INFLUÊNCIA DO EMPILHAMENTO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE LAMINADOS E-GLASS/EPÓXI SOB CARREGAMENTOS MULTIAXIAIS

Daniel De Oliveira Pastick de Carvalho, Luiz Fernando Pimenta Gonçalves, Erika Peterson Gonçalves.

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, Pastickdaniel1@gmail.com

Resumo

Este trabalho investiga o comportamento mecânico de laminados compósitos de fibra de vidro e matriz epoxídica (E-Glass/Epóxi) submetidos a condições de carregamento combinado. O estudo avalia o desempenho estrutural de diferentes configurações de empilhamento quando submetidas simultaneamente a esforços de tração e torção, bem como de flexão e torção. Para isso, são realizadas simulações numéricas pelo método dos elementos finitos utilizando o software ANSYS, sendo a integridade estrutural dos laminados avaliada com base no critério de falha de Tsai-Wu. O objetivo é analisar a influência da orientação e da sequência de empilhamento das fibras na distribuição das tensões e na probabilidade de falha sob condições de carregamento multiaxial. Os resultados contribuem para a compreensão do comportamento de laminados compósitos em condições mais representativas das solicitações encontradas em aplicações estruturais, como componentes aeronáuticos submetidos à atuação simultânea de diferentes esforços.

Palavras-chave: *Materiais compósitos. Laminados de fibra de vidro. Carregamentos combinados.*

Área do Conhecimento: ENGENHARIAS

Introdução

O estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos é um processo composto por etapas sequenciais (Daniel, 2007). Inicialmente, a avaliação do material sob carregamentos isolados de tração, flexão ou torção constitui uma etapa fundamental, pois permite compreender de forma individualizada a influência da orientação das fibras e estabelecer os limites de resistência de cada configuração de empilhamento. No entanto, na prática, as estruturas reais raramente são solicitadas por esforços isolados (Soden et al., 1998). Componentes como longarinas de asa de aeronaves ou aerofólios de veículos de competição estão permanentemente submetidos à ação simultânea de diferentes esforços, como tração e torção ou flexão e torção (Naik; Shembekar, 1992). Nesses casos, a interação entre tensões normais e tensões de cisalhamento altera o comportamento do laminado de maneira que não pode ser prevista apenas a partir de análises isoladas. Portanto, para compreender o desempenho real do material em condições próximas às de utilização efetiva, torna-se necessário estudar o comportamento dos laminados sob carregamentos combinados (Philippidis; Vassilopoulos, 1999).

O presente trabalho tem como objetivo aproximar as condições de ensaio da realidade operacional das estruturas para isso visa investigar o comportamento estrutural de diferentes arquiteturas submetidas a carregamentos combinados, especificamente a aplicação simultânea de tração e torção, bem como de flexão e torção. Dessa forma, busca-se compreender os efeitos da interação entre tensões normais e de cisalhamento sobre a rigidez, a resistência e os modos de falha dos laminados, contribuindo para a seleção de arquiteturas mais adequadas a aplicações estruturais reais.

Metodologia

As análises foram conduzidas por meio de simulações em elementos finitos no software ANSYS, com a integridade estrutural avaliada pelo critério de falha de Tsai-Wu.

Para a realização deste estudo, utilizou-se os módulos dedicados à modelagem geométrica, à configuração de propriedades de materiais compósitos e à análise estrutural estática do software ANSYS.

.

As três arquiteturas de fibras aqui utilizadas foram previamente testadas e apresentaram índice de falha de Tsai-Wu inferior a 1 sob carregamentos isolados, ou seja, aquelas que demonstraram integridade estrutural adequada nas condições de tração, flexão e torção aplicadas separadamente. As orientações de cada uma das arquiteturas estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Empilhamento dos Corpos de Prova

Corpos de prova	**Sequência de empilhamento**
CP1	[0/0/0/0]
CP4	[0/45/-45/0]
CP5	[0/90/90/0]

