

# BOBINAGEM DE ESTRUTURAS EM CASCA USANDO FIBRA DE CARBONO EM MATRIZ EPÓXI<sup>1</sup>

Cláudio Shiigueru Ohara<sup>2</sup>  
Antonio de Pádua Lima Filho<sup>3</sup>  
Mirabel Cerqueira Rezende<sup>4</sup>

## Resumo

Vasos de pressão compósitos são usados em estruturas onde requer elevadas propriedades mecânicas específicas. Este trabalho tem como objetivo reforçar estruturas em casca cilíndrica (latas de alumínio 3004) por fibra de carbono T300 em matriz epóxi através da bobinagem helicoidal. Estas estruturas reforçadas foram submetidas a pressão hidrostática interna até a fratura num equipamento especialmente desenvolvido para este teste para avaliar a máxima resistência mecânica obtida e comparar com a estrutura sem reforço. A bobinagem da fibra de carbono foi realizada num torno mecânico com passe de 0,7 mm, 1,2 mm e 1,5 mm em matriz epóxi. A resistência obtida desses vasos foram respectivamente de 8,6 MPa (1250 psi), 6,2 MPa (900 psi), e 4,1 MPa (600 psi). A resistência da estrutura em casca sem reforço é aproximadamente 1 MPa (150 psi). Linhas circunferenciais, mais proeminentes para um espaçamento maior entre as fibras de carbono, foram observadas ao longo da superfície interna do vaso indicando a ação do reforço após a falha catastrófica. Latas de alumínio também foram bobinadas em camadas duplas de fibra de carbono resultando em pressões que variam entre 9,7 MPa (1400 psi) a 12,1 MPa (1750 psi). Falhas transversais foram obtidas em vez das circunferências normalmente observadas em vasos de pressão sem reforço.

**Palavras-chave:** Estrutura em casca cilíndrica; Pressão hidrostática interna; Fibra de carbono; Resina epóxi.

## WINDING IN SHELL STRUCTURES USING CARBON FIBRE IN EPOXY MATRIX

### Abstract

Composite pressure vessels are used in structures where high specific mechanical properties are required. This work aims to reinforce cylindrical shell structures (aluminium beverage can 3004) utilizing carbon T300 fibre in epoxy resin by helical winding. These reinforced structures were submitted to internal hydrostatic pressure until the fracture in an equipment specially developed for this test to evaluate the maximum mechanical strength achieved and so to compare with the structure without reinforcement. The carbon fibre winding was carried out in a lathe with a pitch of 0.7 mm, 1.2 mm and 1.5 mm in epoxy resin. As a result, the strength obtained were respectively 8.6 MPa (1250 psi), 6.2 MPa (900 psi), and 4.1 MPa (600 psi). The metallic shell structure strength is approximately 1 MPa (150 psi). Circumferential lines are more protuberant for a larger gap between carbon fibre. These lines were observed along the internal vessel surface after the catastrophic failure. This indicates the action of the reinforcement used. Double layers of carbon fibre were wound on the aluminium can. This procedure resulted in higher pressure varying from 9.7 MPa (1400 psi) to 12.1 MPa (1750 psi). Transversal failures were obtained instead of hoop direction.

**Key words:** Cylindrical shell structure; Internal hydrostatic pressure; Carbon fibre; Epoxy resin.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia Mecânica – UNESP – Campus de Ilha Solteira

<sup>3</sup> Prof. Dr. da UNESP – Campus de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica

<sup>4</sup> Prof. Dra., CTA AMR – São José dos Campos

# 1 INTRODUÇÃO

Estruturas em casca reforçadas, tanto esféricas como cilíndricas são muito utilizadas nas indústrias: naval; armazenamento de petróleo; transportes rodo-ferroviários; e aeroespaciais. Nestas indústrias além da pressão hidrostática interna e externa, os vasos de pressão podem estar sujeitos simultaneamente ao carregamento dinâmico, estático, tensões térmicas, fluência (*creep*) e corrosão.<sup>(1, 2)</sup>

Os reforços empregados nas estruturas bobinadas são as fibras de vidro, carbono e aramida. As resinas mais comuns são os poliésteres, epóxi, éster vinil, bismaleimida e fenólicas de cura a quente, sendo a epóxi a mais utilizada.<sup>(1)</sup>

O vaso de pressão envolvido por fibras em matrizes poliméricas (material compósito em matriz polimérica), visa obter uma estrutura com propriedades mecânicas específicas superiores.

