the experimental data. A captured image in the shape of a “fish mouth” is shown for the exact instant of catastrophic rupture of the pressure vessel without reinforcement.

Key words: Cylindrical shell structures; Filament wound vessel; Hydrostatic test; Yielding criteria.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² UNESP-Campus de Ilha Solteira – Depto. de Eng. Mecânica - Eng. Metalúrgico pela EEIMVR-UFF; Mestre em Ciência pelo ITA; PhD pela University of Sheffield – Inglaterra

³ UNESP – Campus de Ilha Solteira. Departamento de Engenharia Mecânica.

⁴ Consultor em extensometria (<http://paginas.terra.com.br/educacao/straingage/>)

⁵ UNESP-Campus de Ilha Solteira – Depto. de Eng. Mecânica – Eng. Mecânico pela UNESP-FEIS-DEM, Mestre em Ciência pela UNESP-Guaratinguetá, Doutor em Ciência pelo ITA, Livre Docente pela UNESP.

INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo calcular a pressão hidrostática interna máxima suportada por vasos de pressão de parede fina através da análise da tensão e deformação e comparar com os resultados experimentais obtidos de vasos de pressão bobinados 90° com arames de aço inoxidável 316L 300µm de diâmetro e fibra de carbono T300 em matriz epóxi. Tais ensaios permitem um sensível aumento da confiabilidade e do funcionamento do vaso de pressão.

O ensaio em protótipos de um vaso de pressão submetido a uma pressão hidrostática interna visa obter: 1. a resistência do vaso de pressão sob uma pressão interna por um período de tempo, sob certas condições específicas (testes sob diferentes tipos de atmosfera e temperaturas), (*Proof tests*); e 2. a falha sob carregamento estático (mecânica da fratura) e cíclico (fadiga) do vaso (*Burst tests*). Neste caso, a pressão na falha e o tamanho do defeito são os critérios de projeto. Tais experimentos podem ser usados para propostas de qualificação e desenvolvimento de projeto. Estes testes podem ser conduzidos em modelos de escala reduzida ou em escala real. A relação entre a deformação e a tensão é obtida para diversos graus de incremento da pressão hidrostática interna Fried.⁽¹⁾

Estruturas em cascas cilíndricas de liga de alumínio da série 3004 (liga de alumínio de boa soldabilidade) são utilizadas em vaso de pressão devido a sua resistência à corrosão e mecânica (tensão de escoamento \approx 180 MPa no estado recozido), Polmear.⁽²⁾

Estruturas em cascas reforçadas, tanto esféricas como cilíndricas são muitas utilizadas na indústria: naval, esportiva, metalúrgica, de armazenamento de petróleo, de transporte rodo-ferroviários, e aeroespacial, Schwartz⁽³⁾ e Farshad.⁽⁴⁾ Nestas indústrias, além da pressão hidrostática interna ou externa, os vasos de pressão podem estar sujeitos simultaneamente ao carregamento dinâmico, estático, tensões térmicas, fluência e corrosão.

Pesquisadores têm estudado estruturas cilíndricas em tubos metálicos reforçados por fibras metálicas,⁽⁵⁾ cerâmicas em matriz metálica⁽⁶⁾ e filamento multidirecional de fibra de vidro em matriz epóxi⁽⁷⁾ para transportes de derivados de petróleo e outros.

Os reforços empregados nas estruturas bobinadas são as fibras de vidro, carbono e aramida. As resinas mais comuns são as poliésteres, epóxi, éster vinil, bismaleimida e fenólicas de cura a quente, sendo a epóxi a mais utilizada.⁽³⁾

