AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EFETIVAS DE COMPÓSITOS BIDIMENSIONAIS USANDO A ABORDAGEM MICROMECÂNICA

Gabriel de Andrade Penha Silva, Felipe Ruivo Fuga, Ricardo de Medeiros

INTRODUÇÃO

Materiais compósitos reforçados com fibras são amplamente utilizados em aplicações estruturais devido à elevada relação entre propriedades mecânicas e massa específica, além da possibilidade de adequação das propriedades do material por meio da seleção dos constituintes e da arquitetura do reforço (Rajak *et al.*, 2019; Diniță *et al.*, 2023). Entretanto, a determinação das propriedades mecânicas efetivas desses materiais constitui um desafio, uma vez que sua resposta macroscópica depende simultaneamente das propriedades da fibra e da matriz, da geometria do reforço e da presença de defeitos originados durante o processo de fabricação. Em compósitos reforçados por tecidos, a interação entre esses fatores torna a avaliação das propriedades equivalentes ainda mais complexa (Ahmad, Yuvaraj e Bajpai, 2020; Elmoghazy *et al.*, 2023).

Abordagens micromecânicas baseadas em Volumes Elementares Representativos (RVE) permitem relacionar características da microestrutura às propriedades efetivas do material, reduzindo a necessidade de campanhas experimentais extensas (Silva, Tita e Medeiros, 2023). Além disso, técnicas estatísticas de planejamento de experimentos podem ser utilizadas para quantificar a influência relativa de diferentes parâmetros sobre as respostas mecânicas obtidas (Menezes *et al.*, 2021). Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar a influência de variáveis relacionadas às propriedades dos constituintes, à arquitetura do reforço e à presença de defeitos nas propriedades elásticas efetivas de um compósito tecido de fibra de carbono e matriz epóxi, utilizando modelagem micromecânica, homogeneização numérica e análise estatística.

DESENVOLVIMENTO

Para avaliar a influência de parâmetros constitutivos, geométricos e de defeitos nas propriedades efetivas de um compósito tecido de fibra de carbono e matriz epóxi, foi desenvolvido um modelo micromecânico baseado em um Volume Elementar Representativo (RVE) da microestrutura utilizando o software Digimat-FE. O modelo foi construído de forma a representar a arquitetura do tecido e permitir a obtenção das propriedades homogeneizadas do material por meio de análises numéricas. Foram consideradas como variáveis de entrada o módulo de elasticidade da fibra de carbono, o coeficiente de Poisson da fibra, o módulo de elasticidade da matriz epóxi, o coeficiente de Poisson da matriz, a ondulação das fibras, a fração volumétrica de vazios e o número de vazios presentes na microestrutura. As propriedades da matriz foram obtidas de Mallick (1988), os módulos elásticos da fibra foram obtidos da Japan Carbon Fiber Manufacturers Association e o coeficiente de Poisson da fibra foi baseado em Krucinska e Stypka (1991). Os limites das demais variáveis foram definidos conforme as possibilidades de modelagem disponíveis no software.

A avaliação dos parâmetros foi realizada utilizando um planejamento experimental do tipo Plackett-Burman com oito execuções, conforme apresentado na Tabela 1. Para cada simulação foram combinados dois níveis de cada variável, permitindo analisar seus efeitos principais sobre as propriedades efetivas do compósito. O módulo de elasticidade da fibra foi variado entre 200 e 280 GPa, o módulo da matriz entre 2,75 e 4,10 GPa, o coeficiente de Poisson da fibra entre 0,26 e 0,28, o coeficiente de Poisson da matriz entre 0,20 e 0,33, a ondulação da fibra entre 0,3 e 0,7, a fração de vazios entre 0,001 e 0,0015 e o número de vazios entre 100 e 200. Em cada execução foram obtidos os módulos de elasticidade nas três direções principais (E_{11}, E_{22} e E_{33}), os coeficientes de Poisson equivalentes e os módulos de cisalhamento do material homogeneizado.