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 ambiental 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 testes de inspeção não destrutiva para o desenvolvimento de projeto. Estes testes podem ser conduzidos em modelos de menor escala ou em escala real. A relação entre a deformação e a tensão é obtida para diversos graus de incremento da pressão hidrostática interna.<sup>(3)</sup>

Materiais compósitos consistem de um material multifásico produzido artificialmente, através de combinações de dois ou mais materiais distintos, com propriedades mecânicas diferentes. Desta forma, estes materiais surgiram devido a necessidade de propriedades incomuns, não obtidas pelas ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos. Em geral, os materiais compósitos são construídos para combinar diversas propriedades, por exemplo, baixa densidade, alta resistência mecânica, elevada rigidez, alta resistência à abrasão, suportar impacto mecânico, elevada temperatura e resistência à corrosão. Assim, esses materiais são atrativos para uso na indústria aeronáutica e aeroespacial.

Este trabalho tem como objetivos bobinar estruturas em casca (latas de alumínio 3004) com fibra de carbono T300 em matriz epóxi; ensaiar os vasos compósitos pela aplicação da pressão hidrostática interna até a sua falha; analisar os defeitos após a ruptura; e obter a pressão hidrostática máxima através de um manômetro analógico.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Bobinagem do Vaso de Pressão

Latas de alumínio foram bobinadas num torno mecânico numa rotação de 110 rpm, variando o avanço (0,7 mm; 1,2 mm; 1,5 mm; 1,7 mm) para obter diferentes espaçamentos entre as fibras de carbono T300 (diâmetro do mono filamento 5,5 – 8,0  $\mu\text{m}$ ) formando tiras com 1 mm de largura e espessura de 250  $\mu\text{m}$ <sup>(4)</sup> (Figura 1). Dessa forma, diferentes propriedades mecânicas foram obtidas.

Para a bobinagem da estrutura em casca com fibra de carbono em matriz epóxi é necessário primeiramente efetuar a limpeza da superfície da estrutura com álcool e

gazes, para se obter uma superfície livre de poeiras e gorduras e assim melhorar a aderência da fibra sobre a superfície metálica.

Após a limpeza, cola-se fita adesiva dupla face na extremidade cônica da lata para a bobinagem neste local. A resina epóxi é espalhada uniformemente, através de uma espátula de plástico, sobre toda a superfície formando uma fina película. Desta forma, a superfície está pronta para receber a fibra. Após a bobinagem, esta superfície deve receber mais uma película de resina epóxi deixando uma superfície lisa e uniforme.

Bobinagem dupla foi feita com o retorno do carro do torno, para obter uma estrutura em casca mais reforçada. Neste caso o avanço foi de 1,2 mm. A extremidade afunilada da lata foi reforçada com fibra de carbono em matriz epóxi para garantir que a falha ocorresse ao longo da geratriz cilíndrica da estrutura bobinada (Figura 2).



Figura 1. Bobinagem do vaso de pressão.

## 2.2 Ensaio Hidrostático

A Figura 3 mostra o aparato experimental desenvolvido para o ensaio de vasos de pressão sem e com reforço sujeito a pressão hidrostática interna. Um bomba manual de capacidade de 68 MPa é usada para injetar óleo sob pressão no interior da estrutura. Um manômetro analógico de capacidade de 34,5 MPa (5000 psi) mede a pressão máxima suportada pela estrutura.



Figura 2. Estrutura em casca com reforços adicionais para minimizar a falha neste local considerado frágil.



**Figura 3.** Equipamento especialmente construído pelo grupo de pesquisa para ensaiar vasos de pressão. Pedido de patente depositado.

