

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM VARIAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DO REFORÇO

E. da S. Leitão¹, G. Marinucci², O. de Carvalho¹
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242-Cidade Universitária-Butantã-SP
marinuci@ipen.br

¹Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo-

²Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN/CNEN-SP

Resumo

As vantagens proporcionadas pelos compósitos poliméricos quando comparadas aos principais materiais de engenharia têm contribuído para ampliar e expandir sua utilização, inclusive em aplicações antes reservada aos metais. Contudo, as propriedades mecânicas do material são fortemente dependentes da orientação das fibras em relação à direção do carregamento. Dados de propriedades na direção das fibras (0°) e transversal a elas (90°) são comumente encontrados na literatura, enquanto que nas demais direções estas são obtidas com uso de recursos computacionais utilizando conceitos como os da Teoria Clássica dos Laminados. O presente trabalho propõe determinar as propriedades mecânicas de compósitos de fibra de vidro e matriz de resina epóxi nas direções de 0° a 90°, com variação de 10 em 10°. Corpos-de-prova ensaiados em tração foram obtidos de placas fabricadas pelo processo de enrolamento filamentar. Os resultados mostraram que ocorreram variações significativas nas propriedades mecânicas, como resistência, módulo e coeficiente de Poisson, mesmo para pequenas mudanças do ângulo de bobinagem.

Palavras chave: compósitos, fibra de vidro, resina epóxi, placas unidirecionais, enrolamento filamentar, caracterização mecânica.

Introdução

A evolução alcançada pelos compósitos, traduzida pelo conhecimento das propriedades do material, bem como das matérias-primas contituíntes; processos de fabricação, mecanismos de falha e modelos confiáveis de análise de tensões e deformações, permitem que o material possa 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 e à fadiga são atrativos que os compósitos poliméricos oferecem frente aos materiais metálicos. Contudo, devido à característica anisotrópica do material, a capacidade de resistência mecânica está intimamente ligada à orientação do reforço, proporcionado pelo elevado

desempenho que as fibras apresentam, bem como pela orientação que é dada ao mesmo na construção do material e pela distribuição e interação entre a fibra e a matriz polimérica.

A crescente utilização dos compósitos poliméricos ocorre não só na indústria aeroespacial, automobilística, nuclear⁽¹⁾, bioengenharia, na área naval e náutica e equipamentos para a indústria química, mas também na indústria de construção civil. Karbhari⁽²⁾ relata índices crescentes de aplicação de compósitos poliméricos estruturais na construção civil, particularmente, no Japão. Conforme citação do autor, este fato se deve principalmente à alta incidência de abalos sísmicos e à atmosfera salina agressiva nesse país. Pontes, passarelas e reforço estrutural em edifícios históricos⁽³⁾ estão também em aplicações que utilizam compósitos poliméricos.

Nos compósitos, tanto resistência mecânica como rigidez podem ser alteradas em função do tipo e orientação do reforço e das proporções dos materiais constituintes na estrutura. Deste modo, torna-se importante conhecer as propriedades do compósito para atender uma aplicação de responsabilidade estrutural, inclusive aquelas em que as propriedades do compósito são determinadas em função do ângulo de laminação.

O presente trabalho apresenta um estudo de placas de compósito *angle-ply* utilizando reforço de fibra de vidro. As placas foram fabricadas pelo método de enrolamento filamental (*filament winding*) com ângulos de 0°, ±10°, ±20°, ±30°, ±60°, ±70°, ±80° e 90°, determinando-se as propriedades mecânicas dos compósitos.

Procedimento experimental

O presente estudo está votado para fabricação de placas de compósitos poliméricos com a fibra de vidro em orientações pré-estabelecidas. Deste modo, por se trabalhar com o reforço na forma de fibras contínuas (*roving*) e para garantir uma maior precisão no posicionamento das fibras sobre o mandril, o método de fabricação utilizado foi o enrolamento filamental.

Normalmente, este processo é empregado para a construção de estruturas cilíndricas, em que reforços contínuos de fibra de carbono, vidro ou aramida, impregnados com uma matriz polimérica, são depositados sobre um mandril fabricado em aço ou alumínio. O método geralmente empregado é o de bobinagem

cruzada, que é aquele em que cada camada depositada sobre o mandril representa a colocação simultânea de fibras em ângulos $+\theta$ e $-\theta$.

