

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CILINDROS DE COMPÓSITO POLIMÉRICO COM BOBINAGEM SIMÉTRICA E ASSIMÉTRICA

Carvalho, O.¹, Marinucci, G.², Rossi, J. L.²

Rodovia Sorocaba/Iperó, km 12,5 – Iperó – SP – 18560-000 – carvalhoosni@uol.com.br

¹ Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo

² Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

RESUMO

O objetivo do trabalho é avaliar o comportamento mecânico de cilindros de compósito polimérico com bobinagem simétrica e assimétrica, fabricados pelo processo de bobinamento filamentar (*filament winding*). Na construção de estruturas cilíndricas de compósito polimérico, a posição das camadas exerce influência na resistência mecânica do compósito que pode comprometer o comportamento mecânico da estrutura. Dependendo da configuração de bobinagem adotada, o compósito pode ser simétrico ou assimétrico devido à posição das camadas em relação ao plano médio do material. Um compósito laminado cuja seqüência de camadas abaixo do plano médio é uma imagem de espelho da seqüência empilhada acima é denominado de simétrico. Nos compósitos com configuração assimétrica, há diferenças de distância entre as camadas de mesmo ângulo posicionadas acima e abaixo do plano médio. Essas distâncias que são diferentes devido à assimetria provocam o surgimento de efeitos que podem alterar o comportamento mecânico da estrutura cilíndrica. Para a execução dos ensaios, foram fabricados dois grupos de cilindros que apresentam alteração no posicionamento das camadas em relação ao plano médio, caracterizando laminados simétrico e assimétrico. A configuração de bobinagem, para um total de 10 camadas, tem ângulos de 90° e 30°, sendo a espessura de cada camada 0,15 mm. Resultados iniciais obtidos de ensaios hidrostático revelaram que a configuração assimétrica produziu modos de falha que apresentam, além de uma extensa trinca longitudinal, trincas próximas a 45°, caracterizando um efeito produzido pelo cisalhamento, que é resultado da assimetria. Em cilindros com bobinagem simétrica, há a ocorrência de uma trinca longitudinal, característica de ensaio hidrostático em cilindros de extremidades abertas.

Palavras-chave: *compósito, matriz polimérica, bobinamento filamentar, ensaio hidrostático.*

INTRODUÇÃO

Um material compósito pode ser definido como uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos, possuindo uma interface bem definida entre eles. Contudo, como os compósitos são usualmente utilizados devido às suas propriedades estruturais, a definição pode ser restringida para incluir somente aqueles materiais que contêm um reforço, tais como fibras ou partículas, sustentado por uma matriz que pode ser polimérica, cerâmica ou metálica (ASM, 1987).

Os materiais compósitos poliméricos possuem algumas vantagens quando comparados aos materiais tradicionalmente utilizados na engenharia, como por exemplo, aço e alumínio. Devido ao elevado desempenho e seu aspecto multifuncional, os compósitos são capazes de atender a diversos requisitos de projeto. Sua resistência à tração específica (razão entre a resistência à tração e a densidade) é aproximadamente quatro a seis vezes maior que a do aço ou alumínio. O módulo de elasticidade específico (razão entre o módulo de elasticidade e a densidade) é de três e meio a cinco vezes maior que a do aço ou alumínio (Strong, 1989). A redução de peso é significativa e

freqüentemente pode variar de 25 a 50% do peso de componentes em material metálico de aplicação geral. Outras vantagens que podem ser citadas são a elevada resistência à fadiga, ao impacto, à corrosão, além da possibilidade de eliminar diversas juntas, evitando pontos críticos estruturais e reduzindo o custo.

O processo de bobinamento filamentar (*filament winding*), utilizado para fabricação dos exemplares deste estudo, pode ser definido como uma técnica para fabricação de estruturas de compósito polimérico na qual reforços contínuos de carbono, vidro ou aramida (Kevlar), já previamente impregnados com a matriz polimérica ou impregnados durante o bobinamento (*wet winding*), são depositados sobre um mandril em rotação. O mandril geralmente é construído utilizando-se aço ou alumínio e deve apresentar um ótimo acabamento superficial.