O processo de bobinagem pode ser classificado como helicoidal ou polar.⁽³⁾ A diferença entre elas está na forma de bobinar o reforço. A bobinagem helicoidal o mandril está em movimento de rotação e o carrinho que transporta a fibra, desloca ao longo do mandril longitudinalmente na ida e na volta. Na bobinagem polar, o mandril gira em torno do seu eixo a cada passo após o carrinho completar uma volta sobre a superfície cilíndrica/esférica do mandril. Os ângulos de bobinagem helicoidal e polar nos vasos de pressão variam respectivamente de 20 a 90° (bobinagem circunferencial) e 5 a 15°. A bobinagem circunferencial 90° além de fornecer uma maior reforço na direção onde a tensão de escoamento circunferencial (σ_1) é duas vezes a de escoamento longitudinal (σ_2), permite compactar outras camadas bobinadas em diferentes ângulos. Assim, as propriedades mecânicas do vaso de pressão bobinado dependerão do ângulo de bobinagem do reforço.

Segue uma breve análise de tensão das estruturas em casca submetida à pressão hidrostática interna.

A Figura 1 mostra uma estrutura em casca onde está atuante um estado plano de tensões principais σ_1 e σ_2 no elemento de espessura t , de largura dl_2 e dl_1 respectivamente.

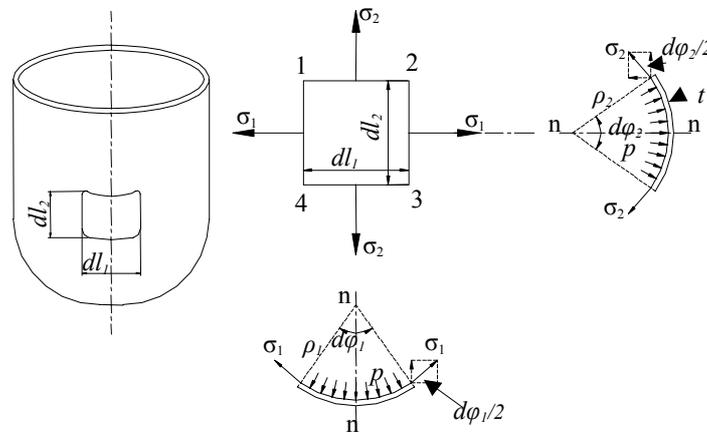


Figura 1. Estruturas em casca submetida à pressão hidrostática interna.⁽⁸⁾

Fazendo a condição de equilíbrio pela projeção das forças na direção normal n-n e considerando pequenas as dimensões do elemento, obtém-se a equação:

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} = \frac{p}{t} \quad (1)$$

Considerando estrutura esférica onde $\rho_1 = \rho_2 = r$ e $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ da Equação (1) se deduz que:

$$\sigma = pr/2t \quad (2)$$

Para estrutura cilíndrica $\rho_1 = r$ (raio do cilindro) e $\rho_2 = \infty$ (raio de curvatura da diretriz do cilindro), então:

$$\sigma_1 = pr/t \quad (3)$$

A tensão σ_2 é obtida pelo equilíbrio de forças perpendiculares a face 1 e 2 (Figura 1):

$$\sigma_2 = pr/2t \quad (4)$$

Equações (2), (3) e (4) são aproximações para as tensões principais agindo na parede do vaso, ou seja, elas não consideram um raio médio $r_m = r_i + t/2$, onde r_i é o raio interno. Entretanto, o erro cometido para uma relação de $t/r_i = 0,003$, neste trabalho, utilizando medidas do raio interno ou externo, é muito pequeno.⁽⁹⁾

Na instabilidade plástica onde $dP = 0$ e utilizando a Equação 3, tem-se:⁽¹⁰⁾

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} = \frac{d\sigma_2}{\sigma_2} = \frac{dr}{r} - \frac{dt}{t} = d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3 \quad (5)$$

Da condição de instabilidade e considerando as deformações principais, e que o comprimento do cilindro é constante antes e depois da pressurização ou $d\varepsilon_2 = 0$, o primeiro invariante do tensor deformação ($d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = 0$) e a deformação efetiva

$$d\bar{\varepsilon} = \sqrt{2/3} \left[(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3)^2 \right]^{1/2}, \text{ obtém-se:}$$

$$d\bar{\varepsilon} = 2/\sqrt{3} d\varepsilon_1 = -2/\sqrt{3} d\varepsilon_3. \quad (6)$$

Como resultado, a seguinte relação pode ser obtida da Equação 5:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} = \frac{d\sigma_1}{\sigma_1} = \frac{d\sigma_2}{\sigma_2} = \sqrt{3} d\bar{\varepsilon} \text{ ou } \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \sqrt{3} \bar{\sigma} = \frac{\bar{\sigma}}{Z}, \quad (7)$$

onde: Z é denominado de subtangente e para este caso $Z = 1/\sqrt{3}$.

