

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS BOBINADOS EM DIVERSAS ORIENTAÇÕES DO REFORÇO

Eduardo da Silva Leitão¹, Gerson Marinucci², Osni de Carvalho¹, Arnaldo H.P. de Andrade²

1-Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
Av. Prof. Lineu Prestes, 2268
Butantã-São Paulo
edudri13@uol.com.br
carvalhoosni@uol.com.br

2-Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242
Butantã-São Paulo
marinuci@ipen.br
aandrade@ipen.br

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo obter propriedades mecânicas e elásticas de compósitos unidirecionais fabricados pelo processo de bobinamento filamentar, na forma de placas com diversas orientações do reforço. As placas foram fabricadas com fibra de carbono de alta resistência de 6000 filamentos e matriz epoxídica. Os exemplares para ensaio foram obtidos nas direções de 0°, 10°, 20°, 30°, 60°, 70°, 80° e 90° em relação à direção de 0° da fibra. Resultados mostram que para corpos-de-prova bobinados na direção 10° a tensão máxima média obtida foi de 855 MPa e o módulo de elasticidade médio de 136 GPa, enquanto que para corpos-de-prova bobinados na direção de 80°, a tensão máxima média foi de 68 MPa e módulo de elasticidade médio de 10 GPa. Os resultados obtidos indicam que as propriedades mecânicas e elásticas diminuem acentuadamente a partir da direção de 10°.

Palavras-chave: compósito polimérico, fibra de carbono, bobinamento filamentar, caracterização mecânica.

INTRODUÇÃO

A crescente utilização dos compósitos poliméricos ocasionou um grande avanço tecnológico em diversas áreas da engenharia, como por exemplo, na indústria aeroespacial, na automobilística, na náutica e na da construção civil. Os

compósitos são capazes de atender requisitos de projeto que muitas vezes não podem ser atendidos pelos materiais de engenharia tradicionalmente utilizados, como o aço e o alumínio. Elevada resistência específica, elevado módulo específico e ótima resistência química são atrativos que os compósitos poliméricos oferecem frente aos materiais metálicos. A capacidade de resistência mecânica do material está intimamente ligada ao reforço utilizado para fabricação do compósito, proporcionado pelo elevado desempenho que as fibras apresentam, bem como pela orientação que é dada ao mesmo na construção do material⁽¹⁾.

Por serem constituídos de fibra e de uma matriz polimérica, as propriedades dos compósitos são influenciadas pela constituição, distribuição e interação entre as matérias-primas, bem como, conforme salientado, pela orientação das fibras. Desta maneira, variando-se a quantidade ou percentual das matérias-primas constituintes ou a orientação das fibras, pode-se alcançar a resistência e a rigidez desejada para um determinado compósito⁽²⁾.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, o processo de fabricação utilizado foi o Bobinamento Filamentar ou “Filament Winding”. Este processo é empregado para a construção de placas ou cilindros nos quais reforços contínuos de carbono, impregnados com a matriz polimérica previamente ou durante o bobinamento, são depositados sobre um mandril rotatório fabricado em aço ou alumínio com um ótimo acabamento superficial⁽³⁾.

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foi utilizado reforço de fibra contínua de carbono de alta resistência mecânica de 6000 filamentos e matriz polimérica com resina epoxídica tipo diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), endurecedor à base de anidridos, e acelerador à base de amina (benzildimetilamina).

Um molde metálico com aquecimento interno foi utilizado durante o processo de fabricação das placas de compósito, conforme ilustra a Figura 1. Para permitir uma eficiente desmoldagem, antes do início do processo de fabricação, o molde metálico foi recoberto com um tecido impermeável adesivado.

