

ESTUDO DA INSTABILIDADE PLÁSTICA EM VASO DE PRESSÃO CILÍNDRICO REFORÇADO POR FILAMENTO EM MATRIZ EPÓXI¹

Antonio de Pádua Lima Filho²
Cláudio Shigueru Ohara³
Euler Barreto Junior⁴
Leandro Augusto Lemos Franco⁵
Márcio Antonio Bazani⁶
Alcides Padilha⁷

Resumo

As indústrias modernas que utilizam vasos de pressão requerem que essas estruturas tenham elevadas propriedades mecânicas específicas e quando sujeitas a falha catastrófica não causam grande liberação de energia que possam colocar em risco vidas humanas e danos em equipamentos. O objetivo deste trabalho é reforçar estruturas em casca metálica bobinando fibra de carbono T300 em matriz epóxi variando o espaçamento entre os reforços. As estruturas em casca reforçadas são testadas pela aplicação da pressão hidrostática interna até a falha catastrófica. Análise fractográfica da estrutura sem reforço e reforçada para diversos espaçamentos entre fibras é realizada. A bobinagem de retorno de 1,2 mm entre a fibra de carbono resultou num vaso compósito que não explodiu para uma pressão interna de 12 MPa aproximadamente. O mesmo ocorreu para um espaçamento entre fibras de 0,7 mm. Defeitos na estrutura bobinada são brevemente caracterizados.

Palavras-chave: Vasos de pressão reforçados; Fibra de carbono T300; Pressão hidrostática interna; Fractografia.

PLASTIC INSTABILITY STUDY IN CYLINDRICAL PRESSURE VESSEL REINFORCED BY FILAMENT IN EPOXY MATRIX

Abstract

Modern industries that utilize pressure vessels require these structures to have specific mechanical properties that allow for catastrophic failure without the release of high energy and its associated danger to human life and damage to equipment. The aim of this work is to reinforce metallic shell structures by winding carbon fibre T300 into an epoxy matrix varying the gap between reinforcements. The reinforced shell structures are assayed by application of internal hydrostatic pressure until catastrophic failure occurs. Fracture analysis of the structures with and without reinforcement was made, employing several types of gap widths between fibres for the reinforced structures. The back winding of 1.2 mm between carbon fibres resulted in a composite vessel that failed without explosion at an internal pressure of approximately 12 MPa. The same occurred for a 0.7 mm gap between fibres. Defects in the wound structure are briefly characterized.

Key words: Reinforced pressure vessels; Carbon fibre T300; Internal hydrostatic pressure; Fractography.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² UNESP-Campus de Ilha Solteira - Dr. pela University of Sheffield – Inglaterra.

³ Engenheiro Mecânico pela UNESP-Campus de Ilha Solteira.

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

⁵ Divisão de Materiais, Instituto de Aeronáutica e Espaço - AMR/IAE/CTA – Mestre em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo ITA.

⁶ UNESP-Campus de Ilha Solteira – Doutor em Engenharia Mecânica pela UNICAMP.

⁷ UNESP-Campus de Bauru – Livre Docente pela UNESP-Campus de Bauru.

1 INTRODUÇÃO

As indústrias de petróleo, química, metalúrgica, transporte, naval, automóvel, aeronave e aeroespacial requerem materiais de alta performance para operar dentro de uma certa faixa de temperatura com reduzido peso, alta resistência mecânica, resistência ao impacto e sujeita em alguns casos, a rápida mudança de temperatura. Para obter essas propriedades, é necessário selecionar materiais que oferecem alta resistência específica (resistência por unidade de peso), rigidez específica (rigidez por unidade de peso) e tenacidade. Essas propriedades são praticamente impossíveis de combinar num único material até o presente momento. Então, é necessário combinar propriedades de materiais diferentes de tal modo a produzir um novo tipo de material conhecido material compósito.

Os materiais compósitos são constituídos de matriz cerâmica (“CMCs”), polimérica (“PMCs”) ou metálica (“MMCs”) cuja função é unir, proteger e transmitir tensão para o reforço. O reforço é usado para oferecer resistência ao material compósito e é caracterizado por materiais de alta resistência tais como: fibras metálicas (arames), fibras contínuas de polímero e cerâmico, descontínuas ou fibras curtas, partículas e *whiskers*.⁽¹⁾

Compósito em matriz polimérica é atrativo para o uso em indústrias químicas e petróleo sujeito aos ambientes corrosivos. Além disso, os compósitos com matriz polimérica oferecem muitas vantagens sobre os metais devido a maior relação resistência – peso (propriedades mecânicas específicas), e a matriz polimérica não degrada o reforço, pois não envolve altas temperaturas durante o processo de fabricação.

