

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE COMPÓSITOS CARBONO-FENÓLICOS E CARBONO/BISMALEIMIDA FABRICADOS POR BRAIDING

Vitor Hugo P. S. Almeida¹ (IC), Renata Neves Penha (PQ)¹

¹Instituto de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: *braiding*, célula unitária, compósitos, elementos finitos.

Introdução

A evolução tecnológica traz consigo solicitações de melhores qualidades, menores custos, dentre outras características. Tal situação nos leva sempre ao desenvolvimento de materiais novos que possuem excelentes propriedades [1]. Dentre esses processos, o processo de *braiding* consiste no entrelaçamento de fios de fibra que dão origem a um tecido 3D. Os materiais compósitos fabricados a partir desse processo apresentam boas características mecânicas, como resistência ao impacto e resistência à fadiga, que superam as deficiências dos laminados tradicionais, como baixa resistência interlaminar e uma fácil delaminação [2].

Os compósitos poliméricos são constituídos por duas fases: matriz e fibra. A matriz geralmente consiste em uma resina termorrígida, como a resina fenólica e a de bismaleimida (BMI) [3]. Ambas são utilizadas nas mais diversas aplicações de alto desempenho em altas temperaturas com excelentes propriedades mecânicas e boa tolerância à danos [4, 5].

No caso da fibra, o reforço de fibra de carbono demonstra um grande potencial atrelado à sua baixa densidade, elevada resistência mecânica e um alto módulo de elasticidade, além de uma deformação reduzida que esses materiais sofrem, sendo predominantemente usados em compósitos estruturais [6].

Este trabalho traz um estudo sobre os compósitos carbono/resina fenólica e carbono/BMI, fabricados por *braiding*. Para isso, foram realizadas análises mecânicas para os compósitos com os programas *Altair ESAComp*, utilizando a teoria clássica do laminado (TLC), e *Altair Multiscale Designer*, utilizando o conceito de célula unitária. O objetivo é avaliar o efeito do ângulo de entrançamento nas propriedades de tração e flexão. Por possuir uma geometria complexa, devido ao entrelaçamento dos fios, os compósitos trançados precisam de um modelo confiável para simular suas estruturas reais e prever suas propriedades mecânicas. Assim, por meio da comparação entre os programas, é possível analisar a viabilidade de cada método para simulação de compósitos fabricados por *braiding*.

Metodologia

Primeiramente, realizou-se o estudo das propriedades mecânicas dos compósitos carbono-fenólicos no *Altair ESAComp*, utilizando dois laminados da base de dados do programa, que serão denominados como G 803 e G 1051 neste trabalho, a fim de analisar e comparar as propriedades de cada um. A Tabela 1 mostra os valores das propriedades dos dois materiais.

Tabela 1 – Propriedades das amostras G803 e G1051

Propriedades	G 803	G 1051
Espessura da camada (mm)	0,2874	0,1849
Massa por unidade de área (g/m ²)	464	300,278
Densidade (g/m ³)	1,615	1,624
Volume de fibra (%)	57	60
Direcionalidade da camada	50/50	50/50
Módulo de elasticidade E ₁ (GPa)	58	70
Módulo de elasticidade E ₃ (GPa)	10	10
Módulo de cisalhamento G ₁₂ (GPa)	5	5
Módulo de cisalhamento G ₂₃ (GPa)	4,5	4,5
Coefficiente de Poisson ν_{12}	0,05	0,05
Coefficiente de Poisson ν_{23}	0,35	0,35

Fonte: [7]

Além disso, foi utilizado também um compósito carbono/BMI, retirado do banco de dados do programa, a fim de comparar suas propriedades com os valores obtidos pelo método da célula unitária. A Tabela 2 detalha as propriedades do compósito estudado.

Tabela 2 – Propriedades do compósito carbono/BMI

Propriedades	Carbono/BMI
Espessura da camada (mm)	0,212
Massa por unidade de área (g/m ²)	322,24
Densidade (g/m ³)	1,520
Volume de fibra (%)	51
Direcionalidade da camada	50/50
Módulo de elasticidade E ₁ (GPa)	57,1
Módulo de elasticidade E ₃ (GPa)	10
Módulo de cisalhamento G ₁₂ (GPa)	4,5
Módulo de cisalhamento G ₂₃ (GPa)	4
Coefficiente de Poisson ν_{12}	0,05
Coefficiente de Poisson ν_{23}	0,35

Fonte: [7]

Para ambos os laminados, as disposições de camadas são as mesmas, assim como os carregamentos de flexão em 4 pontos, momento resultante $M_x = 2500$ Nm/m, e força de cisalhamento transversal resultante $Q_x = 25000$ N/m. A Figura 1 fornece a configuração do laminado para ambas as amostras.