Segundo a norma ASTM 3039⁽⁴⁾, corpos-de-prova na direção das fibras, isto é, 0°, devem ser fabricados com 1mm de espessura, enquanto que os fabricados na direção perpendicular às fibras, direção de 90°, é recomendada a espessura de 2mm. Deste modo, para ângulos denominados de baixos, isto é, 0°, 10°, 20° e 30°,

adotou-se a espessura sugerida pela norma para corpos-de-prova de 0°, ou seja, 1mm; enquanto que para corpos-de-prova com ângulos altos, 60°, 70°, 80° e 90° a espessura foi de 2mm.



Figura 1- Etapa do processo de bobinagem para fabricação das placas.

Na etapa de impregnação, no processo de bobinamento, a fibra passa sobre um tambor que está apoiado no recipiente que contém a matriz polimérica, conforme ilustrado na Figura 2. Para permitir uma impregnação adequada do fio, a matriz é mantida aquecida de modo a garantir uma viscosidade ideal.



Figura 2- Etapa de impregnação da fibra de carbono.

Após completado o número de camadas desejadas, o compósito era recoberto por um tecido desmoldante e o conjunto mandril-compósito removido da máquina bobinadeira. Para obter a espessura sugerida pela norma ASTM 3039⁽⁴⁾ o compósito era prensado em ambas as faces do mandril por placas de aço. A Figura

3 ilustra o posicionamento de uma das placas de prensagem. Após a colocação das placas de prensagem em ambas as faces do mandril, o conjunto era levado para a estufa para promover a cura da matriz polimérica.



Figura 3- Posicionamento da placa da prensagem.

Finalizada a cura, o compósito era removido do mandril, obtendo-se duas placas após o corte, conforme ilustra a Figura 4. Portanto, para cada processo de bobinamento filamental, foram produzidas 02 placas, cada par tendo um ângulo de bobinagem.

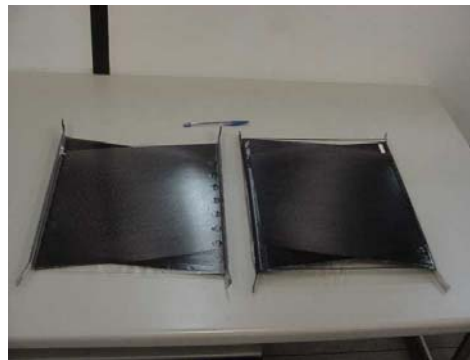


Figura 4- Placas após cura e corte.

Para fabricação das placas com a fibra bobinada em ângulo, a região de superposição das fibras, que dá a espessura sugerida pela norma, é limitada, sendo cada vez menor à medida que o ângulo de bobinagem aumenta. A figura 5 ilustra um conjunto da placas cortadas, podendo-se observar a redução da área útil em relação à figura 4. Após o corte para obter a área útil, foram obtidas a dureza Barcol e também feita metrologia em todas as placas a fim de se obter seu perfil de espessura.

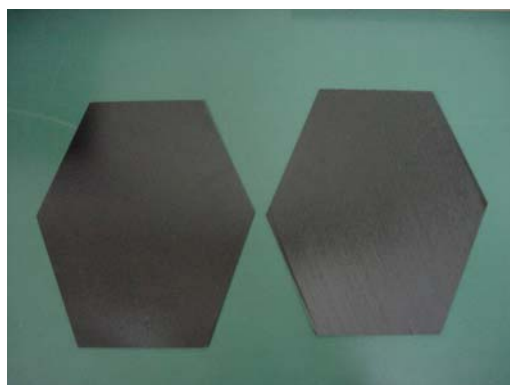
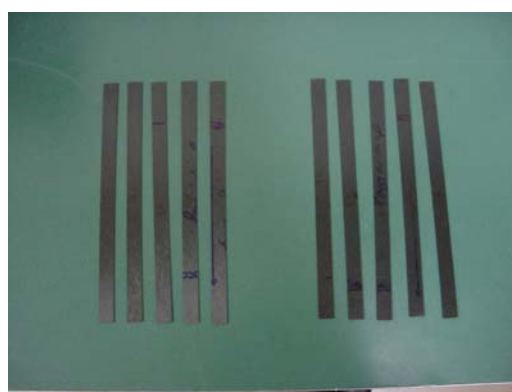


Figura 5- Placas após corte de área.

