

ESTUDO DA MICROESTRUTURA DE CILINDROS DE COMPÓSITO POLIMÉRICO DE FIBRA DE CARBONO FABRICADOS POR *FILAMENT WINDING*

Gerson Marinucci , Arnaldo H.P. de Andrade

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN/CNEN

O presente estudo tem por objetivo examinar a microestrutura de um compósito polimérico, adotando-se para fabricação dos exemplares de ensaio o processo de **bobinamento de filamentos contínuos**, também conhecido como *filament winding*. Para cumprir esta tarefa foram fabricados 10 cilindros, sendo 5 unidades pelo **processo cruzado** (*interweaving*) e 5 pelo **processo por superposição de camadas**, que apresenta como inovação a possibilidade da mudança do ângulo de bobinagem na construção de cada camada do cilindro, diferente do primeiro que permite esta mudança somente após o bobinamento de cada par de camadas.

Os cilindros após a polimerização da matriz e corte das extremidades foram ensaiados num dispositivo de ensaio hidrostático, especialmente projetado e construído para este estudo. Os cilindros foram carregados com pressão interna até o colapso, sendo as amostras, para análise microestrutural, retiradas das regiões fraturadas.

This study has the goal of investigating the microstructure of a polymeric composite, adopting to fabrication of test specimens the filament winding process. To get this, 10 cylindrical specimens were prepared, being 5 by the interweaving process and 5 by layer superposition process, which present as innovation the possibility of the winding angle change in the construction of each cylinder layer, differently from the former process which permits this change only after each couple of winding layer.

After matrix polymerization and ends cutting, the cylinders were tested in an hydrostatic testing device, specially designed and built to this study. The cylinders were loaded with internal pressure until the collapse, being specimens from the fracture regions removed for microstructural analysis.

Palavras chave:

Compósito, fibra de carbono, matriz polimérica, filament winding, microestrutura.

1-INTRODUÇÃO

Um dos grandes benefícios que deve ser explorado na utilização dos compósitos poliméricos é usufruir das propriedades que a fibra apresenta em sua direção longitudinal e o processo onde melhor se consegue tal situação, recomendado para fabricação de peças cilíndricas e esféricas, é o denominado de bobinamento de filamentos contínuos (*filament winding*).[1,2]

Neste processo os filamentos transportando a matriz (sistema *wet winding*) são bobinados de forma contínua sobre um mandril que gira com rotação controlada e cujo formato deve corresponder ao do interior do componente a ser produzido. O fio (*roving*) é mergulhado em um banho que contém a matriz previamente preparada o qual está posicionado sobre um carro que percorre uma trajetória paralela ao eixo do mandril (eixo longitudinal). Este banho deve ser mantido sob temperatura controlada de modo a manter a viscosidade da matriz adequada para que os filamentos sejam convenientemente impregnados apresentando um aspecto na microestrutura conforme o mostrado pela figura 1. O ângulo de bobinagem desejado é obtido pela ação coordenada da rotação do mandril com o movimento longitudinal do carro, permitindo assim que as fibras sejam posicionadas na direção das tensões principais. Basicamente os processos empregados são identificados como circunferencial (*hoop*), helicoidal e polar, sendo usual em muitos trabalhos optar-se pela composição dos mesmos.

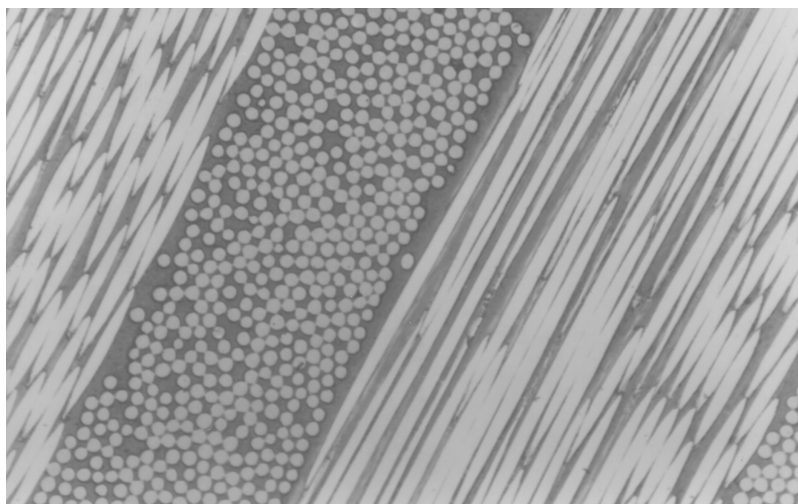


figura 1- microestrutura de um componente fabricado pelo processo *Filament Winding*.