Em aplicações estruturais, um reforço contínuo é depositado com precisão sobre o mandril, obedecendo orientações preestabelecidas pelas condições de projeto. A peça gerada é uma superfície de revolução e pode ou não incluir fechamentos nas extremidades. Quando o número requerido de camadas é atingido, a peça bobinada é curada e o mandril removido (ASM, 1987; Peters, 1989).

Cada camada depositada sobre o molde é identificada por um ângulo, sendo este ângulo de bobinagem definido como a medida, em graus, entre a direção da fibra e o eixo longitudinal do mandril. A representação de um bobinado, delimitada por colchetes que indicam a camada inicial e a final, é feita pela identificação das camadas com seus respectivos ângulos de bobinagem, iniciando-se com a primeira camada depositada sobre o molde (mandril). Camadas paralelas adjacentes com a mesma orientação são mostradas por um índice subscrito que quantifica o número de camadas. A existência de um índice subscrito S ou T fora dos colchetes, identifica, respectivamente, um laminado simétrico, neste caso somente metade das camadas são indicadas entre colchetes, ou um laminado em que todas as camadas estão representadas no código (Ashbee, 1989).

Um compósito laminado cuja seqüência de camadas abaixo do plano médio é uma imagem de espelho da seqüência empilhada acima do mesmo plano é denominado de laminado simétrico. Um laminado que possui uma seqüência arbitrária de empilhamento, não possuindo um plano médio de simetria é denominado laminado assimétrico (ASM, 1987).

O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento mecânico de cilindros de compósito polimérico com bobinagem simétrica e assimétrica. Para este trabalho foram fabricados dois grupos de cilindros utilizando-se matriz epoxídica e fibra de carbono como reforço, que foram submetidos a ensaios hidrostático.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material de reforço utilizado, levando-se em conta o desempenho pretendido e a técnica de bobinagem filamentar (*filament winding*) a ser empregada, foi a fibra de carbono T 300. Esta fibra de carbono é fornecida na forma de fio contínuo, constituído por 6000 filamentos com diâmetro da ordem de 7 μ m por filamento.

A matriz, cuja viscosidade e tempo de trabalho (*pot life*) também devem ser adequados à fabricação de peças cilíndricas pelo processo de bobinamento filментар, foi um sistema constituído por uma resina epóxi, um endurecedor e um acelerador. Os constituintes da matriz polimérica e as proporções de mistura em peso foram: resina epóxi- éter diglicidílico de bisfenol A (100p); endurecedor- metiltetrahidroftálico (100p); e acelerador- benzildimetilamina (1,0p).

Para a execução dos ensaios, foram fabricados dois grupos de cilindros com extremidades abertas, cada grupo com sete unidades. Os cilindros de cada grupo apresentaram alteração no posicionamento das camadas em relação ao plano médio, caracterizando bobinamento simétrico e assimétrico. O número de camadas utilizado foi definido com base na capacidade do dispositivo de ensaio hidrostático, permitindo uma relação diâmetro-espessura de 130.

A configuração de bobinagem para um total de 10 camadas, possui ângulos de 90° e 30°, sendo a espessura de cada camada de 0,15 mm. O ângulo seleccionado para as camadas helicoidais foi de 30°, de modo a não provocar interferência nas possíveis falhas que o efeito causado pela assimetria pudesse gerar. Após todas estas considerações, definiu-se que as configurações simétrica e assimétrica seriam respectivamente $[90^{\circ}/-30^{\circ}/+30^{\circ}/90^{\circ}]_S$ e $[90^{\circ}/-30^{\circ}/+30^{\circ}/90^{\circ}/+30^{\circ}/-30^{\circ}/90^{\circ}]_T$.