### **3 RESULTADOS**

#### **3.1 Teste Hidrostático e Análise das Superfícies do Vaso Colapsado**

As Figuras 4a e 4b mostram respectivamente os vasos de pressão bobinados com os espaçamentos entre fibras e fraturados com as pressões máximas indicadas. A superfície interna dos vasos reforçados apresenta linhas circunferenciais indicando a reação do reforço suportando a pressão hidrostática interna (Figura 5). Quanto maior o espaçamento entre as fibras, mais evidente são as linhas circunferências.

#### **3.2 Vaso Bobinado com Dupla Camada de Reforço**

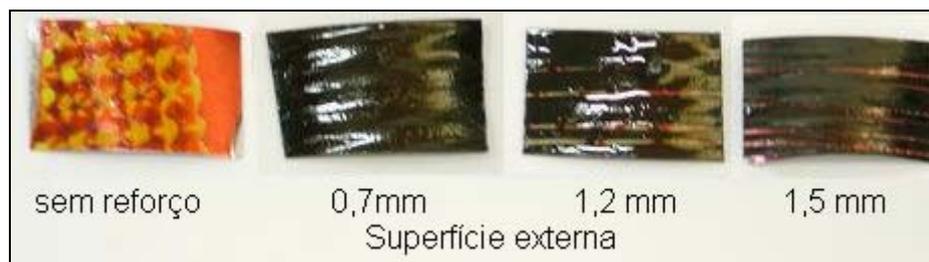
A Figura 6a mostra os vasos de pressão reforçados com duas camadas de fibra antes do ensaio de pressão hidrostático. A Figura 6b revela a forma dos defeitos após a pressão máxima interna suportada pela estrutura.

#### **3.3 Variação da Pressão de Ruptura nos Vasos de Pressão**

A Figura 7 mostra o perfil da curva de pressão de ruptura de vasos reforçados por uma única camada de fibra, bobinada com espaçamentos diferentes. A máxima pressão suportada pela estrutura em casca sem reforço e com duas camadas de fibra é mostrada para comparação nesta figura.



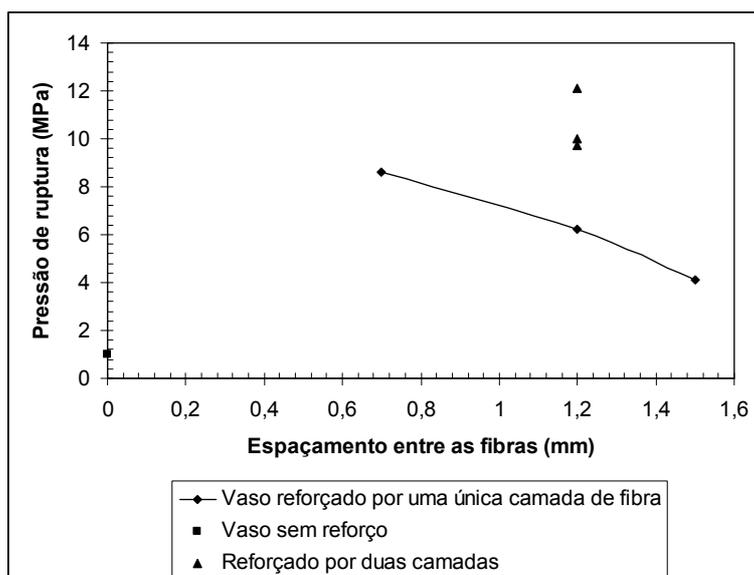
**Figura 4.** Vasos de pressão bobinados (a); e vasos de pressão com e sem reforço após o teste hidrostático (b). Espaçamento entre fibras como indicado.



**Figura 5.** Superfície externa e interna do vaso de pressão com e sem reforço após a falha catastrófica. O espaçamento entre fibras está indicado em cada figura. Tamanho da amostra 26 x 17 mm.