Os corpos-de-prova para ensaio de tração, conforme ilustração da Figura 6, eram cortados na direção de 0° utilizando um disco diamantado. Essa direção estabelece aquela em que as fibras estariam na direção do carregamento na máquina de tração, no entanto, internamente as fibras estão nos ângulos estabelecidos para este estudo. A Norma utilizada para se obter as dimensões dos corpos de prova (CP) foi a ASTM D3039⁽⁴⁾.



a)



b)

Figura 6- Corte de corpo de provas: a) vista geral da área de corte b) Dimensão final do corpo-de-prova.

A etapa final de preparação dos corpos-de-prova consistiu na colagem dos tabs, conforme ilustra a Figura 7, e medida das larguras e espessuras. A função dos tabs é proteger o compósito do aperto que é dado nas garras para fixação dos

corpos-de-prova à máquina de ensaio e melhorar a distribuição de tensão no compósito.

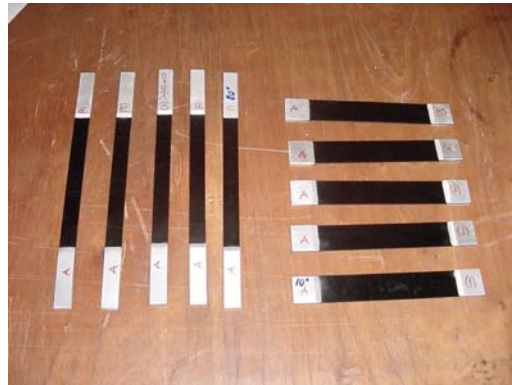


Figura 7- Corpos de provas prontos

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As espessuras médias e durezas Barcol das placas estão contidas na Tabela 1. Em relação às dimensões, pode-se notar que os resultados são compatíveis com as tolerâncias colocadas pela Norma, sendo os valores nominais de 1 mm para os ângulos baixos (0°, 10°, 20° e 30°) e de 2 mm para os ângulos altos (60°, 70°, 80° e 90°).

Tabela 1- Metrologia e dureza das placas.

| Ângulo de bobinagem | Espessura média (mm) | Dureza Barcol |
|---------------------|----------------------|---------------|
| 0° | 1,16 | 82,2 |
| 10° | 1,16 | 83,2 |
| 20° | 1,19 | 80,2 |
| 30° | 1,14 | 83,2 |
| 60° | 2,15 | 81,8 |
| 70° | 2,29 | 82,7 |
| 80° | 2,29 | 82,5 |
| 90° | 2,24 | 82,3 |

A Norma ASTM D3039 não estabelece as dimensões para a fabricação de corpos-de-prova conforme as proposta do presente estudo. Assim, para exemplares fabricados com ângulos baixos, adotou-se as dimensões correspondentes às dimensões de corpos-de-prova na direção de 0°, ou seja, comprimento de 250mm e

largura de 15mm. Para ângulos altos as dimensões correspondem à direção de 90°, com comprimento de 175mm e largura de 25mm. Esta distinção foi devido ao fato de que quanto mais próximo os filamentos estiverem da direção da carga aplicada (0°), maior resistência o material terá em relação àqueles que estão mais próximos da direção transversal ao carregamento (90°), denominados de ângulos altos.

A variação que o ângulo de bobinagem proporciona nas propriedades do material podem ser notadas nos gráficos das Figuras 8 e 9, ocorrendo quedas tanto da resistência quanto do módulo, sendo uma queda acentuada da resistência mesmo para ângulos próximos de 0°, como por exemplo, na direção de 10°.