A máquina de bobinamento filментар utilizada é a que fixa o mandril na posição horizontal e cujo carro, contendo o sistema de impregnação do fio, se movimenta sobre um eixo paralelo ao eixo longitudinal do mandril. Este equipamento é controlado por CNC (comando numérico computadorizado), que permitiu a deposição do reforço com precisão nos ângulos seleccionados.

Os exemplares produzidos foram curados em estufa com mancais rotativos, com o ciclo de cura da matriz indicado na Figura 1. A etapa seguinte consistiu da remoção dos cilindros de compósito do molde e subsequente corte das extremidades para ajuste de um comprimento adequado ao ensaio hidrostático. Foi utilizado para o corte uma retificadora com disco rotativo diamantado acoplada a um torno universal.

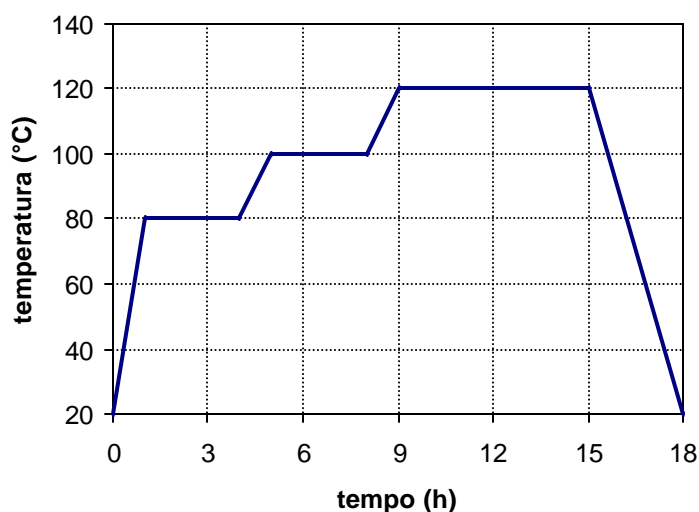


Figura 1 – Gráfico do ciclo de cura da matriz.

Os dois grupos de cilindros foram submetidos ao ensaio hidrostático, que consistiu em aplicar uma carga monotônica com taxa de 55 kPa/s de pressão interna até que se atingisse o colapso. A unidade de pressurização utilizada está equipada com uma bomba hidráulica com capacidade de até 100 MPa. O dispositivo de fixação do cilindro consiste de um tubo central com anéis de vedação nas extremidades que fazem o contato com o cilindro a ser ensaiado. A pressurização é feita através de uma entrada de óleo solúvel situada na base do dispositivo (Marinucci, 2001). A Figura 2 mostra um esquema do dispositivo de ensaio.

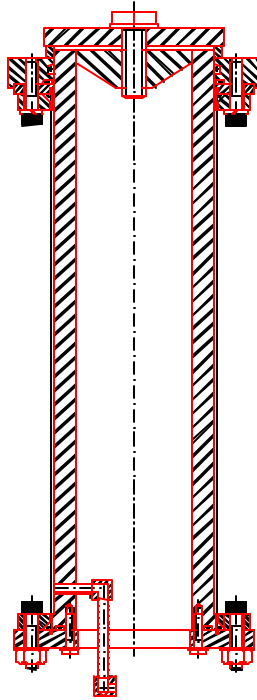


Figura 2 – Esquema do dispositivo de ensaio hidrostático (Marinucci, 2001).

Para a determinação da relação fibra/matriz dos cilindros foi utilizado o processo gravimétrico por meio de queima da matriz, obtendo como material residual a massa de fibra. Esta operação foi realizada numa mufla com atmosfera inerte de nitrogênio ultra puro e temperatura final de 700°C, utilizando amostras cortadas dos cilindros com massa aproximada de 1,5 g. A determinação da densidade hidrostática dos cilindros, foi feita em amostras cortadas com geometria retangular e massa de aproximadamente 0,3 g, seguindo orientações da norma ASTM D 792. As frações volumétricas de fibra (v_f), de matriz (v_m) e o volume de vazio (v_v) são obtidos das equações (1), (2) e (3), sendo respectivamente, f_{mf} , f_{mm} as frações de massa de fibra e de matriz e d_f , d_m e d_c as densidades da fibra, da matriz e do compósito.