Para atender a proposta do presente trabalho de estudar compósitos *angle-ply* foi desenvolvido um processo em que as fibras são colocadas sobre o mandril (molde) camada a camada, denominado bobinagem por superposição de camadas⁽⁴⁾. Embora fabricadas pelo processo de enrolamento filamental, as placas simulam laminados que têm a configuração $[\pm\theta/-\theta]_n$, ou seja, camadas com ângulo positivo e outras com ângulo negativo. A figura 1 ilustra os processos de bobinagem cruzada e bobinagem por superposição de camadas. Assim, a vantagem proporcionada pelo método é de fabricar placas de compósitos *angle-ply* com elevada fração volumétrica de fibra e reduzido volume de vazios, o que de outra forma tornaria a tarefa difícil de modo a atender esses requisitos.

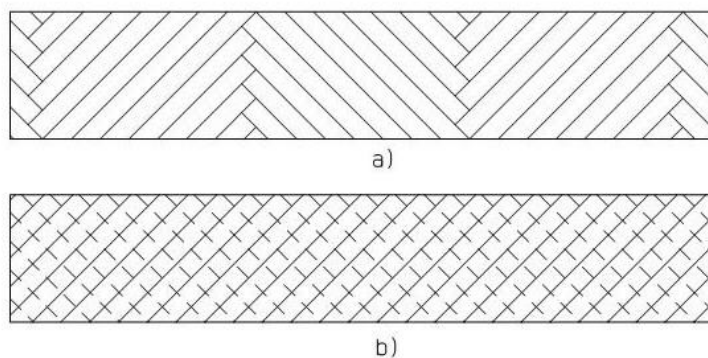


Figura 1- Seqüência do posicionamento do reforço na fabricação pelo processo de enrolamento filamental: a) bobinagem cruzada, b) bobinagem por superposição de camadas.

Laminados *angle-ply* são laminados balanceados consistindo de camadas posicionadas acima e abaixo do plano médio do laminado, sendo que o ângulo do reforço em cada lâmina apresenta a mesma magnitude, porém de sinal trocado, ou seja, $+\theta / -\theta$, onde θ é diferente de 0° ou 90° . O termo balanceado expressa que o laminado que possui uma camada a $-\theta$ em relação à linha do plano médio, deve possuir uma camada idêntica, ou seja, de mesmo material, porém posicionada à $+\theta$ em relação a essa mesma linha do plano médio.

Materiais e Métodos

Para fabricação das placas utilizou-se a fibra tipo E de 2000 filamentos, com tratamento para receber matriz polimérica com resina epóxi. A fibra foi fabricada pela Saint-Gobain Vetrotex para utilização em processos de bobinagem filamentar. A denominação de vidro tipo E origina-se de uma formulação para fabricação de artigos de vidro para a indústria de material elétrico, porém seu uso é freqüentemente associado a um tipo de fibra de vidro de alta resistência mecânica. A Figura.2 mostra um par de rocas de fibra de vidro tipo E utilizada no presente trabalho. As principais propriedades físicas da fibra de vidro tipo E estão indicadas na Tabela1.



Figura 2- Rocas de fibra de vidro tipo E.

Tabela 1- Propriedades físicas da fibra de vidro tipo E⁽⁵⁾.

massa específica	2,60 g/cm ³
módulo de elasticidade longitudinal	73 GPa
resistência à tração	2400 MPa
alongamento máximo	4,5 %
diâmetro do filamento	9 µm
número de filamentos	2000
densidade linear	1100 tex

A matriz para a fabricação do compósito foi formulada com resina epoxídica DGEBA (diglicidil éter de bisfenol A), endurecedor à base de anidrido e acelerador à base de amina (benzildimetilamina), na proporção de 100:100:0,5 partes em peso.

As placas para retiradas dos corpos-de-prova foram fabricadas pelo processo de enrolamento filamental, de acordo com os ângulos estabelecidos para o estudo. Após a bobinagem e cura, as placas foram cortadas para retirada das bordas e preparadas para o corte dos corpos-de-prova. A Fig. 3 ilustra duas placas para retirada de exemplares a 20° e 70°. De acordo com a norma ASTM D3039⁽⁶⁾, as dimensões são diferentes para cada uma das orientações, conforme representado na figura.