Por ser constituído, de matérias mais leves, tubos/vasos compósitos de pressão aplicando matriz polimérica diminuem a força humana no manuseio dessas estruturas e economia de custo no transporte, principalmente onde o acesso é difícil (aplicações *offshore* e em terreno montanhoso, por exemplo).

Em geral estas estruturas, são fabricadas pela bobinagem helicoidal e ou polar⁽²⁾. A diferença entre elas está na forma de bobinar o reforço pré-impregnado com resina no mandril. Assim, na bobinagem helicoidal, o mandril está em movimento de rotação e o carrinho que transporta a fibra, corre 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 do mandril. Os ângulos de bobinagem helicoidal e polar variam de 0° a 90° e 5° a 15° respectivamente.⁽²⁾

A bobinagem helicoidal é aplicada em estruturas de vaso compósito de pressão cilíndrico: tubos de pressão, tanques de combustível para a indústria aeronáutica (avião e helicóptero), eixo de motor para caminhão, e outras.⁽²⁾ Esta técnica de bobinagem tem sido empregada pelos autores desse trabalho para reforçar estrutura em casca metálica cilíndrica, Lima Filho et al.⁽³⁾ e Ohara, Lima Filho e Rezende.⁽⁴⁾

As principais vantagens do processo de bobinagem sobre outros processos de fabricação de compósitos são: baixo custo da matéria-prima e mão-de-obra, e reprodutibilidade devido ao movimento do mandril ser controlado por um sistema tipo CNC (*Control Numerical Computer*). Dificuldade na remoção do mandril e na impossibilidade de bobinar superfícies côncavas são as desvantagens encontradas nesse processo.⁽²⁾

Os reforços empregados nas estruturas bobinadas são as fibras de vidro, carbono e aramida. As resinas mais comuns são as poliesters, epóxi, éster vinil, bismaleimida e fenólicas de cura a quente.⁽²⁾ As resinas epóxi por ter uma maior gama de

propriedades sobre as outras resinas usadas na bobinagem de vasos de pressão, são as preferíveis em estruturas aeroespaciais.⁽⁵⁾

As fibras são molhadas preliminarmente antes da bobinagem (sistemas molháveis ou bobinagem a úmido) ou estas já estão na forma de *prepeg* (sistema *prepeg* ou bobinagem a seco) para posterior prensagem isostática a quente.⁽²⁾

Ensaio mecânicos em vasos de pressão compósitos, sob pressão hidrostática interna, são usualmente empregados.^(3,4,6) Estes testes são conduzidos pela aplicação de pressão hidrostática interna em estruturas bobinadas de várias geometrias, cilindro, esferas, e outras formas. A falha ocorre pela instabilidade elástica ou inelástica da estrutura.⁽⁶⁾

Testes em pressão hidrostática externa não são usualmente feitos em vasos compósitos. Por outro lado, a pressão hidrostática externa, é aplicada no processo de prensagem isostática a quente (*HIPping*) para compactação de materiais encapsulados em tubos de aço de baixo carbono para fabricação de compósito com matriz metálica, por exemplo.⁽⁷⁾

A bobinagem helicoidal devido a sua relativa simplicidade foi escolhida para bobinar estruturas em casca metálica cilíndrica neste trabalho. A bobinagem de estruturas em casca metálica evita o contato do fluido interno com os componentes dos compósitos os quais poderiam ser deteriorados ao longo do tempo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Aparato Experimental para o Ensaio Hidrostático

A Figura 1 mostra o aparato experimental que tem sido desenvolvido ao longo de cinco anos pelo grupo de pesquisa. A pressão hidrostática interna produz um estado biaxial de tensão na superfície do vaso, isto é, tensão transversal ou circunferente (*hoop stress*); e tensão longitudinal (*longitudinal stress*). Dois manômetros com fundo de escala de 500 psi (3,4 MPa) e 5000 psi (34,5 MPa) podem ser intercambiados no aparato para medir a pressão de falha nas estruturas em cascas metálicas sem e com reforço, respectivamente. Após a fratura do vaso de pressão, o óleo é filtrado e pela ação da gravidade volta para o reservatório para outro ensaio.