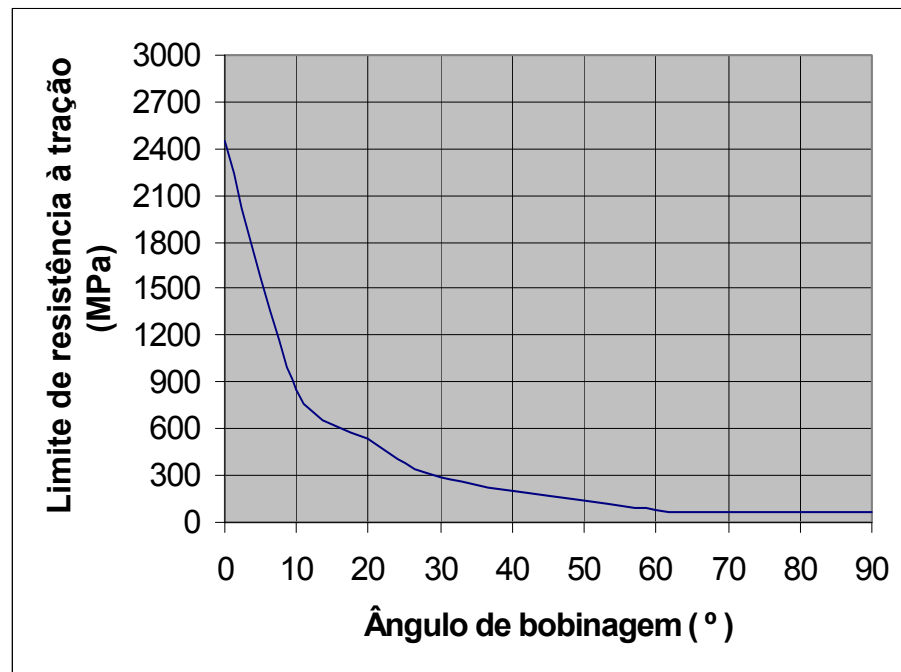


Figura 8- Resistência à tração em função do ângulo de bobinagem

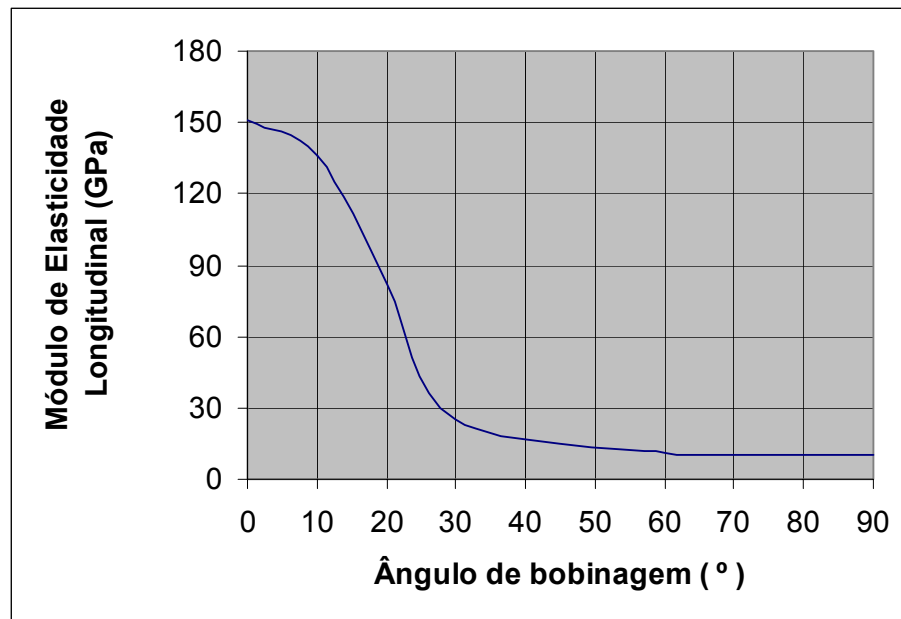


Figura 9- Módulo de Elasticidade em função do ângulo de bobinagem

Para avaliar o compósito das inúmeras placas fabricadas, foram determinadas as frações volumétricas de fibra, matriz e poros. Para isso, há necessidade de se obter as densidades e as frações de massa. Foram retiradas amostras das placas para serem obtidas essas propriedades físicas do compósito.