$$v_f = f_{mf} \cdot d_c / d_f \quad (1)$$

$$v_m = f_{mm} \cdot d_c / d_m \quad (2)$$

$$v_v = 100 - d_c \cdot (f_{mm} / d_m + f_{mf} / d_f) \quad (3)$$

A verificação do grau de polimerização da matriz foi realizada tomando-se como referência a temperatura de transição vítrea, T_g , em um calorímetro exploratório diferencial (DSC) com atmosfera inerte de nitrogênio ultra puro e taxa de aquecimento de 40°C/min. Tal verificação permite obter o ponto de transição vítrea da matriz, que estabelece a temperatura limite na qual uma dada formulação pode manter sua integridade e como consequência evitando sua degradação (Marinucci, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, para os dois grupos de cilindros, simétrico e assimétrico, os valores obtidos de densidade do compósito (d_c), frações volumétricas (v_f) e (v_m), volume de vazio (v_v) e pressão de ruptura (P_{rup}).

Tabela 1 – Valores de densidade do compósito, frações volumétricas e pressão de ruptura dos cilindros simétricos.

CILINDRO	d_c (g/cm ³)	V_f (%)	V_m (%)	v_v (%)	P_{rup} (MPa)
1-S	1,56	65,6	33,2	1,2	22,5
2-S	1,56	65,1	33,9	1,0	22,5
3-S	1,56	65,8	32,9	1,3	23,0
4-S	1,55	65,2	33,0	1,8	21,5
5-S	1,56	65,5	33,3	1,2	21,5
6-S	1,56	65,9	32,8	1,3	23,0
7-S	1,56	65,7	33,0	1,3	23,5

Tabela 2 – Valores de densidade do compósito, frações volumétricas e pressão de ruptura dos cilindros assimétricos.

CILINDRO	d_c (g/cm ³)	V_f (%)	V_m (%)	v_v (%)	P_{rup} (MPa)
1-A	1,56	65,0	34,2	0,8	21,0
2-A	1,57	66,5	32,7	0,8	20,5
3-A	1,57	66,2	33,1	0,7	20,5
4-A	1,57	65,9	33,5	0,6	21,5
5-A	1,56	65,7	33,0	1,3	21,0
6-A	1,56	66,7	31,5	1,8	22,0
7-A	1,57	67,3	31,4	1,3	20,0

Compósitos estruturais exigem elevada fração volumétrica de fibra, reduzida fração volumétrica de vazio e dependendo da temperatura de uso da estrutura, matrizes poliméricas com elevada temperatura de transição vítrea.

Valores elevados de fração volumétrica de fibra, tais como 60% para camadas helicoidais e 65% para camadas circunferenciais, são típicos no processo de bobinamento para compósitos estruturais com reforço de fibra de carbono. Os cilindros fabricados apresentaram um valor médio de fração volumétrica de fibra de 65,9% com pequena dispersão, indicando que os parâmetros do processo de bobinamento apresentaram um ótimo controle.

Vazios em compósitos estruturais podem comprometer a resistência do material, sendo importante se obter valores inferiores a 2% (Almeida & Nogueira, 1994). Nos cilindros fabricados para este estudo, o volume de vazio foi em todos os exemplares inferior ao valor de 2%, sendo típicos em componentes estruturais onde a impregnação da fibra pela matriz ocorre imediatamente antes da deposição da mesma sobre o molde.

Os valores de temperatura de transição vítrea obtidos para a matriz dos cilindros utilizados neste estudo foram da mesma ordem de grandeza de sistemas formulados com resinas epoxídicas comerciais que apresentam valor da T_g de 120 °C (Vântico, 2001), indicando que a matriz polimérica poderia garantir integridade estrutural para aplicações até essa temperatura.