Fonte: Os Autores

Foram utilizadas duas geometrias distintas. Para as simulações de tração combinada com torção, adotou-se a geometria recomendada pela norma ASTM D3039 (ASTM International, 2017), com dimensões de 25 mm de largura por 250 mm de comprimento. Nesses ensaios, os corpos de prova foram engastados em uma das extremidades e submetidos simultaneamente a uma carga axial de 2000 N e a um momento torçor de 2 N.m na extremidade livre. Para os ensaios de flexão combinada com torção, utilizou-se a geometria da norma ASTM D790 (ASTM International, 2017), com corpos de prova de 13 mm de largura por 90 mm de comprimento, mantendo a relação vão/espessura adequada para garantir flexão pura. Nessas simulações, foi aplicada uma carga transversal de 200 N combinada com o momento torçor de 2 N.m. Todas as análises foram realizadas utilizando o critério de falha de Tsai-Wu para avaliar a integridade estrutural dos laminados sob os carregamentos combinados (Tsai; Wu, 1971).

Para a simulação numérica, empregou-se fibra de vidro E-Glass e resina epóxi como matriz. Os materiais foram selecionados diretamente da biblioteca do módulo *Engineering Data* disponível no software ANSYS. As propriedades mecânicas anisotrópicas do compósito laminado foram definidas utilizando os dados do próprio software, complementados por valores obtidos na literatura técnica para laminados de E-Glass/epóxi (ISO, 1999).

Após a conclusão da modelagem geométrica, a geração da malha de elementos finitos foi realizada no módulo *Mechanical*. Foram utilizados elementos adequados para compósitos laminados, com refinamento localizado nas regiões críticas de concentração de tensões, especialmente nas áreas de aplicação de carga e fixação. Na configuração da malha priorizou-se a qualidade dos elementos, visando maior precisão e estabilidade numérica da análise. Como apresentados na Tabela 2 os resultados obtidos foram satisfatórios, alcançando uma qualidade média de malha de 0,81 para a geometria do corpo de prova de tração e torção e de 0,91 para a geometria do corpo de prova de flexão e torção.

Tabela 2 - Qualidade de malha de elementos finitos

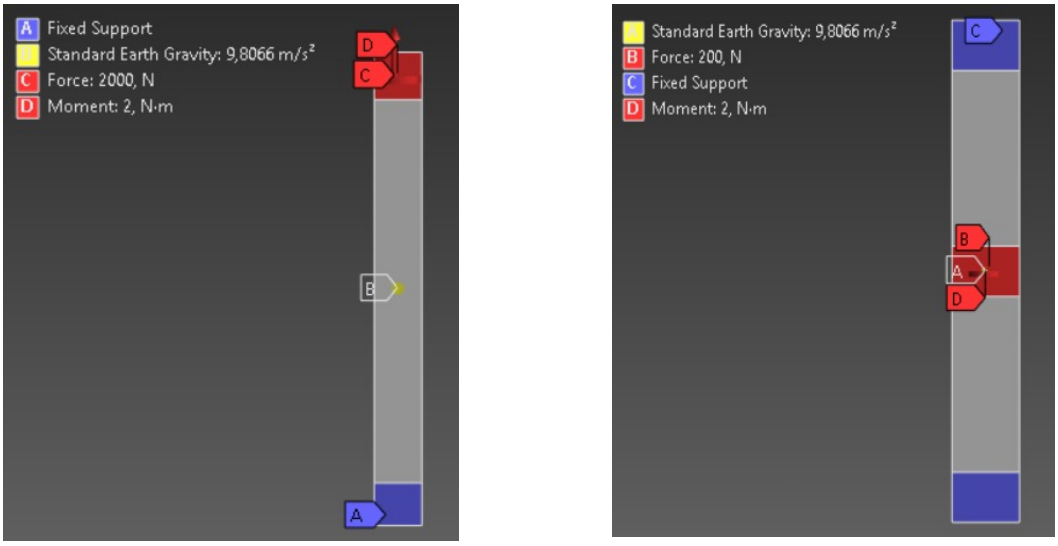
Propriedades	**Qualidade de Malha**	**Número de Nós**	**Número de Elementos**
Corpo de Prova Tração	0,81	6987	6800
Corpo de Prova Flexão	0,91	1035	952

Fonte: Os Autores

Após a definição da malha, o modelo foi importado para o módulo ANSYS *Composite Pre Post* (ACP). Neste ambiente, foram definidas as propriedades do laminado compósito, tais como espessura total de 2 mm, quantidade de camadas e orientação das fibras em cada corpo de prova. As sequências de empilhamento analisadas, responsáveis por definir as orientações das fibras no material compósito.