2.2 Constituintes do Compósito

Latas de alumínio de 3004 (estruturas em casca) de capacidade de 350 ml e 473 ml foram reforçadas. O reforço utilizado foi a fibra contínua de carbono T300 com 3000 filamentos, limite de resistência a tração de 3530 MPa, módulo de elasticidade de 230 GPa, alongamento de 1,5 %, e densidade de 1,76 g/cm³ ⁽¹⁾. A resina epóxi foi utilizada como matriz.

2.3 Bobinagem da Estrutura em Casca

A bobina da fibra de carbono T300 foi posicionada no carro do torno mecânico marca Sanches Blane modelo TM 280. Quando o torno é acionado na menor rotação (110 rpm), o carro do torno mecânico movimentada longitudinalmente fazendo a bobinagem da fibra na estrutura em casca, a qual, já está pré-revestida pela resina epóxi. Antes da aplicação da resina, a superfície da casca metálica é limpa com álcool e gazes para promover melhor aderência da resina. A extremidade afunilada da lata foi duplamente reforçada com fibra de carbono em matriz epóxi para garantir

que a falha ocorresse apenas ao longo da geratriz cilíndrica da estrutura bobinada. Os avanços aplicados foram de 0,7 mm, 1,2 mm e 1,5 mm. Desta forma, diferentes propriedades mecânicas dos vasos compósitos resultaram.

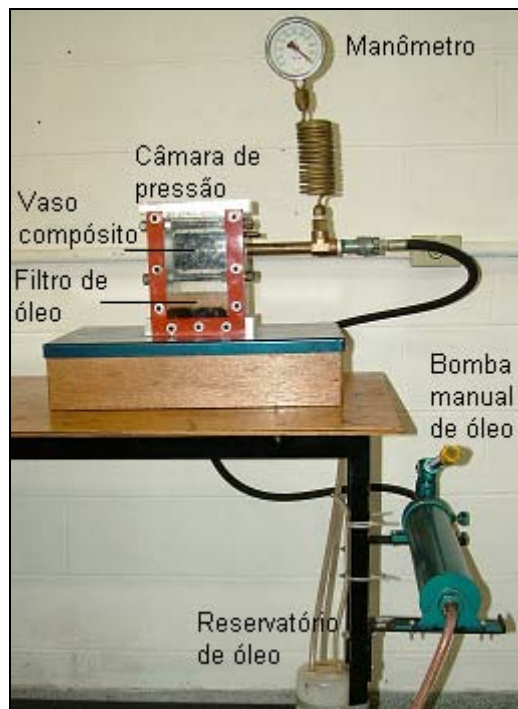


Figura 1. O aparato experimental permite a amostra ser filmada durante o teste. A capacidade da bomba manual de óleo é de aproximadamente 68 MPa.

2.4 Anel de Vedação

Um ferramental para a construção do anel de vedação através da vulcanização da borracha foi especialmente projetado e construído, Figura 2. O anel é acoplado na extremidade da estrutura e esse conjunto é fixado contra a parede por onde o óleo hidráulico é injetado. O óleo hidráulico foi escolhido, pois tem um comportamento aproximadamente incompressível e não corrói a estrutura do aparato experimental.



Figura 2. Ferramental usinado em alumínio comercialmente puro (a) para a confecção do anel de vedação de borracha (b).

2.5 Ensaio de Tração e Acompanhamento da Deformação

Um gabarito do corpo de prova de tração em acrílico foi usinado e seguiu a norma ASTM E 8M – 96 para recordar o material das paredes das latas de alumínio. O corte dos corpos de prova foi feito por um estilete seguindo o gabarito de acrílico e as arestas foram lixadas para não servir como pontos de concentração de tensão

durante o ensaio de tração.

O ensaio de tração é realizado numa máquina de tração de capacidade de 4 tf de acionamento manual (Figura 3). A deformação do extensômetro é obtida pelo indicador de deformação AM/DM, Transdutec – modelo T832. O condicionador de sinais TMDE mede a deformação da célula de carga de capacidade de 4,9 kN (500 kgf) e assim a força de tração é calculada. Uma garra especialmente construída fixa o corpo de prova na máquina de tração. Dessa forma, a curva tensão versus deformação pode ser obtida.