A bobinagem helicoidal permite a deposição dos fios segundo um ângulo pré-determinado formado com o eixo de rotação do mandril de maneira que haja um balanceamento entre resistência circunferencial e longitudinal da peça, capacitando a estrutura a resistir as tensões que a solicitam e que agem nos filamentos de reforço [3]. O ângulo de bobinagem é estabelecido em função da largura da fibra, do diâmetro do mandril ou diâmetro interno desejado para o cilindro e do número de passadas requeridas para a cobertura completa do mandril. A figura 2 exemplifica o processo.

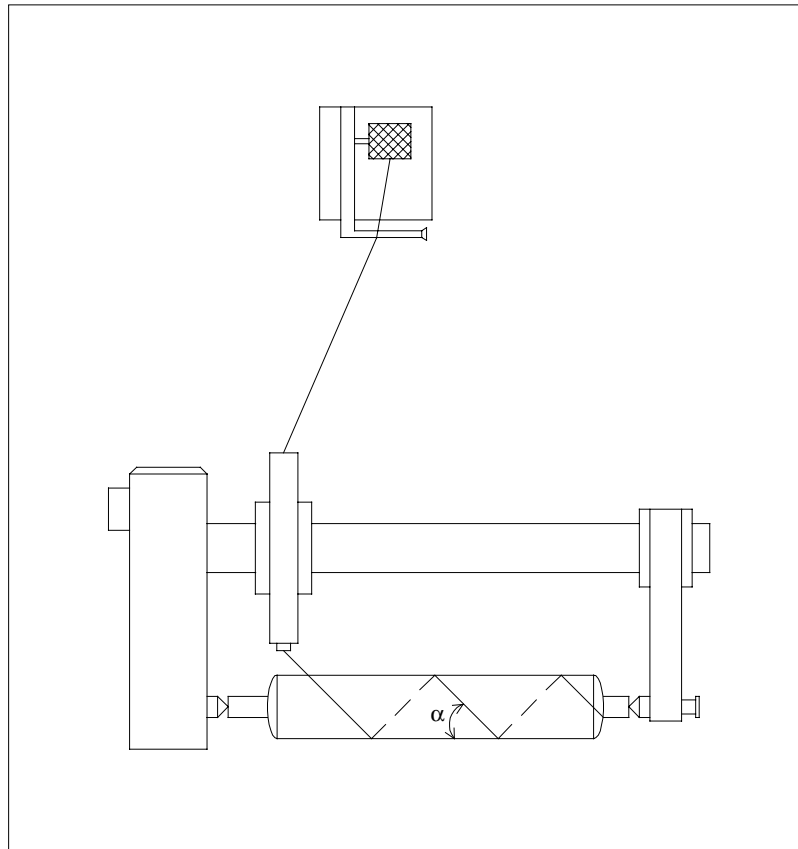


figura 2- bobinagem helicoidal.

2-MATERIAIS E MÉTODOS

No estudo que foi conduzido neste trabalho dois grupos de cilindros foram produzidos empregando-se em cada um métodos distintos de fabricação em relação à construção das camadas helicoidais, sendo utilizada fibra de carbono T300 de 6000 filamentos e matriz de

resina epoxi. No primeiro deles, identificados como A-1, A-2, A-3, A-4 e A-5, utilizou-se a bobinagem cruzada (*interweaving*) [4] que consiste numa estrutura entrelaçada onde cada cobertura completa do mandril representa efetivamente duas camadas de material, sendo estas posicionadas a $+\alpha$ e a $-\alpha$ em relação ao eixo longitudinal do mandril, conforme ilustração da figura 2. Este valor de α é um dos parâmetros de projeto do cilindro e representa o ângulo de bobinagem do processo.