Figura 1 – Disposição de camadas dos laminados

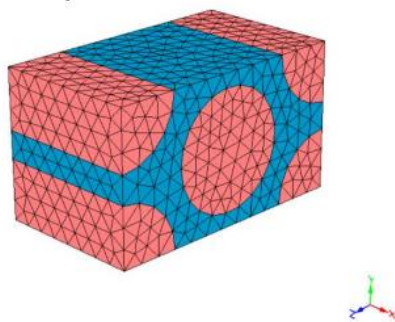


Fonte: Autoral

A partir do programa *Altair Multiscale Designer* foi possível construir uma célula unitária do compósito carbono/BMI fabricado por *braiding*, a partir das propriedades adotadas para esse material.

Para definir o modelo da célula unitária, adotou-se um modelo de fibras com configuração contínua uni-hexagonal, com a fração volumétrica de 60% de fibra. O esquema da célula unitária pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Representação do modelo de célula unitária adotado



Fonte: Autoral

Após definido o modelo, realizou-se a caracterização linear do material. Para a fase 1, matriz, foi adotado a resina de BMI. A Tabela 3 apresenta as propriedades para a resina BMI.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas da resina de BMI

Propriedades	Valores
Módulo de elasticidade (GPa)	4,49
Densidade (g/m ³)	1,25
Coefficiente de Poisson	0,34
Coefficiente de expansão térmica (°C ⁻¹)	5,2 . 10 ⁻⁵

Fonte: Autoral

Para a fase 2, de fibra, foi utilizado a fibra de carbono de alta resistência, HS, cujas propriedades estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas da fibra de carbono

HS	
Propriedades	Valores
Módulo de elasticidade E_1 (GPa)	227,5
Módulo de elasticidade E_2 (GPa)	16,4
Densidade (g/m ³)	1,79
Coefficiente de Poisson	0,25
Coefficiente de expansão térmica (°C ⁻¹)	1,08 . 10 ⁻⁵

Fonte: Autoral

Para simular a configuração do trançado, foram utilizadas apenas duas camadas, com espessuras 0,3 mm cada. Os ângulos do laminados analisados foram de [35/-35]°, [40/-40]°, [45/-45]°, [50/-50]° e [55/-55]°.

Partindo para as simulações de ensaios mecânicos, foram realizados os ensaios de tração e flexão em 4 pontos. Para o ensaio de tração, a máxima deformação estipulada foi de 0,03 mm. O ensaio de flexão seguiu a norma ASTM D6272 [8], o corpo de prova possui uma largura de 12 mm, vão de 40 mm, distância entre as cargas aplicadas de 20 mm, estipulando o valor de 2 mm para a máxima deflexão. O tamanho da malha foi de 1 mm para ambos.

Para o controle do programa, foram usados o valor máximo de saídas como 400, parada automática de perda de carga em 20% e número de tópicos em 8, além dos parâmetros de 15 iterações, uma tolerância relativa variando de 10⁻³ a 10⁻⁶, e uma tolerância absoluta variando de 10⁻⁴ a 10⁻⁸.

Com todos estes dados, foi possível analisar os gráficos de tensão x deformação e força x deslocamento dos ensaios realizados, obtendo no ensaio de tração o módulo elástico, a máxima tensão e a deformação, e no ensaio de flexão a força máxima e o deslocamento dos compósitos Carbono/BMI, que simulam os compósitos carbono-fenólicos estudados.

Para calcular a tensão de flexão para cada ensaio de flexão de 4 pontos, foi utilizado a Equação 1.

$$\sigma_f = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (1)$$

Sendo que, conforme as especificações citadas, a altura (h) vale 0,6 mm, a base (b) vale 12 mm, e a distância entre o apoio e a carga (a) 10mm.

Resultados e discussão

Com a caracterização linear do material, a partir do modelo da célula unitária, obtém-se as informações para o compósito homogeneizado de carbono/BMI, listadas na Tabela 5.