**Figura 6.** Estrutura em casca reforçada com duas camadas de reforço antes do ensaio (a) e após o ensaio (b).



**Figura 7.** Perfil da pressão máxima hidrostática suportada por vasos de pressão reforçados por uma única camada de fibra com diferentes espaçamentos. Pontos de pressão máxima da estrutura sem reforço e com duas camadas de fibra de carbono T300 são mostrados.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Resistência da Estrutura em Casca Reforçada por uma Camada de Fibra

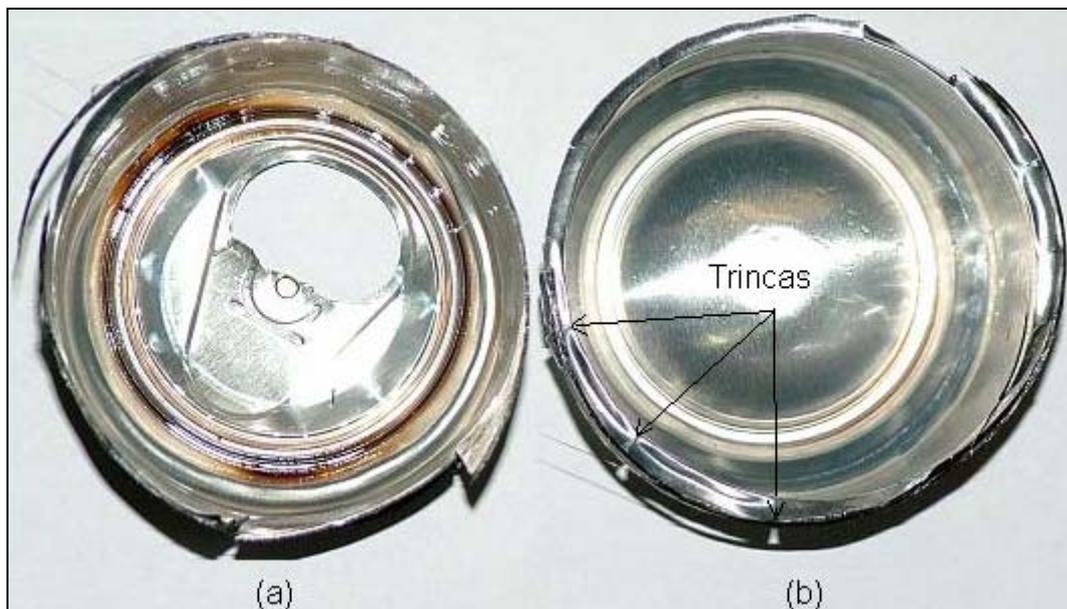
A maior resistência da estrutura em casca metálica reforçada por fibra de carbono T300 em camada única foi obtida para um espaçamento de 0,7 mm. Isto ocorreu devido a um maior volume de fibra que foi empregado para reforçar a estrutura na direção circunferencial (direção de máxima sollicitação em estruturas cilíndricas).<sup>(5)</sup> Observa-se a delaminação entre a fibra e a casca metálica.

### 4.2 Análise da Fratura Obtida nos Vasos Reforçado por Camada Única de Fibra

O reforço na extremidade como aplicado no vaso garantiu que a falha se desse na geratriz cilíndrica da estrutura (Figuras 4b e 6b). A forma natural de fratura de vasos de pressão cilíndrico é usualmente em forma de boca de peixe, ou seja, como mostrada na Figura 4b, para espaçamento entre fibra acima de 1,2 mm, com camadas únicas e sem reforço. Naturalmente, a tensão que age na direção circunferencial ( $\sigma_1$ ) é duas vezes maior do que a tensão longitudinal ( $\sigma_2$ ).<sup>(5)</sup>

Por outro lado, para espaçamento entre fibra de 0,7 mm a fratura ocorreu de forma predominantemente transversal em vez da longitudinal, contradizendo a análise de tensão para vasos cilíndricos de pressão (Figura 4).

A Figura 8a ilustra a parte do vaso que apresentou uma superfície lisa típica de uma fratura frágil. Por outro lado, a Figura 8b mostra que a falha ocorreu com o dobramento da estrutura em casca formando um flange com geração de trincas espalhadas ao longo dessa superfície. Estas trincas foram causadas devido a pouca plasticidade da casca metálica. Lima Filho et al.<sup>(5)</sup> constataram que as deformações longitudinais e transversais são aproximadamente iguais, para este tipo de estrutura reforçada, o que explica este tipo de fratura.