Na fabricação de peças empregando-se o método citado acima há a necessidade de se acoplar às extremidades do mandril calotas especialmente projetadas, que são denominadas de domos, cuja função principal é ancorar a fibra impregnada com a matriz de modo a possibilitar o retorno do carro e assim sucessivamente em cada fim de curso deste até se que complete toda a deposição de reforço que foi previamente calculado. Quase sempre a geometria destes domos é obtida envolvendo equações matemáticas, sendo a mais recomendada, quando utilizada a técnica de bobinagem cruzada, aquela que gera uma superfície geodésica[5].

No método para fabricação do segundo grupo de cilindros, identificados como B-1, B-2, B-3, B-4 e B-5, utilizou-se um processo que permite que as camadas posicionadas a $-\alpha$ e $+\alpha$ sejam bobinadas de modo independente. Na primeira etapa todo o mandril é recoberto com a camada, por exemplo, $-\alpha$, sendo que somente após esta totalmente completa é que há início da camada seguinte, a qual será orientada na posição $+\alpha$. Isto permite que o reforço seja colocado em lâminas, a exemplo de material pré-impregnado que é largamente empregado na indústria aeronáutica e aeroespacial. Este método, portanto, é inovador, porque apesar de o trabalho ser qualificado como de bobinagem ele na verdade comporta-se como sendo de laminação.

A sequência de posicionamento do reforço sobre o mandril, para os dois métodos apresentados, é reproduzida na figura 3. O esquema na figura 3.a é produzido pela bobinagem cruzada no qual, como já foi mencionado, cada cobertura completa do mandril representa duas camadas e o da figura 3.b é produzido pelo bobinamento por superposição de camadas.

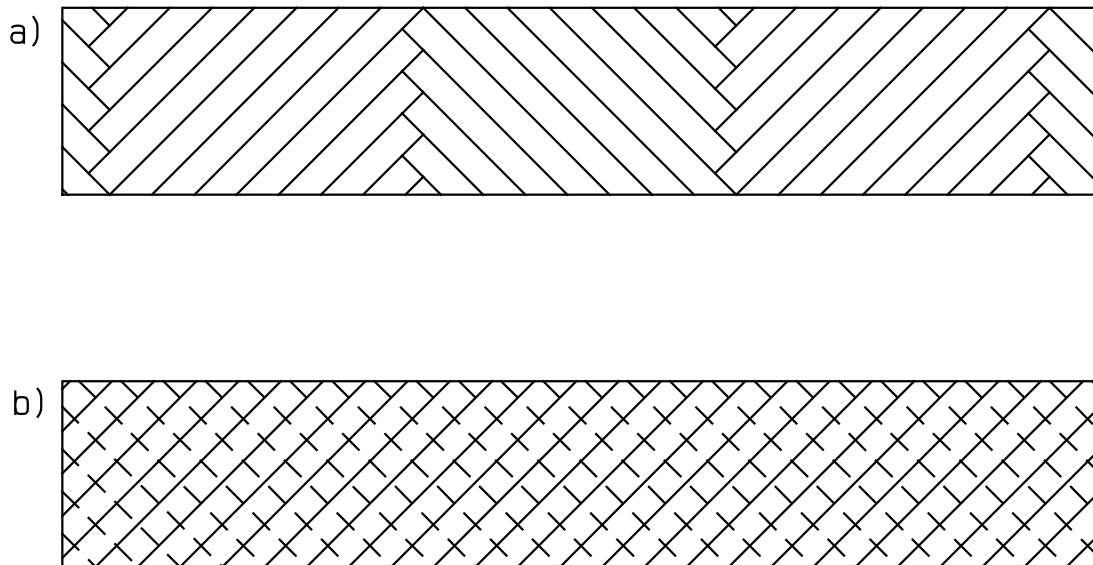


figura 3- sequência do posicionamento do reforço na fabricação pelo processo *Filament Winding* : a) bobinagem cruzada b) bobinagem por superposição de camadas.