MATERIAL E MÉTODOS

Um aparato experimental foi construído para ensaiar estruturas em casca cilíndricas submetidas à pressão hidrostática interna, Figura 2a e b. Uma bomba manual de óleo de capacidade de 10000psi injeta óleo hidráulico no interior das latas de alumínio (3004) e de aço (0,003%C) até a ruptura final. A pressão de falha é mostrada através de um manômetro Zurich com indicador de pressão máxima de 500 psi por meio de um ponteiro que acompanha o principal. O manômetro é fixado junto a um sistema de amortecimento helicoidal (veja Figura 2b) o qual possibilita uma queda gradativa de pressão após a falha catastrófica do vaso de pressão. Este dispositivo evita danos no manômetro, e assim experimentos podem ser realizados em série.

Um anel de borracha, especialmente construído para este experimento, é posicionado na extremidade da lata. Este conjunto é pressionado através de um sistema rosca/parafuso contra a parede oposta por onde o óleo hidráulico é injetado. Após o preenchimento do vaso de pressão pelo óleo hidráulico, um aperto final é feito para eliminar eventual vazamento durante o teste hidrostático (Figura 2b).

Superfícies na região central das latas ainda contendo o líquido interno a uma certa pressão foram usinadas com lixa 400 e em direção alternada de 45° suficiente para a retirada da pintura ou criar uma superfície áspera sobre o vaso bobinado (Figura 2a). A superfície lixada foi limpa através de álcool isopropílico passando gazes sempre num único sentido para a retirada de impurezas para a colagem do extensômetro. Uma peça em alumínio foi usinada na forma da curvatura da lata, para pressionar o extensômetro contra a parede da lata durante a colagem. A fiação foi soldada no terminal do extensômetro (Figura 2a). O líquido interno foi retirado e o vaso de pressão instrumentado foi levado para o ensaio hidrostático (Figura 2b).



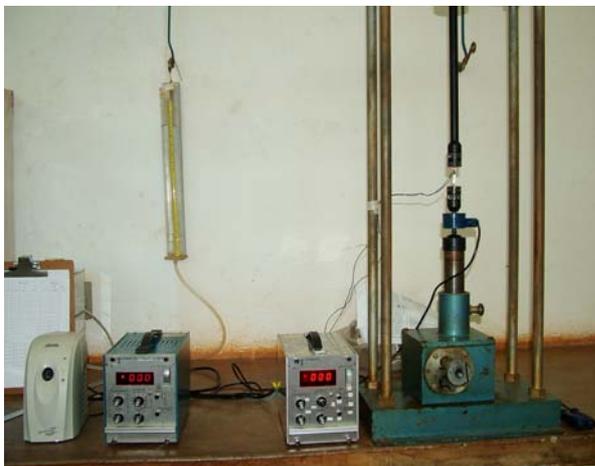
(a)



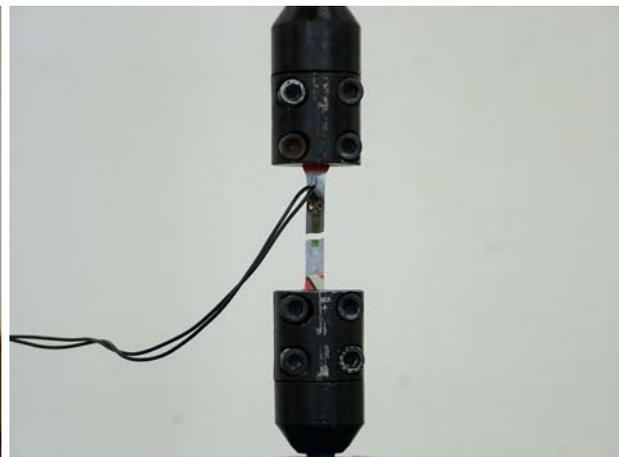
(b)