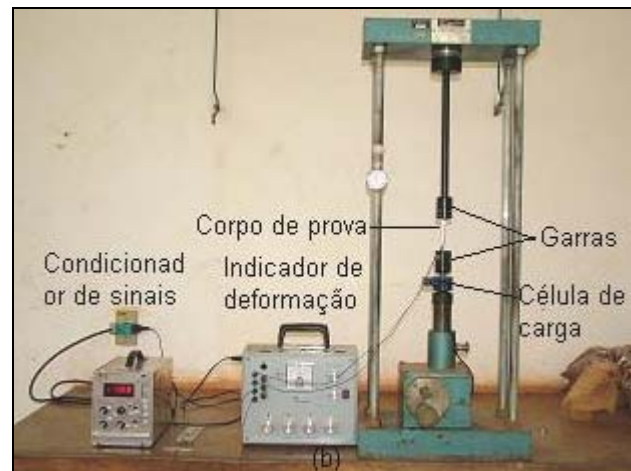


Figura 3. Detalhe do extensômetro de comprimento de 10 mm (a) e o aparato usado para o ensaio de tração (b).

Extensômetros de resistência elétrica tipo roseta 90° de 5 mm foram colados sobre a estrutura em casca metálica sem e com reforço para determinar a deformação verdadeira durante a aplicação da pressão hidrostática. O segredo para o bom funcionamento do extensômetro está na sua colagem sobre o corpo de prova. A sua colagem é uma arte e assim muito cuidadosa.

2.6 Análise Fractográfica

Amostras da superfície de fratura foram preparadas para realizar análise fractográfica dos vasos sem reforço e com reforço no microscópio de varredura marca LEO modelo 435 Vpi.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Mecânica Através do Ensaio de Tração da Casca Metálica

A Figura 4 mostra o corpo de prova fraturado e o diagrama tensão deformação do material da parede da lata. Uma resistência a tração de 245 ± 27 MPa e uma deformação verdadeira máxima de $(5084 \pm 1670)10^{-6}$ foram obtidas. O material pode ser assim classificado como baixa resistência mecânica e frágil por apresentar baixa deformação até a fratura.⁽⁸⁾ O módulo de elasticidade é aproximadamente 74 GPa, situando dentro do intervalo para alumínio e suas ligas (69 a 75 GPa).⁽⁹⁾

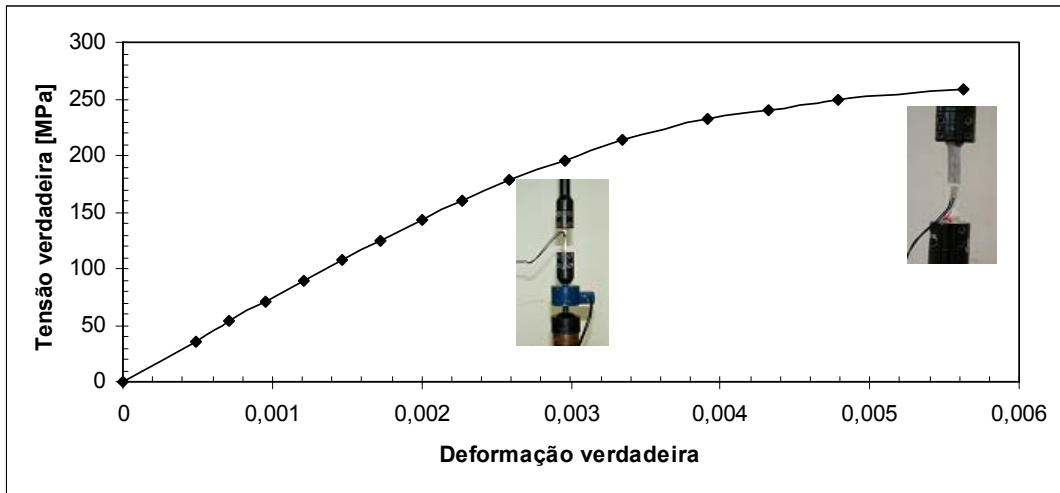


Figura 4. Diagrama tensão deformação do material das latas de alumínio.

3.2 Ensaio Hidrostático da Casca Metálica sem Reforço e Análise Fractográfica

A Figura 5 mostra o incremento de deformação em relação à pressão hidrostática aplicada e a superfície de fratura. Observa-se que a forma de falha da estrutura em casca é sempre longitudinal devido a tensão transversal (σ_1) ser duas vezes superior a tensão longitudinal (σ_2). A tensão radial (σ_3) é aproximadamente zero por se tratar de uma estrutura em casca.⁽⁸⁾

As deformações transversal e longitudinal são positivas e negativas respectivamente. Isto indica que o vaso de pressão de parede fina está expandindo transversalmente e se contraindo longitudinalmente durante a aplicação da pressão hidrostática interna, dando origem a uma forma de barril.