A polimerização da matriz foi feita em estufa com mancais rotativos de modo a assegurar uma distribuição uniforme de temperatura em toda a superfície da peça garantindo-se, deste modo, uma polimerização homogênea da matriz, que do contrário poderia resultar em diferentes valores de Tg (temperatura de transição vítrea) na estrutura do material, bem como de regiões que pudessem apresentar níveis anormais de fração volumétrica. A curva que corresponde ao ciclo de polimerização do sistema resina-endurecedor-acelerador é indicada na figura 4.

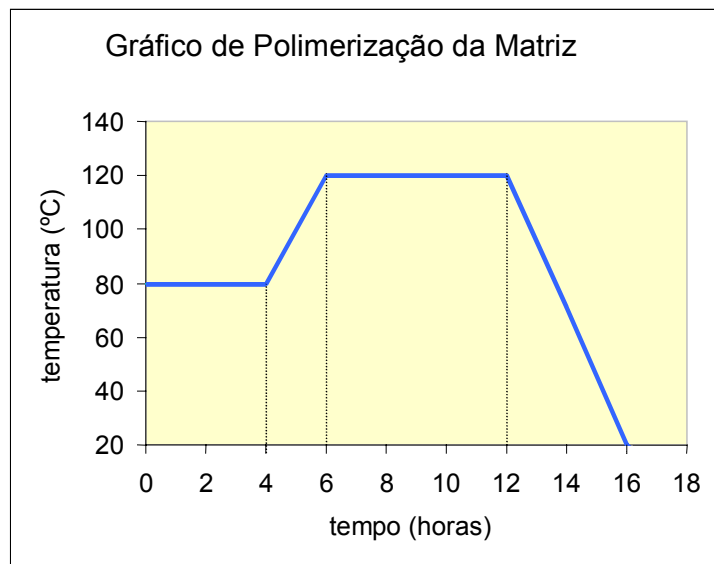


figura 4- gráfico de polimerização da matriz.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aspecto global dos cilindros após a fratura, os quais foram colapsados aplicando-se apenas tensão circunferencial, foi registrado através de uma completa foto-documentação evidenciando-se as falhas internas, externas e da seção transversal. Os cilindros em cujo bobinamento houve o entrelaçamento dos filamentos (bobinamento cruzado) mantiveram-se mais uniforme após o colapso, inclusive permanecendo no dispositivo de ensaio mesmo apresentando fraturas generalizadas. Entretanto o grupo de cilindros fabricados com superposição de camadas, exibiu um comportamento lembrando algo como "fenômeno de explosão", pois no momento do colapso o cilindro era arremessado a uma distância fora da área central do dispositivo de ensaio, com partes desmembradas do corpo do cilindro, conforme mostra a figura 5.

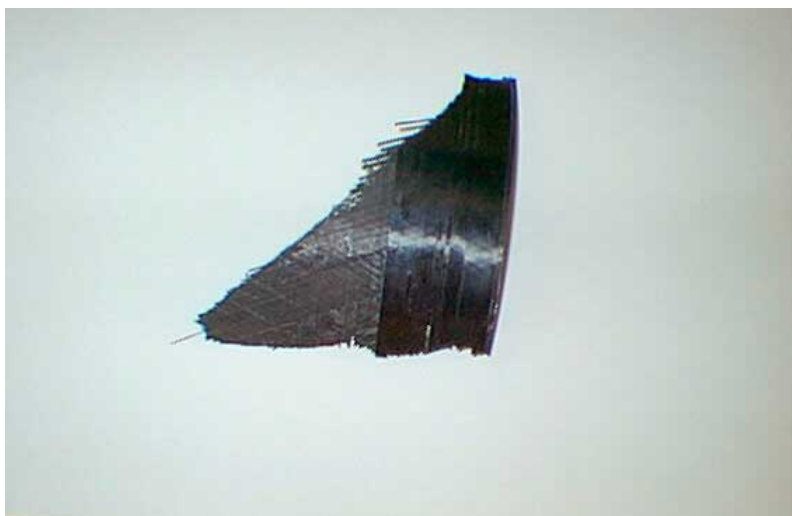


Figura 5- fragmento de um cilindro após ensaio.