Figura 2. Colagem de extensômetro tipo roseta 90° sobre a parede do vaso com e sem reforço (a). Aparato para o teste hidrostático em vaso de pressão de parede fina construído para este experimento (b).

Corpos de prova (cdps) para ensaio de tração (ASTM-E 8M-96) foram preparados. Gabaritos feitos em acrílico possibilitou o corte manual dos cdps através de um estilete. Após o corte, as arestas foram usinadas com lixa 320 cuidadosamente para retirada de rebarbas obtidas durante o corte e assim eliminando pontos de concentração de tensão durante o ensaio de tração. Extensômetros uniaxiais de 5 mm foram colados para acompanhar a deformação. Garras foram usinadas para fixar os cdps e uma célula de carga de 500 kgf de capacidade foi utilizada para medir a força durante o ensaio de tração, Figura 3.



(a)



(b)

Figura 3. Ensaio de tração dos cdps retirados da parede das latas de Al e aço. Vista geral do aparato experimental (a), e das garras usinadas para este ensaio e o cdp rompido (b).

O sistema de aquisição de dados foi composto por dois condicionadores de sinais, todos devidamente calibrados (TMDE Transdotec). À medida que o incremento de carregamento estático era aplicado tanto no ensaio hidrostático quanto no ensaio de tração, os dados eram anotados em passos para cada nível de carregamento e deformação.

A bobinagem das latas de alumínio, ainda contendo líquido em seu interior, foi feita no torno mecânico a uma velocidade de 110 rpm, aplicando a resina epóxi por meio de um pincel sobre a superfície cilíndrica da lata. A fibra metálica (aço inoxidável 316L de 300µm de diâmetro) foi limpa continuamente antes da bobinagem por meio de uma bancada especialmente construída para esta operação. O carretel da fibra de carbono T300 foi parafusado sobre a torre do torno mecânico. Neste caso, a bobinagem foi feita na ida e na volta a um passe de 1,5mm aproximadamente sobre a parede cilíndrica das latas ainda contendo líquido. Isto possibilitou uma bobinagem da estrutura em casca sem falha, isto é sem dobra da parede cilíndrica durante a tensão de bobinagem aplicada. O excesso de resina foi retirado através de uma espátula para a cura a frio do vaso reforçado.

RESULTADO E DISCUSSÃO

A Figura 4 compara os diagramas tensão-deformação verdadeira dos materiais das latas de Al e aço. A baixa deformação até a fratura $\cong 0.007$, indica que a tensão de escoamento está próxima da resistência à tração nos dois materiais testados. A resistência a tração (σ_t) dos materiais da parede dos vasos de pressão estão em torno de 292 ± 12 MPa e 507 ± 35 MPa para cdps feitos das latas de Al e aço respectivamente.

Aplicando a curva de escoamento segundo Holloman ($\bar{\sigma} = k\bar{\epsilon}^n$) e a Equação 6, obtêm-se $\bar{\epsilon} = n/\sqrt{3}$, onde n é o coeficiente de encruamento. Assim, a partir da Equação 3, calculando r (raio) e t (espessura da casca) na instabilidade plástica e empregando os critérios de escoamento, resultam as seguintes expressões para calcular as pressões hidrostática máxima ($p_{m\acute{a}x}$), Tabela 1. A Figura 5 mostra o perfil de falha dos vasos de pressão sem reforço.