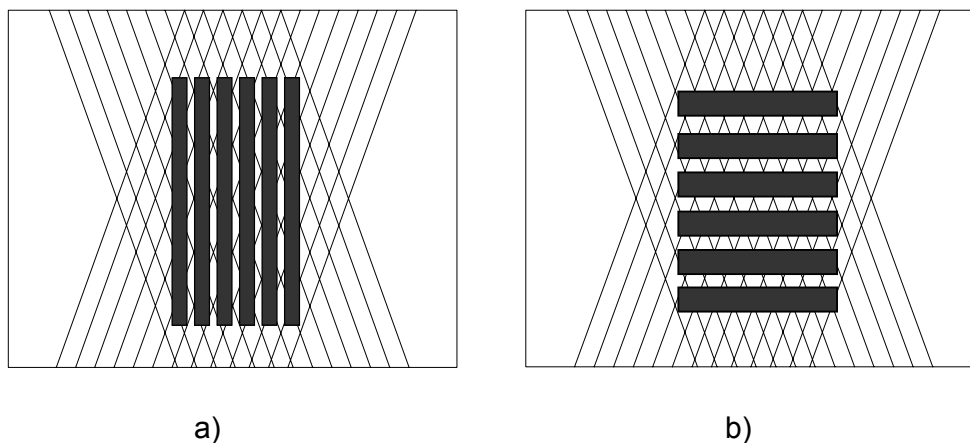


Figura 3- Ilustração das placas para retiradas de corpo-de-prova: a) 70° , b) 20°.

Resultados e Discussão

A Norma ASTM D3039 que orienta os procedimentos dos ensaios de tração, define as dimensões dos corpos-de-prova de compósitos com reforço bobinado em 0° e 90°, mas não estabelece claramente as dimensões para a fabricação de corpos-de-prova conforme a proposta do presente estudo, ou seja, para ângulos entre 0° e 90°. Assim, para exemplares fabricados com ângulos de 0°, ±10°, ±20° e ±30° adotou-se as dimensões correspondentes àquelas de corpos-de-prova na direção de 0°, ou seja, comprimento de 250 mm e largura de 15 mm. Para ângulos de bobinagem de ±60°, ±70°, ±80° e 90° as dimensões dos corpos-de-prova correspondem à direção de 90°, com comprimento de 175 mm e largura de 25 mm. Esta distinção foi devida à consideração que quanto mais próximos 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°).

Na Tabela 1 estão colocados os valores de tensão, módulo de elasticidade e coeficientes de Poisson do ensaio de tração, com os correspondentes gráficos nas Figuras 4 a 6. Foi constatado que uma variação de apenas $\pm 10^\circ$ na orientação da fibra em relação à direção do carregamento (0°) provoca uma queda de cerca de 37% na resistência. O módulo de elasticidade apresenta uma redução menos acentuada para a mesma variação de ângulo, ou seja, a queda é de apenas 2%.

Para ângulos de bobinagem de $\pm 60^\circ/\pm 70^\circ/\pm 80^\circ/90^\circ$ não foi verificada variação significativa das propriedades. Os valores obtidos de resistência e módulo de elasticidade apresentam valores equivalentes ao da matriz polimérica utilizando resina epoxídica.

As placas apresentaram fração volumétrica média de fibra de 65% e fração média de poros (vazios) de 2,5 %, obtidas por calcinação⁽⁷⁾.

Tabela 2- Propriedades mecânicas experimentais de compósitos de fibra de vidro em função do ângulo de bobinagem.

Ângulo de bobinagem	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo d elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
0°	1369 ± 35	50 ± 1	$0,31 \pm 0,03$
$\pm 10^\circ$	508 ± 25	47 ± 2	$0,36 \pm 0,02$
$\pm 20^\circ$	330 ± 6	36 ± 2	$0,58 \pm 0,01$
$\pm 30^\circ$	219 ± 9	24 ± 1	$0,77 \pm 0,03$
$\pm 60^\circ$	62 ± 3	15 ± 1	$0,37 \pm 0,02$
$\pm 70^\circ$	56 ± 6	16 ± 1	$0,22 \pm 0,01$
$\pm 80^\circ$	46 ± 6	16 ± 1	$0,13 \pm 0,01$
90°	40 ± 3	17 ± 1	$0,11 \pm 0,01$

A variação que o ângulo de bobinagem proporciona nas propriedades do material está mostrada nos gráficos das Figuras 4., 5 e 6 para compósitos de fibra de vidro, respectivamente para resistência, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, lembrando que o compósito foi fabricado com superposição de camadas com ângulos $[+\theta/-\theta]_n$ (angle-ply). Resultados de laminados *off-axis* (laminados com ângulo $[+\theta]_n$ ou $[-\theta]_n$) encontrados na literatura⁽⁸⁾ mostram resultados diferentes dos obtidos de laminados *angle-ply*.