Um exame dos tubos explodidos revela distintos tipos de falha. A figura 6 fornece uma visão da superfície externa de um cilindro fabricado pelo bobinamento cruzado, enquanto que a figura 7 tem o mesmo propósito, porém apresentando um cilindro fabricado por superposição de camadas. Em ambos a falha predominante é a translaminar, ocorrendo também localizadamente as falhas intralaminar e interlaminar.

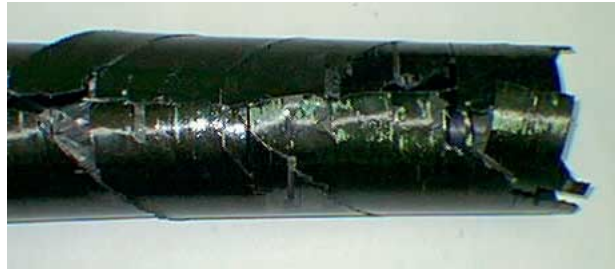


figura 6- aspecto superficial, após colapso, de um cilindro fabricado pelo método cruzado.



figura 7- aspecto superficial, após colapso, de um cilindro fabricado por superposicionamento de camadas.

A classificação do tipo de falha é útil no sentido de conduzir a escolha do melhor método analítico para cada fratura ocorrida, pois fraturas interlaminares, que tem como exemplo mais característico a delaminação, são melhores analisadas por microscopia ótica tendo como um dos objetivos a observação da direção do crescimento da trinca, enquanto que nas fraturas translaminares, que produzem a ruptura da fibra, as análises são indicadas para ser feitas por microscopia eletrônica de varredura.

Os exames realizados empregando-se microscopia eletrônica de varredura revelaram não haver diferença significativa nos modos de falha presentes nos cilindros fabricados pelos métodos cruzado e superposicionamento de camadas. A micrografia da figura 8 apresenta a

vista geral da fratura de um cilindro fabricado por superposicionamento de camadas na região da trinca longitudinal, ocorrência característica de ensaios hidrostáticos em cilindros e vasos de pressão, enquanto que a figura 9 destaca o modo de fratura de uma camada bobinada circunferencialmente de um cilindro fabricado por bobinagem cruzada.

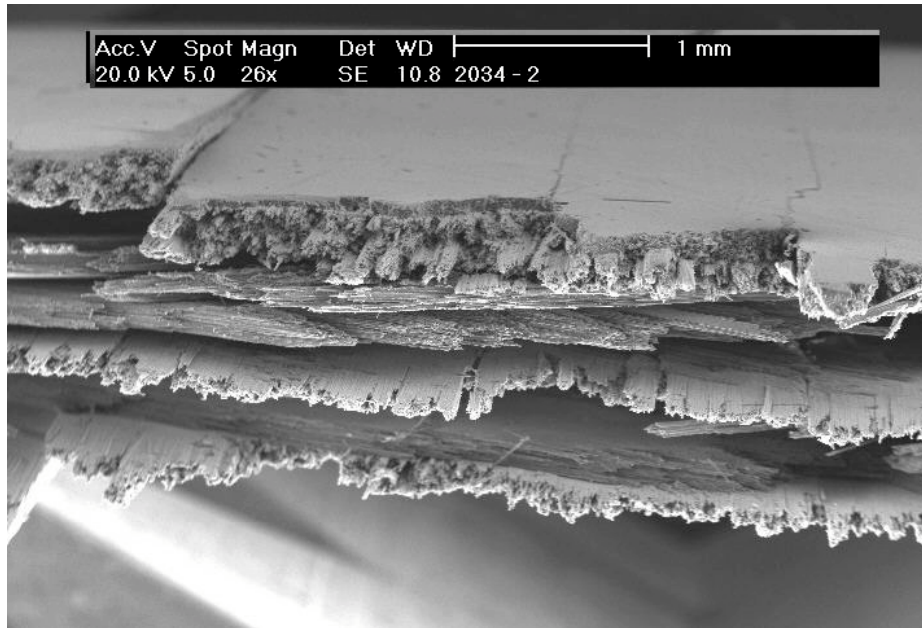


figura 8- - microestrutura de um cilindro fabricado por superposição de camadas.