A Figura 3 apresenta o gráfico com os resultados dos ensaios hidrostático, onde a ruptura ocorreu para pressões médias de 22,5 MPa para os cilindros simétricos e de 20,9 MPa para os cilindros assimétricos, indicando uma diferença no grupo de cilindros assimétricos de 7,1% inferior ao grupo dos cilindros simétricos.

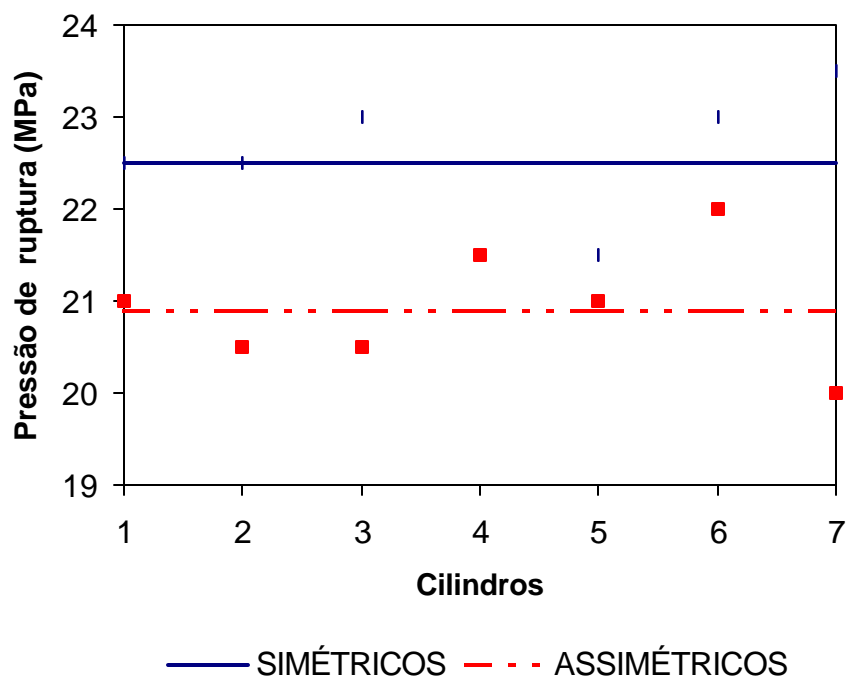


Figura 3 – Gráfico dos resultados dos ensaios hidrostático dos cilindros simétricos e assimétricos.

A Figura 4 mostra detalhes da fratura de um exemplar com bobinagem simétrica após o ensaio hidrostático, onde é possível se observar a presença de inúmeras trincas circunferenciais e uma trinca longitudinal, destacada na figura por setas. A trinca longitudinal se propagou de uma

extremidade a outra do cilindro, cujo fenômeno é uma característica de ensaio hidrostático em corpos-de-prova com extremidades abertas. A Figura 5 mostra detalhes da fratura de um exemplar com bobinagem assimétrica, onde é possível se observar as trincas em ângulos próximos de 45° , destacadas na figura por setas, indicando a presença de cisalhamento.