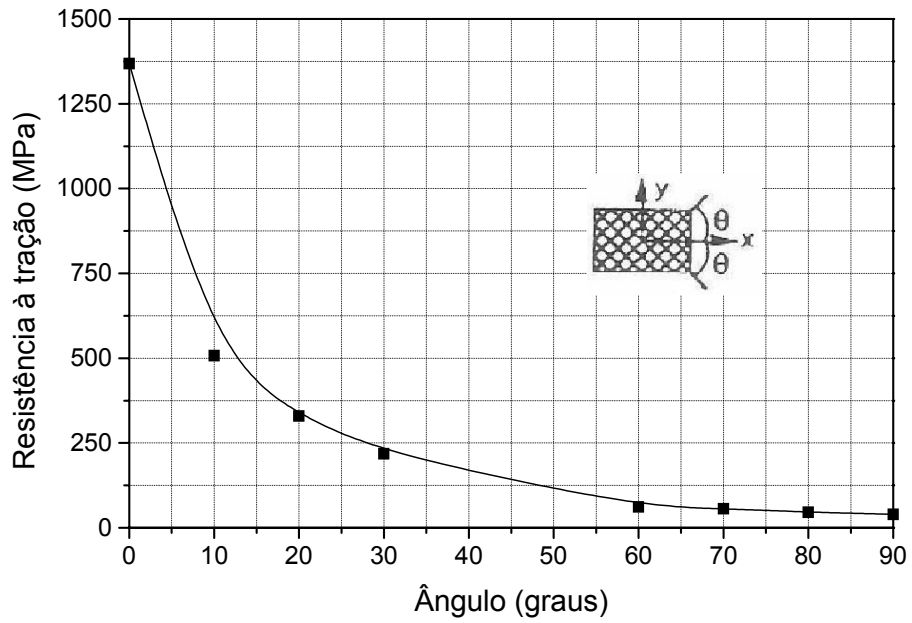


Figura 4- Resistência à tração (σ_x) em função do ângulo de bobinagem para compósitos *angle-ply* de fibra de vidro e matriz epoxídica.

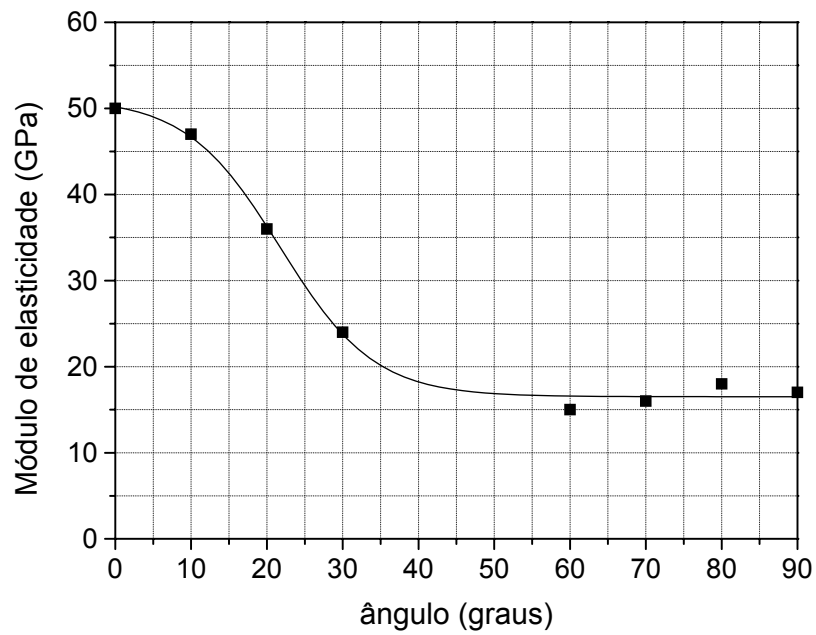


Figura 5- Módulo de elasticidade (E_x) em função do ângulo de bobinagem para compósitos *angle-ply* de fibra de vidro e matriz epoxídica.