**Figura 8.** Superfície de fratura da parede da casca metálica lisa (a); e formação de flange com trincas na direção radial (b).

### 4.3 Análise da Superfície Interna do Vaso após o Teste Hidrostático

Linhas circunferências foram observadas na superfície interna da estrutura reforçada após a falha catastrófica (Figura 5). Estas linhas indicam a ação do reforço para manter a integridade da estrutura na direção circunferencial, onde ocorre a maior tensão de sollicitação como anteriormente mencionado. Estas marcas circunferências são notadas em espaçamentos maiores entre fibras (Figura 5). Então, a estrutura em casca tende a ser conformada entre as fibras com o aumento da pressão hidrostática. Esta observação pode explicar também a forma de fratura transversal como anteriormente descrito para espaçamento cada vez menor.

### 4.4 Propriedades Mecânicas Específicas dos Vasos de Pressão

A Tabela 1 compara as propriedades mecânicas dos vasos com e sem reforço. Observa-se que a resistência mecânica da estrutura em casca reforçada por camada simples ou dupla é muito maior do que a estrutura sem reforço. As propriedades mecânicas específicas (pressão de falha pelo peso da estrutura) são duas a três vezes maiores do que a estrutura sem reforço. Então, este tipo de estrutura é importante para o uso onde requer uma maior relação entre resistência/peso, por exemplo, em estruturas aeronáuticas/aeroespaciais.

**Tabela 1.** Comparação das propriedades mecânicas específicas dos vasos de pressão, sujeitos à pressão hidrostática interna.

Condição do vaso, espaçamento entre fibras (mm)	Pressão hidrostática máxima (MPa)	Peso da estrutura (g)	Propriedades mecânicas específicas (MPa/g)
Sem reforço	1,0	12,9	0,1
Camada dupla de fibra*	12,1	60,3	0,2
0,7	8,6	29,3	0,3
1,2	6,2	27,0	0,2
1,5	4,1	23,8	0,2

\*Pressão máxima obtida, veja Figura 6 e 7.

## 5 CONCLUSÃO

A fixação do vaso de pressão reforçado e sem reforço no protótipo para o ensaio hidrostático montado pelo grupo de pesquisa, foi realizada com sucesso e sem vazamento durante os testes realizados.

A análise da superfície de fratura realizada e a condição interna da estrutura após o ensaio hidrostático mostraram uma nova maneira de abordagem de falha de estruturas cilíndricas reforçadas circunferencialmente.

A próxima etapa é bobinar com um ângulo maior nas primeiras camadas e terminar com uma camada com ângulo próximo a 90°, para aumentar a resistência mecânica longitudinal sem aumentar o peso da estrutura e analisar o tipo de falha resultante após o teste hidrostático.

## **Agradecimentos**

Aos técnicos da oficina mecânica da UNESP - Campus de Ilha Solteira, Marino Caetano Teixeira, Edvaldo Silva de Araújo, Reginaldo Cordeiro da Silva pelo apoio durante a realização do trabalho experimental.

Ao Elias Amaral dos Santos pelas filmagens e fotografias digitais.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 SCHWARTZ, M. M., **Composite Materials, Volume II: Processing, Fabrication, and Applications**, Prentice-Hall, Inc., A. Simon & Schuster Company, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1997. p. 572.
- 2 FARSHAD, M., Solid Mechanics and its Applications – **Design and Analysis of Shell Structures**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1992. p. 415.
- 3 FRIED, N., Survey of methods of test for parallel filament reinforced plastics. In: Symposium on Standards for Filament Wound Reinforced Plastic. ASTM Special Technical Publication, No. 327, 1963. p. 13-39.
- 4 CHAWLA, K. K. **Ceramic matrix composites**. London: Chapman & Hall, First Edition , 1993. p. 423.
- 5 LIMA FILHO, A. d. P., HERNANDES, T. B., BARRETO JUNIOR, E., VIEIRA, E. d. R., 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 epóxi. In: Congresso Anual da ABM, 61º, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: ABM, 2006. 1 CD. p. 2370-2379.