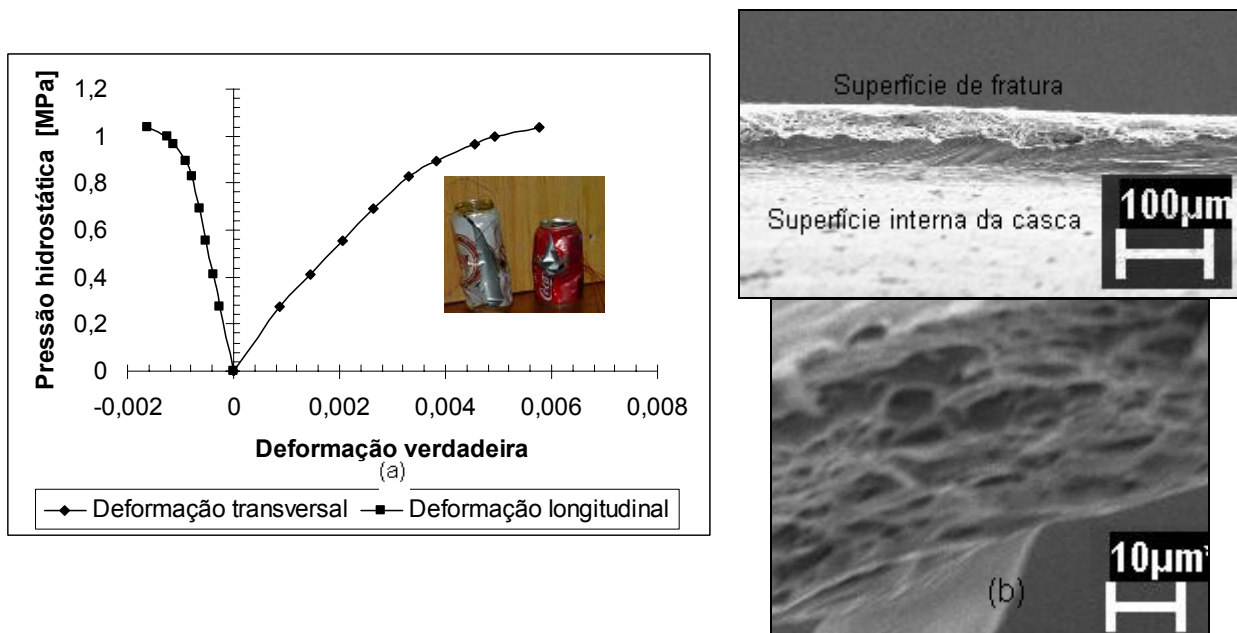


Figura 5. Curvas das deformações verdadeiras medidas durante o ensaio hidrostático para o vaso sem reforço (a) e análise fractográfica da superfície de fratura mostrando a formação de *dimples* característica de uma fratura dúctil (b).

Ocorre um ruído quando o material sofre uma falha catastrófica, muito semelhante com a brincadeira de criança, que enche um recipiente de papel ou de plástico de ar que explode, após compressão instantânea. A explosão catastrófica de vasos de pressão pode colocar em risco a vida de pessoas ou equipamentos ao seu redor. A deformação transversal até a ruptura é cerca de três vezes maior que a deformação longitudinal e muita parecida com a deformação no ensaio de tração. A pressão de falha de aproximadamente de 1 MPa equivale a uma profundidade de 100 m abaixo do nível do mar.

Esta liberação de energia está relacionada à característica de uma fratura frágil. Entretanto, a análise fractográfica mostra a formação de *dimples*, normalmente encontrados numa falha dúctil (Figura 5b).

3.3 Estimativa das Tensões Transversais σ_1 de Falha da Estrutura em Casca

As tensões transversais σ_1 máximas podem ser calculadas aplicando o critério de escoamento de Tresca e von Mises.⁽³⁾

Tresca

$$\sigma_1 = \bar{\sigma} = \frac{P_{m\acute{a}x}r}{t} \quad (1)$$

von Mises

$$\sigma_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{P_{m\acute{a}x}r}{t} \quad (2)$$

aonde $P_{m\acute{a}x}$ é a pressão hidrostática de falha, $\bar{\sigma}$ é a tensão de fluxo máxima, r e t são os valores do raios e espessura da estrutura em casca na pressão máxima. A estimativa de σ_1 está próxima da resistência à tração do material da casca⁽³⁾. Então, o tipo e a quantidade de reforço a ser aplicada circunferencialmente através da bobinagem helicoidal tem que resistir a uma tensão superior a 272 MPa aproximadamente. Assim, a fibra de carbono T300 é viável.