Para a determinação da densidade hidrostática, foi utilizada uma balança analítica e um sistema que permite o peso seco e submerso em água deionizada. Os resultados apresentados na Tabela 2 mostram uma boa regularidade da densidade para cada ângulo de bobinagem. As frações de massa foram obtidas por meio da queima em forno com atmosfera controlada com N₂ ultra puro, até 700° C.

Tabela 2- Densidades, temperaturas de transição vítrea e frações volumétricas.

| Ângulo de bobinagem | d (g/cm ³) | T _g (°C) | V _{fibra} (%) | V _{matriz} (%) | V _{vazios} (%) |
|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0° | 1,56 | 109 | 67,0 | 31,6 | 1,4 |
| 10° | 1,57 | 108 | 65,7 | 33,3 | 1,0 |
| 20° | 1,57 | 107 | 65,7 | 33,2 | 1,1 |
| 30° | 1,57 | 109 | 68,4 | 29,4 | 2,2 |
| 60° | 1,57 | 110 | 65,3 | 33,4 | 1,3 |
| 70° | 1,58 | 107 | 68,6 | 29,5 | 1,9 |
| 80° | 1,56 | 110 | 63,7 | 35,3 | 1,0 |
| 90° | 1,57 | 108 | 65,4 | 33,3 | 1,3 |

CONCLUSÕES

Os ensaios de tração apresentaram resultados que demonstraram uma forte dependência da resistência à tração dos corpos de prova em função do ângulo de bobinagem do reforço. Esta dependência é mais intensa para os ângulos baixos, ou seja, para aqueles corpos de prova nos quais as fibras estão mais próximas da direção do esforço.

Os resultados obtidos para os corpos de prova com ângulo de bobinagem alto, ou seja, 60°, 70°, 80° e 90°, mostram que a resistência mecânica é menos influenciada pela orientação do reforço, recaindo mais sobre a matriz a resistência do material. Isto possivelmente seja a razão de os valores de resistência obtidos para estes ângulos estarem próximos um dos outros.

REFERÊNCIAS

1. CHAWLA, K. K. **Composite materials: science and engineering**. Springer Verlag New York, Inc., USA, 1998. p. 3 – 72, 252 – 278.
2. TAN, S. C. **Stress Concentrations in Laminated Composites**. Technomic Publishing Company, 1994. p. 3 –53.
3. Peters, S. T., **Filament Winding Composite Structure Fabrication**, Sample, USA, 1989. p. 1-6.
4. ASTM D3039/D3039 M-00. **Standard Teste Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, 2000.

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF COMPOSITES POLIMÉRICOS BOBINADOS IN DIVERSE ORIENTATION OF THE REINFORCEMENT

ABSTRACT

The aim of this work is to obtain mechanical and elastic properties of unidirectional composites manufactured by the filament winding process. The plates were manufactured with diverse orientation of the reinforcement. The composites were manufactured with carbon fibers of high strength with 6000 filaments and an epoxy resin system as polymeric matrix. The coupons were manufactured in the directions of 0°, 10°, 20°, 30°, 60°, 70°, 80° e 90°, related to the 0° fibre direction. Results show

that coupons with the fiber in the direction 10° , the mean strength was 855 MPa and the mean module of elasticity was 136 GPa, whereas coupons in the direction of 80° the mean strength was 68 MPa and the mean module of elasticity was 10 GPa. The results obtained show that the strengths are strongly influenced by the orientation of the reinforcement.

Keywords: composites, carbon fiber, filament winding, mechanical characterization.