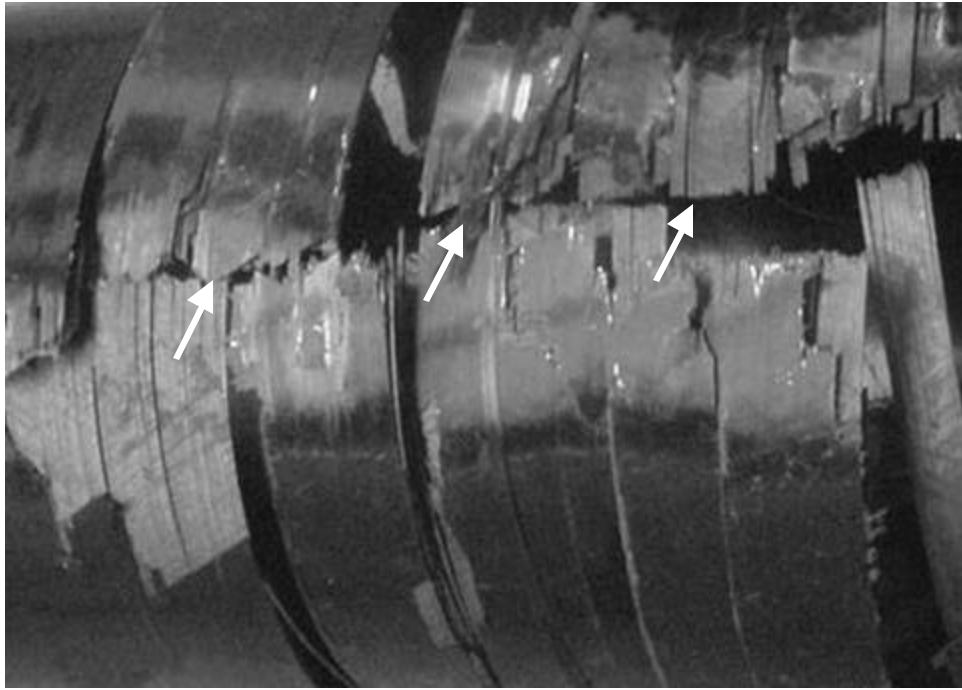


Figura 4 – Aspecto final de um cilindro com bobinagem simétrica após ensaio hidrostático.

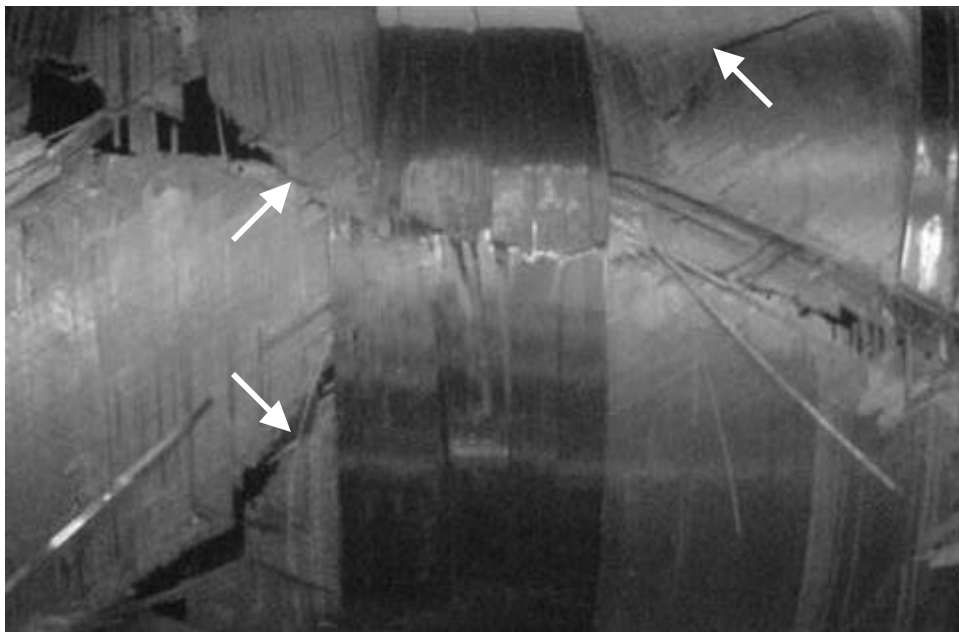


Figura 5 – Aspecto final de um cilindro com bobinagem assimétrica após ensaio hidrostático.

CONCLUSÕES

No projeto de um componente estrutural em compósito polimérico é importante considerar o posicionamento das camadas na configuração de bobinagem, pois a posição relativa de cada uma das laminas em relação ao plano médio da espessura pode ser capaz de introduzir um efeito imprevisível, podendo provocar tensões não consideradas no cálculo estrutural. Assim, não só as propriedades mecânicas de cada uma das camadas e seus respectivos ângulos de bobinagem merecem atenção no projeto de um laminado, mas também a seqüência das camadas que formam o compósito.