3.4 Estrutura em Casca Reforçada pela Fibra de Carbono em Matriz Epóxi

A Figura 6 mostra que a pressão hidrostática aplicada no vaso compósito de pressão provoca tensões transversal e longitudinal positivas e praticamente de magnitudes parecidas. Isto pode ser explicado pela bobinagem de retorno que provoca um entrelaçamento entre as fibras de carbono.

As medidas foram tomadas até 500 psi (3,4 MPa) pois no aparato experimental ainda não havia o manômetro de 5000 psi (34,5 MPa) necessário para o prosseguimento da aplicação da pressão. Entretanto, pode-se extrapolar os dados com segurança até a pressão máxima de falha, pois este tipo de material apresenta um diagrama tensão deformação linear até a fratura.⁽¹⁰⁾

A tensão transversal máxima pode ser estimada através dos critérios de Tresca e von Mises usando as Equações (1) e (2) respectivamente. Assim, uma tensão transversal 3600 MPa (Equação 1) ou 4158 MPa (Equação 2) aproximadamente poderia estar suportando a pressão de falha transversal. Entretanto, os vasos falharam na direção longitudinal região menos reforçada, Figura 7. Então, a tensão de fratura nesta direção (σ_2) pode ser estimada de 1800 MPa (Equação 1) e 2079 MPa (Equação 2), uma vez que $\sigma_2 = 1/2\sigma_1$. Estes resultados representam praticamente dez vezes mais a resistência à tração do material da parede da casca.

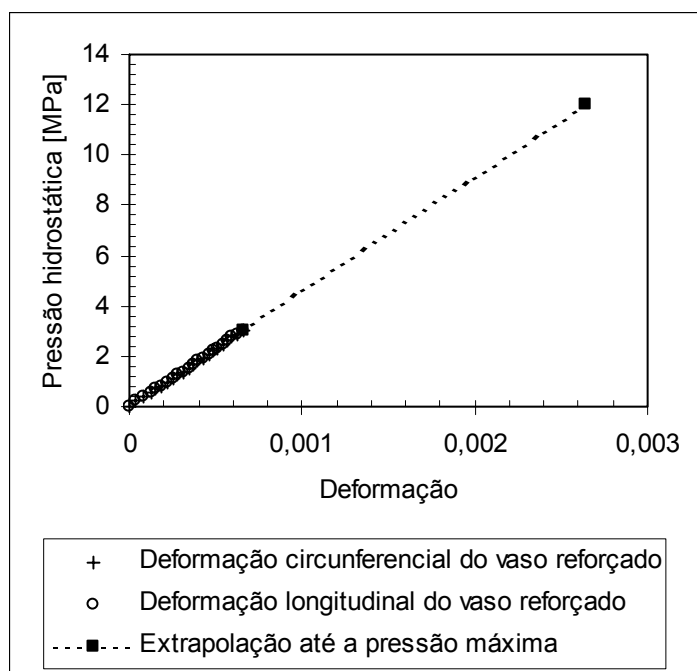


Figura 6. Diagrama pressão hidrostática versus deformação com os dados extrapolados até a ruptura do vaso. Fotografia do vaso de pressão bobinado e instrumentado para o ensaio hidrostático.