As condições de contorno dos corpos de prova foram definidas pela fixação de uma de suas extremidades. Na extremidade livre, aplicou-se os carregamentos de forma combinada. Conforme apresentado na Figura 2 A, para os ensaios de tração combinada com torção, foi aplicada uma carga axial de 2000 N juntamente com um momento torçor de 2 N.m. conforme apresentado na Figura 2B, para os ensaios de flexão combinada com torção, foi aplicada uma carga transversal de 200 N juntamente com o mesmo momento torçor de 2 N.m. Os valores de carga foram selecionados com base nos estudos preliminares que resultaram em índices de falha de Tsai-Wu inferiores a 1. A seleção desses valores baseou-se não apenas no critério de garantir nível de deformação adequado para a comparação do comportamento mecânico entre as distintas configurações, mas também na necessidade de aproximar as condições de ensaio de cenários reais de forma conservadora.

Figura 2 - Condições de Contorno



A B

Fonte: Os autores

Após a definição completa do modelo, as simulações foram realizadas no módulo *Static Structural*. Para avaliar a integridade estrutural dos laminados, continuou-se utilizando do critério de falha de Tsai-Wu. Foram analisados os campos de tensão e deformação total para cada configuração de empilhamento, permitindo uma comparação detalhada da influência da orientação das fibras no desempenho mecânico dos laminados sob carregamentos combinados.

Resultados

Com o intuito de facilitar a comparação e a análise dos dados, os resultados de cada simulação foram compilados em tabelas. A Tabela 3 apresenta os dados obtidos a partir dos ensaios de tração e torção, enquanto a Tabela 4 exibe os resultados correspondentes aos ensaios de flexão e torção. Em ambas, destacam-se parâmetros como os níveis de deformação, as tensões máximas suportadas e a integridade do material, avaliada segundo o critério de falha adotado neste estudo.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de tração e torção

Corpos de Prova	Deformação(mm)	Tensão Máxima (MPa)	Índice de Tsai-wu
CP1	84,28	434,62	0,81
CP4	89,43	487,82	1,22
CP5	91,44	486,03	1,87

Fonte: Os Autores

Tabela 4 - Resultados do ensaio de flexão e torção

Corpos de Prova	Deformação(mm)	Tensão Máxima (MPa)	Índice de Tsai-wu
CP1	2,04	406,82	0,74
CP4	2,07	414,65	1,21
CP5	2,18	437,84	1,46

Fonte: Os Autores

Discussão

Avaliando os resultados obtidos através das análises sob esforços combinados de tração e torção, observou-se uma clara superioridade do corpo de prova CP1 em relação aos demais. O CP1 foi o único modelo a manter um Índice de Falha inferior a 1, garantindo a integridade estrutural sob as cargas aplicadas. Em contrapartida, embora o CP4 tenha apresentado o maior pico de Tensão Principal Máxima, esse valor resultou em um critério de falha superior ao permitido, indicando o colapso da peça. O pior desempenho, no entanto, foi o do modelo CP 5, que apresentou a resposta mecânica mais desfavorável do estudo: além de sofrer a maior deformação, atingiu o Índice de Falha mais elevado,

evidenciando sua total inadequação para suportar os esforços exigidos. Deste modo, a eficiência do CP1 é reforçada não apenas pela resistência, mas também pela sua menor deformação total, demonstrando uma rigidez global significativamente superior quando comparado aos modelos CP4 e CP5 (Shokrieh; Lessard, 2000).