O modo de falha observado nos cilindros simétricos após ensaio hidrostático é caracterizado pela presença de uma trinca longitudinal que se estende de uma extremidade a outra do cilindro, enquanto nos cilindros assimétricos, além da trinca longitudinal, há a presença de trincas próximas de 45°, resultantes dos efeitos provocados pela assimetria.

Os resultados de frações volumétricas obtidos tanto para os cilindros com bobinagem simétrica quanto para os cilindros com bobinagem assimétrica poderiam levar à conclusão que os dois grupos de cilindros deveriam apresentar a mesma resistência mecânica quando submetidos ao carregamento hidrostático. Ocorre que devido ao efeito causado pela assimetria, houve uma diferença da ordem de 7% nas pressões médias de ruptura entre os dois grupos de cilindros. É importante considerar também a diferença no modo de falha ocorrida nos cilindros segundo as configurações propostas neste estudo

O presente trabalho, objetivou avaliar a influência exercida pela configuração de bobinagem em dois grupos de cilindros e permitiu a comparação entre uma configuração simétrica e outra assimétrica quando os cilindros foram submetidos à pressão monotônica interna em ensaios hidrostático. A análise dos resultados de pressão de ruptura indica que com a simetria das camadas em relação ao plano médio é possível obter uma pressão de ruptura média superior àquela obtida nos cilindros assimétricos.

REFERÊNCIAS

- 1- Almeida, S.F.M.; Nogueira Neto, Z.S., Effect of void content on the strength of composite laminates. **Composite Structures**, 28, p. 139-148, 1994.
- 2- Ashbee, K., **Fundamental Principles of Fiber Reinforced Composites**. Technomic Publishing Company, Inc., USA, p. 165-167, 1989.
- 3- ASM International, **Composites**. Engineered Materials Handbook, Vol. 1, USA, p. 7, 23, 25, 27, 502-507, 1987.
- 4- Marinucci, G., **Desenvolvimento, Fabricação e Análise de Fratura de Cilindros de Fibra de Carbono Colapsados por Pressão Interna**. Tese de Doutorado, São Paulo, p. 62-65, 87-90, 2001.
- 5- Peters, S. T., **Filament Winding Composite Structure Fabrication**. SAMPE, USA, p. 1-1, 3-6, 1989.
- 6- Strong, Dr. A. B., **Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications**. Society of Manufacturing Engineers, USA, p. 5-6, 1989.

STUDY OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF SYMMETRICAL AND ASYMMETRICAL FILAMENT WINDING POLYMERIC COMPOSITE CYLINDERS

ABSTRACT

This work evaluates the mechanical behavior of polymeric composite cylinders with symmetrical and asymmetrical sequence of plies, manufactured by the filament winding process. In the construction of polymeric composite cylindrical structures, the plies position influences the composite mechanical strength in a way that could compromise the structure mechanical behavior. Depending on the sequence of plies, the composite can be symmetrical or asymmetrical in relation to the material midplane. A composite laminate in which the stacking sequence of plies below the laminate midplane is a mirror image of the stacking sequence above the midplane is called symmetrical. In the asymmetrical composite laminates the distances between the plies with the same angle above and below the midplane are different. These distances, which are different due to asymmetry, can affect the mechanical behavior of the cylindrical structure. For the experiments, two groups of cylinders were manufactured with different plies position regarding the midplane, characterizing symmetrical and asymmetrical laminates. The sequence of plies, for a total of 10 plies, had angles of 90° and 30°, being the thickness of each layer 0.15 mm. Initial results obtained from hydrostatic tests revealed that the asymmetric sequence produced failure modes which have, besides an extensive longitudinal failure, cracks near to 45°, characterizing an effect produced by shear, as a result of the asymmetry. The cylinders with symmetrical sequence, showed failure with the longitudinal crack, characteristic of hydrostatic tests with open-ended cylinders.

Key-words: *composite, polymeric matrix, filament winding, hydrostatic test.*