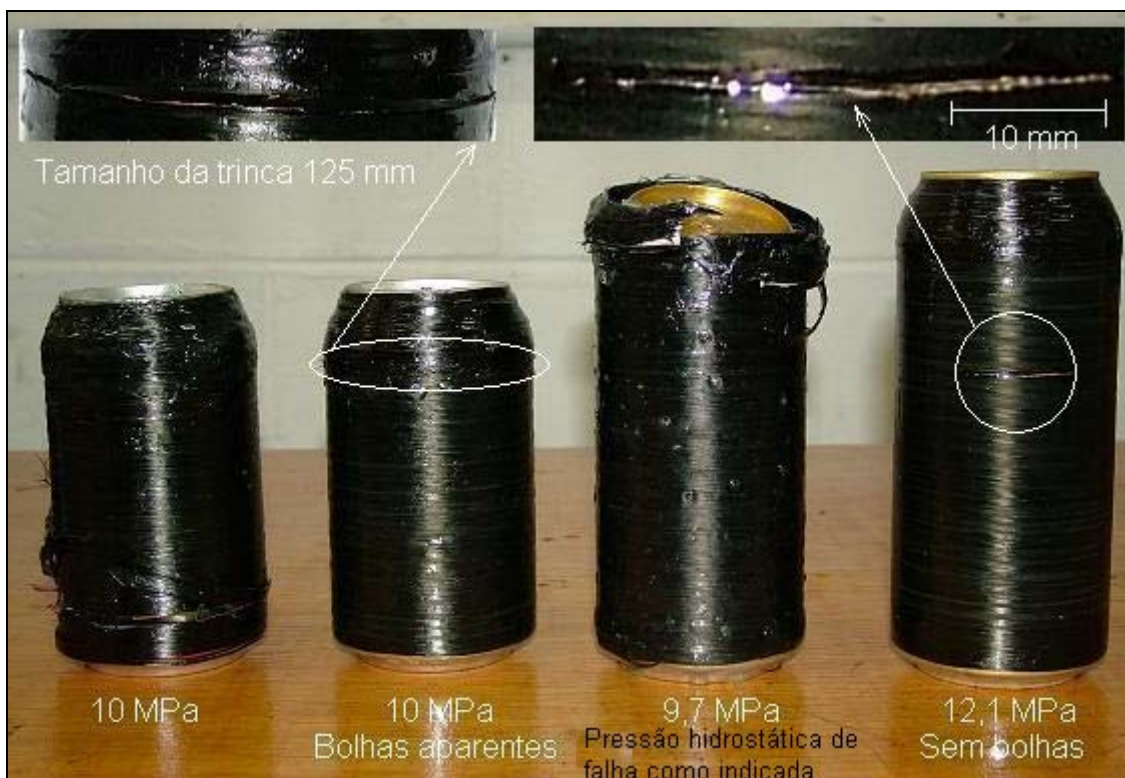


Figura 7. Estrutura em casca reforçada com duas camadas de fibra de carbono T 300 em matriz epóxi. A explosão do vaso não ocorreu uma vez que a falha ocorreu na direção longitudinal onde a tensão de falha é duas vezes menor que a tensão transversal, funcionando como uma válvula de escape.

3.5 Análise fractográfica das estruturas em cascas reforçadas

A fratura do vaso compósito de pressão pode ocorrer de forma longitudinal ou circunferente dependendo de como a fibra foi disposta sobre a estrutura em casca durante a bobinagem ⁽⁴⁾. Para uma bobinagem sem retorno acima de 1,2 mm a estrutura sofre falha transversal que está de acordo com a análise de tensão ($\sigma_1 = 2\sigma_2$). Por outro lado, para o espaçamento de 0,7 mm a fratura longitudinal ocorreu. ⁽⁴⁾ Neste caso, a explosão do vaso compósito não ocorre (Figura 7).

A Figura 8 mostra as fractografias obtidas para um espaçamento entre fibras de 1,2 com bobinagem de retorno, 1,2 mm e 1,5 mm com bobinagem sem retorno. As superfícies de fratura ilustram que as fibras não foram impregnadas pela resina. Um descolamento do feixe da fibra de carbono T300 ocorre da casca metálica para todas as situações. Após a falha, a superfície interna da casca é marcada de acordo com o espaçamento entre fibra. ⁽⁴⁾ Maior os afastamentos entre fibras mais visíveis são as linhas de marcação. ⁽⁴⁾