O CP1 foi a arquitetura que apresentou melhor desempenho em esforços combinados, sendo o único a apresentar um resultado satisfatório na análise de Tsai-wu, porém é interessante ressaltar que o CP4 apresentou o maior pico de tensão máxima suportada, demonstrando uma boa distribuição de forças entre suas camadas, uma vez que as lâminas anguladas a ±45° atuam de forma altamente eficiente na transferência dos esforços de cisalhamento gerados pela torção, equilibrando as tensões internas do laminado (HYER, 1998).

Avaliando os resultados obtidos nos testes de flexão, nota-se novamente a superioridade do CP1 em relação aos demais no que diz respeito ao critério de falha. Como evidenciado na tabela, este foi o único corpo de prova a manter o índice de Tsai-Wu dentro do limite seguro, suportando os esforços submetidos sem apresentar comprometimento estrutural. Em contrapartida, os corpos de prova CP4 e CP5 apresentam como vantagem a capacidade de suportar níveis de tensão máxima mais elevados. No entanto, essa característica traduz-se em uma desvantagem crítica: ambos ultrapassam o limite de falha estipulado, além de sofrerem maiores níveis de deformação geométrica, o que inviabiliza suas aplicações sob estas condições de carregamento.

Ao observar os resultados do teste de flexão e torção observa-se-se também uma vantagem do CP1 em relação aos demais, além de um comportamento similar em relação às tensões suportadas, desta vez o CP5 destacou-se com a maior tensão máxima suportada, mas assim como o CP4 em ambos os casos os Corpos de prova 5 e 4 não atenderam ao critério necessário do TSai-wu, devido à sobrecarga na matriz gerada pela falta de fibras anguladas (MALLICK, 2007).

Conclusão

Após a análise e tratamento de todos os dados, foi possível observar grandes vantagens e desvantagens em cada empilhamento de fibra. Não existe uma configuração ideal universal, que seja a mais adequada para todos os casos, e sim que se é necessário um estudo detalhado de forças exercidas, para assim uma melhor escolha de um empilhamento adequado.

O CP1 consolida-se como a configuração mais confiável e equilibrada para o cenário de esforços multiaxiais avaliado neste estudo. Sua capacidade de manter a integridade estrutural em ambas as simulações comprova que sua orientação geométrica lidou de forma mais eficiente com a combinação complexa de cargas.

Fica evidente, portanto, que a otimização de projetos estruturais envolvendo materiais compósitos exige uma distribuição estratégica das orientações das fibras, explorando a anisotropia intrínseca do material para adequar o reforço estrutural de maneira customizada às exigências específicas e aos campos de tensão de cada aplicação.

Referências

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3039/D3039M-17: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D790-17: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken, 2017.

DANIEL, I. M. Failure of composite materials. Strain, v. 43, n. 1, p. 4-12, 2007.

HYER, M. W. Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials. New York: McGraw-Hill, 1998.

ISO. ISO 15310:1999: Fibre-reinforced plastic composites Determination of the in-plane shear modulus by the plate twist method. 1999.

MALLICK, P. K. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

NAIK, N. K.; SHEMBEKAR, P. S. Elastic behavior of woven fabric composites: I. Lamina analysis. Journal of Composite Materials, v. 26, n. 15, p. 2196-2225, 1992.

PHILIPPIDIS, T. P.; VASSILOPOULOS, A. P. Fatigue Strength Prediction under Multiaxial Stress. Journal of Composite Materials, v. 33, n. 17, p. 1578-1599, 1999. DOI: 10.1177/002199839903301701.

SHOKRIEH, M. M.; LESSARD, L. B. Progressive fatigue damage modeling of composite materials, Part I: Modeling. Journal of Composite Materials, v. 34, n. 13, p. 1056-1080, 2000.

SODEN, P. D.; HINTON, M. J.; KADDOUR, A. S. Lamina properties, lay-up configurations and loading conditions for a range of fibre-reinforced composite laminates. Composites Science and Technology, v. 58, n. 7, p. 1011-1022, 1998.

TSAI, S. W.; WU, E. M. A general theory of strength for anisotropic materials. Journal of Composite Materials, v. 5, n. 1, p. 58-80, 1971.