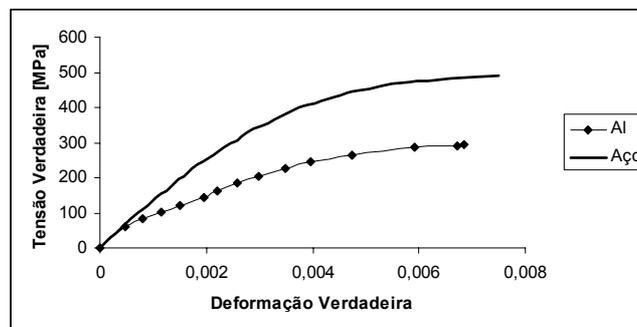


Figura 4. Curva tensão-deformação dos cdps obtida das latas de Al e aço.

Em geral, os critérios de escoamento aplicados predizem a pressão de falhas para as estruturas em casca estudadas neste trabalho. Verifica-se que o critério de escoamento de Tresca está mais próximo dos dados experimentais para latas de alumínio (estrutura atômica de face centrada). Por outro lado, o critério de von Mises está mais próximo dos valores obtidos para latas de aço (estrutura atômica de corpo centrado). Entretanto, para certificar em profundidade essas diferenças, estudos sistemáticos adicionais e exaustivos são necessários para validar as observações relatadas aqui para uma melhor discussão.

Tabela 1. Resultado teórico e experimental da pressão de falha dos vasos de pressão de parede fina (latas de Al e aço).

Critérios de escoamento, considerando $n \cong 0$	Pressão de falha, $p_{máx}$ psi, (kPa)			
	Teórico		Experimental	
	Al	Aço	Al*	Aço*
<ul style="list-style-type: none"> Tresca: $p_{máx} = t_o \sigma_t e^{-n} / (\sqrt{3})^n r_o \cong p_{máx} = \frac{t_o \sigma_t}{r_o}$ 	154 (1061)	259 (1787)	156 ± 5 (1074 ± 35)	303 ± 15 (2089 ± 103)
<ul style="list-style-type: none"> Von Mises: $p_{máx} = 2t_o \sigma_t e^{-n} / (\sqrt{3})^{n+1} r_o \cong p_{máx} = \frac{2t_o \sigma_t}{\sqrt{3} r_o}$ 	177 (1222)	298 (2058)		

*Intervalo de confiabilidade de 95%. σ_t resistência a tração das paredes dos vasos de pressão usados no experimento.

Extensômetros de resistência elétrica tipo roseta 90° foram colados na parede das latas de alumínio após a preparação adequada e cuidadosa como descrita na seção anterior. As deformações longitudinais (ε_2) são negativas indicando que a estrutura em estudo durante a pressurização hidrostática interna diminui de comprimento. Por outro lado, as deformações circunferenciais (ε_1) são positivas mostrando que a estrutura em casca está se expandindo nessa direção até a falha catastrófica (Figuras 5 e 6). Assim, o vaso de pressão cilíndrico de parede fina tende a formar um efeito baú antes da falha catastrófica (Figura 5). A imagem da Figura 5b foi obtida no instante da ruptura do vaso de pressão utilizando-se a técnica fotográfica conhecida como fotografia ultra-rápida, com uma velocidade de obtenção da ordem de 1/23000s.



Figura 5. Falha catastrófica circunferencial, onde σ_1 atua nas estruturas em casca cilíndrica (a). Imagem capturada no exato instante da ruptura catastrófica do vaso de pressão de parede fina em forma de “boca de peixe” (b).

A deformação circunferencial (ε_1) e longitudinal (ε_2) na falha catastrófica são aproximadamente de 0,006 e -0,002 indicando que a deformação circunferencial é três ordens de magnitude maior que a longitudinal, Figura 6. Por outro lado, a tensão circunferencial σ_1 é duas vezes maior do que a tensão longitudinal σ_2 , vide Equações (3) e (4), para este tipo de estrutura.