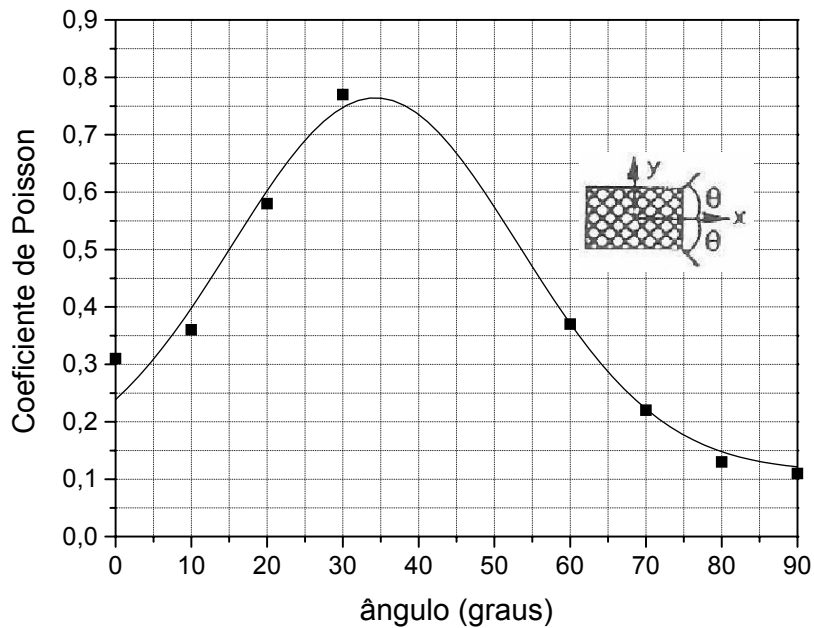


Figura 6- Coeficiente de Poisson (ν_{xy}) em função do ângulo de bobinagem para compósitos *angle-ply* de fibra de vidro e matriz epoxídica.

Conclusões

Os ensaios de tração apresentaram resultados de resistência e módulo de elasticidade que demonstraram uma forte dependência da orientação do reforço. Esta dependência é mais acentuada para os ângulos 0° , $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$ e $\pm 30^\circ$, ou seja, para aqueles corpos-de-prova nos quais as fibras estão mais próximas da direção do carregamento.

Os resultados obtidos para os corpos-de-prova com ângulo de bobinagem de $\pm 60^\circ$, $\pm 70^\circ$, $\pm 80^\circ$ e 90° , mostram que a resistência mecânica do compósito é menos influenciada pela orientação do reforço, recaindo mais sobre a matriz a resistência do material. Esta constatação advém do fato que para ângulos de bobinagem acima de 60° em relação à direção do carregamento a resistência da fibra é muito baixa, contribuindo muito pouco para a melhoria do desempenho do compósito.

Agradecimentos

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo pelo suporte técnico.

À Saint-Gobain-Vetrotex pelo fornecimento da fibra de vidro.

Referências Bibliográficas

- 1.Red, C. Composites and future nuclear power. **Composites Manufacturing**. March, p. 24-27, 2006.
- 2.Karbhari, V. M. Use of Composites Materials in Civil Infrastructure in Japan. **International Technology Research Institute**, 1998, USA.
- 3.Jacob, A. Composites offer help in the conservation of historic building. **Reinforced Plastics** February, p. 30-34, 2007.
4. Marinucci, G. **Desenvolvimento, fabricação e análise de fratura de cilindros de fibra de carbono colapsados por pressão interna**. 2001, 186p. Tese. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. IPEN-CNEN-SP.
5. Saint-Gobain/Vetrotex. **Catálogo do fabricante**. s/data, Brasil.
6. Standard Test Methods for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. **ASTM Standards, D3039**. 2000.
7. Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins. **ASTM Standards, D 2584**, 2002
8. Daniel, I. M. ; Ishai, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**, Oxford University Press, 2006.

MECHANICAL BEHAVIOR OF POLYMERIC COMPOSITES WITH THE REINFORCEMENT AT DIFFERENT ORIENTATION

ABSTRACT

The advantages provided by the polymeric composites when compared to the main engineering materials have contributed to the increase and expansion of its use, including applications that were formerly only used on metals. However, the mechanical properties of the composites are strongly dependent of the fiber orientation in relation to the loading direction. Data of properties in the fibers direction (0°) and transverse to them (90°) are commonly found in the literature, while in the other directions these are obtained by using computation resources concepts as the one of the Classical Laminate Theory. The present work proposes to determine the mechanical properties of glass fiber/epoxy resin composite from 0° to 90° , with fiber orientation of 10 in 10 degrees. Specimens were obtained from plates manufactured by the filament winding process and they were loaded in tension. The results showed that there were significant variation in the mechanical properties, as strength, modulus of Young and Poisson ratio when fiber orientation is changed, even for a small one.

Key-words: composites, glass fiber, epoxy resin, unidirectional plates, filament winding, mechanical characterization.