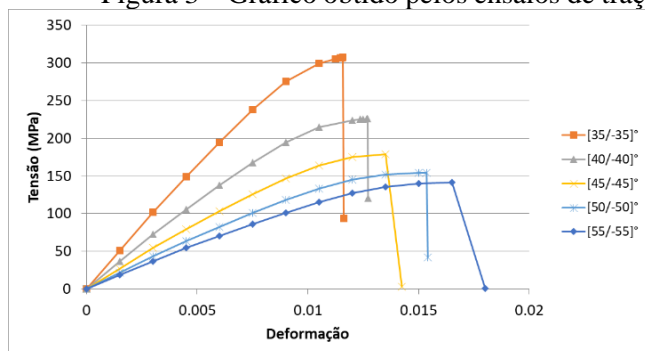
Tabela 5 – Propriedades do compósito homogeneizado de carbono/bismaleimida

Propriedades	Valores
Módulo de elasticidade E_x (GPa)	18,255
Módulo de elasticidade E_z (GPa)	10,699
Módulo de cisalhamento G_{xy} (GPa)	35,812
Módulo de cisalhamento G_{yz} (GPa)	4,182
Coefficiente de Poisson ν_{xy}	0,764
Coefficiente de Poisson ν_{yz}	0,087
Densidade (g/cm^3)	1,571

Fonte: Autoral

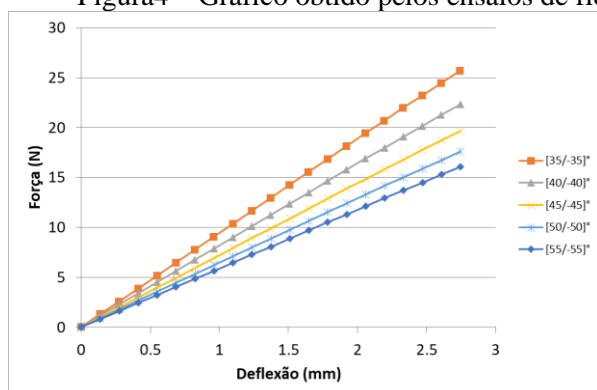
As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, o gráfico de Tensão-Deformação e Força-Deflexão, para os 5 sistemas de angulações diferentes. Nele, observa-se que o trançado com sistema $[35^\circ/-35^\circ]$ foi o que apresentou uma maior resistência, apresentando um maior módulo de elasticidade, e obtendo uma menor deformação. Além disso, no ensaio de flexão em 4 pontos, foi o que apresentou maior resistência e uma menor deflexão. Em contrapartida, o laminado com conjunto $[55^\circ/-55^\circ]$, obteve o menor módulo de elasticidade e maiores deformação e deflexão.

Figura 3 – Gráfico obtido pelos ensaios de tração



Fonte: Autoral

Figura 4 – Gráfico obtido pelos ensaios de flexão



Fonte: Autoral

Com os dados obtidos nos ensaios para cada conjunto, e utilizando a Equação 1 para obter a tensão de

flexão máxima para cada um, os resultados foram comparados com o auxílio da Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas conforme a variação do ângulo de entrelaçamento

Conjunto	E (GPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	ϵ	σ_f (MPa)	δ (mm)
$[35/-35]^\circ$	33,85	306,95	0,0114	178,31	2,7418
$[40/-40]^\circ$	24,10	225,71	0,0127	155,08	2,7428
$[45/-45]^\circ$	18,25	178,84	0,0135	136,54	2,7455
$[50/-50]^\circ$	14,56	154,18	0,0154	122,22	2,7465
$[55/-55]^\circ$	12,38	141,17	0,0165	111,58	2,7468

Fonte: Autoral

Nota-se uma variação significativa nas propriedades dos materiais conforme se varia o ângulo de entrelaçamento das lâminas. Para os ângulos maiores, como os conjuntos $[50/-50]^\circ$ e $[55/-55]^\circ$, a diferença de propriedades é menor quando comparada entre ângulos menores, como em $[35/-35]^\circ$ e $[40/-40]^\circ$, onde essa alteração de $\pm 5^\circ$ possui mais influência, variando significativamente o módulo de elasticidade.

Além disso, através do estudo acerca da influência dos ângulos de entrelaçamento, nota-se que há a variação de propriedades dos compósitos conforme o ângulo adotado [9]. É possível observar que quanto menor o ângulo de entrelaçamento, maior a resistência que a célula unitária possui.

Eyckens (2021) [10], em seu estudo para compósitos com reforço de fibra de vidro e matriz de resina epóxi, utilizou o mesmo programa para simular os ensaios mecânicos para uma barra estabilizadora, e encontrou para o conjunto $[45/-45]^\circ$ o valor de 13 GPa para o módulo de elasticidade. Nota-se, com isso, a vantagem de uma maior resistência mecânica dos compósitos carbono/BMI em relação aos compósitos de sistema vidro/epóxi, obtendo um módulo de elasticidade maior, 18,25 GPa para o conjunto $[45/-45]^\circ$.