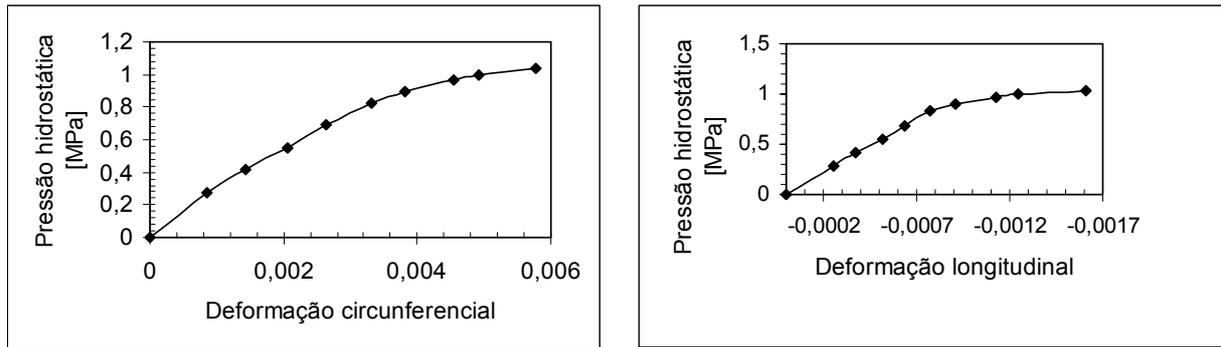


Figura 6. Deformações circunferenciais e longitudinais obtidas pelo sistema de aquisição de dados e sinais, provenientes do extensômetro roseta 90° colado na parede do vaso de pressão, até a falha catastrófica.

Latas de alumínio bobinadas somente no corpo cilíndrico com arames de aço inoxidável 316L 300 μm de diâmetro (Figura 7a), não foram instrumentadas devido à falta de uma superfície plana, causada pelo alto-relevo das fibras metálicas, necessária para a colagem do extensômetro. A pressão de falha foi de 1,8MPa, praticamente o dobro do vaso sem reforço (Tabela 1).

Por outro lado, as latas de alumínio totalmente reforçadas pela fibra de carbono T300 foram instrumentadas (Figura 2a), e durante o ensaio hidrostático não observou-se a falha e o experimento foi interrompido quando a pressão interna do vaso atingiu o fundo de escala do manômetro do aparato experimental (500psi). As deformações circunferenciais e longitudinais resultantes foram iguais em magnitude e positiva durante a pressurização, indicando que o vaso reforçado estava alongando e aumentando de volume uniformemente (Figura 7). Praticamente as deformações circunferenciais e longitudinais tiveram o mesmo valor. Isto pode ser explicado pelo passe de retorno das fibras sobre a matriz (resina epóxi), produzindo camadas de fibras de carbono T300 cruzadas sobre a parede do vaso, garantido assim a mesma deformação.

CONCLUSÃO

O dispositivo experimental construído para realizar testes hidrostáticos possibilitou ensaiar as estruturas em casca com e sem reforço empregadas neste trabalho. A partir dos resultados apresentados um modelo em maior escala pode ser construído para ensaiar vasos de pressão sem reforço e com reforço para estruturas de tamanho real aplicadas na engenharia.

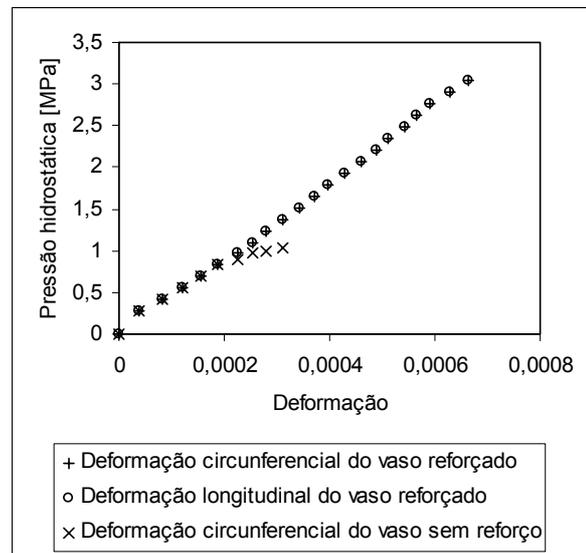
A pressão de falha ($p_{máx}$) das latas de Al e aço está bem próximas dos valores estimados pelo critério de Tresca e von Mises possibilitando prever o comportamento estático dessas estruturas. Entretanto, o critério de Tresca está mais próximo para latas de alumínio e o de von Mises para as latas de aço. A diferença talvez possa ser atribuída ao tipo de estrutura cristalina desses dois vasos de pressão. Assim, este modelo experimental pode ser usado para investigar melhor os critérios de escoamento usando estruturas em casca.