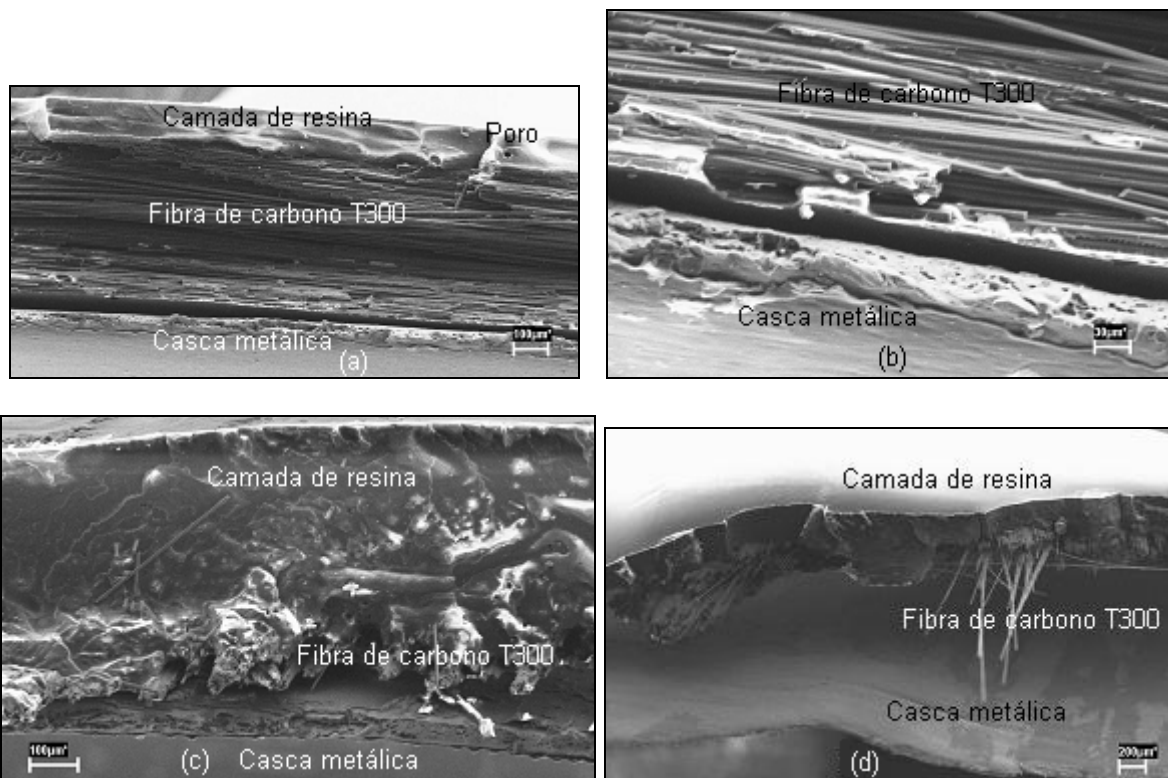


Figura 8. Fractografias das estruturas em casca bobinada por camada dupla (a) e detalhe mostrando a formação de *dimples* na casca metálica (b) – fratura longitudinal; espaçamento entre fibras de 1,2 mm (c) e 1,5 mm (d) – fratura circunferente. A extração da fibra (*pull out*) indica o não molhamento da resina sobre o feixe de fibras.

4 CONCLUSÃO

A forma de aplicar o reforço sobre a estrutura em casca é fundamental para obter um vaso compósito que não sofra explosão na pressão máxima e assim não expondo equipamentos e principalmente vidas humanas em risco. O reforço aumentou em dez vezes praticamente a resistência da casca metálica obtendo dessa forma uma estrutura de elevadas propriedades mecânicas específicas. Esta característica é importante onde se requer estruturas leves e resistentes.

Agradecimentos

Ao Sr. Marino Caetano Teixeira pelo suporte técnico junto a Oficina Mecânica da UNESP – Campus de Ilha Solteira. Ao Grupo da Profa. Dra. Mirabel Cerqueira Rezende do AMR-CTA – São José dos Campos - SP pela análise fractográfica neste trabalho. Ao meu amigo Nielsen Kann pela revisão do *Abstract*.

REFERÊNCIAS

- 1 CHAWLA, K. K. Ceramic matrix composites. London: Chapman & Hall, First Edition, 1993.
- 2 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.
- 3 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, 61°, 2006, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: ABM, 2006. 1 CD. p. 2370-2379.
- 4 OHARA, C. S., LIMA FILHO, A. d. P., REZENDE, M. C. Bobinagem de estruturas em casca usando fibra de carbono em matriz epóxi. In: Congresso Anual da ABM, 62°, 2007, Vitória, ES, Anais... São Paulo: ABM, 2007, 1 CD. p. 2781-2789.
- 5 REZENDE, M. C., O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial, Polímeros: Ciência e Tecnologia, Vol. 10, no. 2, 2000.
- 6 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, p. 13-39. 1963.
- 7 LIMA FILHO, A. d. P., Production and properties of continuous fibre metal-reinforced metal Matrix Composites. Ph.D. Thesis, The University of Sheffield, Department of Engineering Materials, April, 1998.
- 8 JUVINAL, R.C., Engineering Consideration of Stress, Strain and Strength, Mcgraw-Hill Book Company, New York, 1967.
- 9 KALPAKJIAN, S., Manufacturing Processes for Engineering Materials. Third Edition. 1997.
- 10 AL-QURESHI, H. A., Composite Materials: Fabrication and Analyses. São José dos Campos, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1984.