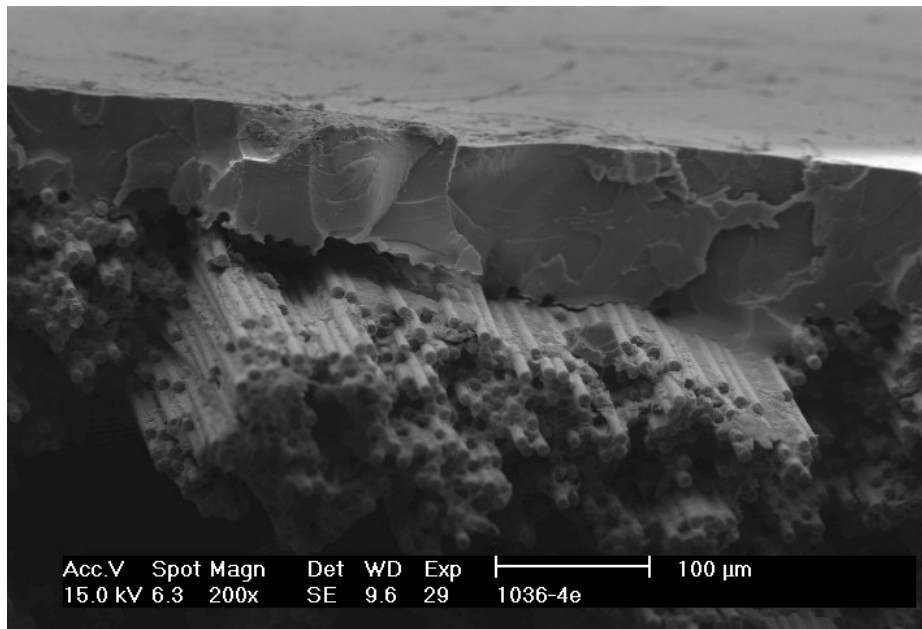


figura 9- fratura típica da camada circunferencial de um cilindro fabricado pelo método cruzado.

O fato mais evidente que pode ser observado respectivamente nas micrografias das figuras 8 e 9 é a presença, na primeira, de delaminação entre as camadas intermediárias bobinadas em ângulo e também a fratura da fibra por tração nas camadas interna, média e externa, bobinadas a 90° (*hoop*) e na segunda destaque, com maior aumento, desse modo de fratura de uma camada igualmente bobinada a 90°.

4-COMENTÁRIOS E CONCLUSÃO

As análises microestruturais utilizando MEV revelaram não haver praticamente diferença nos modos e mecanismos de falha presentes em ambos os grupos de cilindros fabricados para este estudo, sendo o modo de falha predominante aquele correspondente a ruptura das fibras por tração nas camadas bobinadas a 90°, ou seja, circunferenciais. Ocorreu também acentuada delaminação entre as camadas de 25°/90° e entre as camadas de +25°/-25° devido a fraturas interlaminares.

5-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lubin, G., Editor- Handbook of Composites. Van Nostrand Reinhold, 1982.
- [2] Schwartz, M.M., Editor- Composite Materials Handbook. McGraw-Hill, 1983.
- [3] Lee, S-L. ; Springer, S.G. –Filament Winding: Process Model. Journal of Composite Materials, 24, 1990.
- [4] Brito, F.M.- Influence of interwoven configuration on mechanical properties of crossed helicoidal filament winding composites, in Sixth International Conference on Composite Materials. London, 1987.
- [5] Correa, R.- Tubos estruturais em material composto para motores de foguetes: Estudos em Dimensionamento e Técnicas de Fabricação. Tese de Mestrado. CTA-ITA, Setembro,1979.