As estruturas em casca de alumínio bobinadas 90° somente no corpo cilíndrico por arames de aço inoxidável mostrou uma pressão de falha duas vezes aproximadamente superior do vaso sem reforço. O vaso de pressão totalmente reforçado (fibra de carbono T300 bobinada 90° em matriz epóxi tanto na ida quanto na volta) a falha não ocorreu para o método de ensaio empregado. Assim, um novo

modelo, mais robusto deve ser construído para ensaiar este tipo de estrutura. A automatização deste método de ensaio e um novo sistema de aquisição de sinais e dados são os próximos passos para dar continuidade a esta pesquisa.



(a)



(b)

Figura 7. Estrutura em casca reforçada pela bobinagem helicoidal (90°) sem retorno de arames de aço inoxidável 316L de $300\mu\text{m}$ de diâmetro em matriz epóxi ($p_{\text{máx}} \cong 1,8\text{MPa}$) (a). Comparação das deformações obtidas no vaso de pressão reforçado por fibra de carbono T300 através da bobinagem helicoidal 90° com retorno em matriz epóxi com o vaso sem reforço (b).

Agradecimentos

Sr. Marino e Edvaldo pelo suporte técnico mecânico. Sr. Marcelo da empresa ACRÉVEA Produtos de Borracha pelos anéis de borracha utilizados neste trabalho. A Dra. Mirabel pela fibra de carbono T300 utilizada neste trabalho. Ao meu amigo Niel pela revisão do *abstract*.

REFERÊNCIAS

- 1 FREID, N. Survey of methods of test for parallel filament reinforced plastic, In: Symposium on Standards for Filament-Wound Reinforced Plastics, ASTM Special Technical Publication, no. 327, pp. 13-39, 1963.
- 2 POLMER, I. J. Metallurgy & Materials Science – Light Alloys Metallurgy of the Light Metals. Third Edition. 1995.
- 3 SCHWARTZ, M. M., Composite Materials, Volume II: Processing, Fabrication, and Applications, Prentice-Hall, Inc., A Simon&Schuster Company, Upper Saddle River, New Jersey, 1997.
- 4 FARSHAD, M. Solid Mechanics and its Applications – Design and Analysis of Shell Structures, 1992.
- 5 SHOEMAKER, A. K.; MELVILLE, T.; STEINER, J. E. Fracture resistance of wire-wrapped cylinders, *Journal of Engineering for Industry*, pp. 219-226, February 1973.
- 6 CHEN, A. S.; SCOTT, V. D, Biaxial testing of continuous fibre reinforced aluminum tubes, *Materials Science and Technology*, pp. 969-973, v. 14, September-October 1998.
- 7 MARTENS, M.; ELLYIN, F. Biaxial monotonic behavior of a multidirectional glass fiber epoxy pipe, *Composites, Part A*, pp. 1001-1014, 31, 2000.
- 8 STIOPIN, P.A. Resistencia de Materiales. Editorial Mir Moscou, 1976.
- 9 JUVINAL, R. C. Engineering Considerations of Stress, Strain, and Strength, Mcgraw-Hill Book Company, New York, 1967.
- 10 AL-QURESHI, H. A. Processos e Mecanismos da Conformação Plástica dos Metais, São José dos Campos, Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, 1991.