A partir do programa *Altair ESAComp*, foi possível avaliar as propriedades dos compósitos carbono/resina fenólica G803 e G 1051, e do laminado de carbono/BMI, comparando-os à simulação da célula unitária, obtendo a Tabela 7.

Tabela 7 – Comparação das propriedades dos laminados em relação à célula unitária

Propriedades	G803	G1051	C/BMI	Célula Unitária
E (GPa)	17,19	17,61	15,66	18,26
G (GPa)	27,62	33,33	27,19	35,81
ν	0,72	0,76	0,74	0,76
σ_f (MPa)	100	100	120	136,54
ρ (g/cm^3)	1,62	1,62	1,52	1,57

Fonte: Autoral

Portanto, é possível notar valores maiores para os módulos de elasticidade e de cisalhamento e para a tensão de flexão máxima suportada são maiores para a célula unitária. Além disso, comparando as propriedades do laminado de carbono/resina fenólica com o carbono/BMI, pode-se notar uma resistência mecânica maior para o primeiro.

Com isso, observa-se que o método utilizado para simulação do compósito por meio da célula unitária, visto no programa *Altair Multiscale Designer*, fornece resultados mais verdadeiros e condizentes com o processamento de *braiding*, com valores muito maiores de resistência à flexão encontrados para as simulações quando comparado à TLC, que é usada no programa *Altair ESAComp*.

Os materiais fabricados por *braiding* solucionam problemas dos laminados como delaminação e incompatibilidade de interface fibra/matriz, além de possuir vantagem estrutural em relação a técnicas como enrolamento filamentar e pultrusão. Por isso, é necessário realizar uma simulação adequada para projetos de engenharia. Nesse quesito, a análise mecânica realizada utilizando o modelo de célula unitária se mostrou mais adequada do que a TLC, visto que os materiais trançados agem como retentores de trincas e possuem uma resistência estrutural superior aos laminados, assim como pode-se notar no ensaio de flexão para a célula unitária e para os laminados estudados [11].

Conclusões

A partir deste estudo, foi possível analisar a influência do ângulo de entrelaçamento nas propriedades finais do compósito trançado, onde percebeu-se que a medida em que se decaí o ângulo do sistema, maior é sua resistência mecânica, em função da orientação da fibra de acordo com o carregamento. Além disso, comparando os resultados obtidos a partir das simulações feitas pelo método da célula unitária com os do método TLC, notou-se que o primeiro método fornece valores mais precisos quanto ao segundo, obtendo tensões de flexão maiores para a simulação da célula unitária de *braiding* do que para o laminado, ambos com o sistema de $[45/-45]^{\circ}$.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de auxílio fornecida, e à UNIFEI, pelo apoio prestado.

Referências

- [1] BOTELHO, E. C. **PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE RESINA FENÓLICA COM NANOTUBOS DE CARBONO COM APLICAÇÕES AEROESPACIAIS** - 2011. 179f. Tese (Livre-Docência em Processamento de Compósitos) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011
- [2] HAO W., HUANG Z., ZHANG L., ZHAO G., LUO Y. Study on the torsion behavior of 3-D braided composite shafts. **Composite Structures**, v. 229, p. 111384, dez. 2019.
- [3] BOTELHO, E. C., SCHERBAKOFF, N., REZENDE, M. C. "Estabelecimento de parâmetros reológicos na obtenção de compósitos carbono/fenólica." **Polímeros** 9 (1999): 59-65.
- [4] MOURA, M.; MORAIS, B.; MAGALHÃES, A. **Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**, 2010.
- [5] REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, v. 10, p. e4-e10, 2000.
- [6] MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e tecnologia**, 2011.
- [7] ALTAIR ESACOMP, Banco de dados, 2012.
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6272: **standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials by four-point bending**. Philadelphia, 2010^a.
- [9] XU, L.; KIM, S. J.; ONG, C. H.; HA, S. K. Prediction of material properties of biaxial and triaxial braided textile composites. **Journal Of Composite Materials**, [S.L.], v. 46, n. 18, p. 2255-2270, 25 jan. 2012. SAGE Publications.
- [10] EYCKENS, P. et al. Multi-scale Design, Prototyping and Validation Testing of a Composite Anti Roll Bar. **ESAFORM** 2021.
- [11] PAVLOPOULOU, S.; ROY, S. S.; GAUTAM, M.; BRADSHAW, L.; POTLURI, P.. Numerical and Experimental Investigation of the Hydrostatic Performance of Fibre Reinforced Tubes. **Applied Composite Materials**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 417-448, 1 dez. 2016. Springer Science and Business Media LLC.