RESULTADOS

Em cada uma das oito simulações foram obtidas as propriedades elásticas homogeneizadas do compósito, incluindo os módulos de elasticidade nas direções principais (E_{11}, E_{22} e E_{33}), os coeficientes de Poisson (ν_{12}, ν_{13} e ν_{23}) e os módulos de cisalhamento (G_{12}, G_{23} e G_{13}). Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para quantificar a contribuição relativa de cada variável de entrada sobre as propriedades efetivas do material. A partir dos efeitos calculados, foi elaborado um ranqueamento percentual dos parâmetros e construído o mapa de calor apresentado na Tabela 2. Os resultados mostraram que a ondulação das fibras exerceu a maior influência sobre os módulos de elasticidade no plano do tecido, contribuindo com 42,53% para E_{11} e 43,84% para E_{22}. Observou-se ainda que a ondulação afeta essas propriedades de forma oposta, aumentando E_{11} e reduzindo E_{22}. Os módulos da fibra e da matriz também apresentaram influência relevante sobre E_{11} e E_{22}, com contribuições entre 15% e 17%. Para a direção transversal (E_{33}), o parâmetro predominante foi o módulo de elasticidade da matriz, responsável por 73,10% da variação observada, indicando que essa propriedade é controlada principalmente pela fase matriz.

Os coeficientes de Poisson apresentaram comportamento dependente tanto das propriedades da matriz quanto da arquitetura do reforço. O coeficiente ν_{12} foi influenciado principalmente pela ondulação das fibras (31,27%), seguido pelo coeficiente de Poisson da matriz (16,01%). Já ν_{13} e ν_{23} foram controlados pelo coeficiente de Poisson da matriz, que apresentou contribuições de 50,68% e 35,12%, respectivamente. Em relação aos módulos de cisalhamento, verificou-se predominância das propriedades da matriz epóxi, especialmente para G_{12}, G_{23} e G_{13}, nos quais o módulo de elasticidade da matriz apresentou contribuições de 75,57%, 50,82% e 53,52%, respectivamente. Por outro lado, parâmetros associados aos defeitos da microestrutura, representados pela fração e pelo número de vazios, apresentaram influência reduzida na maioria das propriedades avaliadas. Esses resultados evidenciam que as propriedades efetivas do compósito tecido dependem de mecanismos distintos de acordo com a resposta analisada, sendo os módulos longitudinais governados principalmente pela arquitetura do reforço, os coeficientes de Poisson influenciados pela matriz e pela ondulação das fibras, e os módulos de cisalhamento controlados predominantemente pelas propriedades da matriz epóxi.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A combinação da homogeneização micromecânica com o planejamento experimental de Plackett-Burman e a análise de variância permitiu quantificar a influência relativa dos parâmetros constitutivos, geométricos e de defeitos nas propriedades efetivas do compósito tecido analisado. Os resultados mostraram que os módulos de elasticidade no plano do laminado são influenciados principalmente pela ondulação das fibras, com efeitos de mesma magnitude e sinais opostos sobre E_{11} e E_{22}. Os coeficientes de Poisson apresentaram maior dependência das propriedades da matriz e da arquitetura do reforço, enquanto os módulos de cisalhamento foram predominantemente controlados pelo módulo de elasticidade da matriz. Dessa forma, o estudo permitiu identificar os parâmetros mais relevantes na previsão das propriedades mecânicas efetivas de compósitos bidimensionais, fornecendo subsídios para o desenvolvimento e otimização de modelos micromecânicos aplicados ao projeto desses materiais.

Palavras-chave: materiais compósitos; RVE; Plackett-Burman; homogeneização; propriedades efetivas; ANOVA.

ANEXOS

Tabela 1. *Matriz Plackett-Burman*

Run	Módulo da Fibra(GPa)	Poisson da Fibra	Módulo da Matriz(GPa)	Poisson da fibra	Ondulação	Fração de vazios	Número de vazios
1	280	0.26	2.75	0.33	0.3	0.0015	200
2	280	0.28	2.75	0.2	0.7	0.001	200
3	280	0.28	4.1	0.2	0.3	0.0015	100
4	200	0.28	4.1	0.33	0.3	0.001	200
5	280	0.26	4.1	0.33	0.7	0.001	100
6	200	0.28	2.75	0.33	0.7	0.0015	100
7	200	0.26	4.1	0.2	0.7	0.0015	200
8	200	0.26	2.75	0.2	0.3	0.001	100

Tabela 2. *Mapa de calor dos resultados*

Parâmetro	E11	E22	E33	v12	v13	v23	G12	G23	G13
Módulo da Fibra (Ef)	16.14%	15.06%	2.19%	11.57%	-1.68%	9.26%	0.63%	12.46%	-11.13%
Poisson da Fibra (vf)	3.27%	-2.51%	-0.65%	11.53%	-0.60%	6.51%	-0.25%	-2.84%	2.19%
Módulo da Matriz (Em)	17.16%	16.62%	73.10%	-12.26%	-1.68%	-9.26%	75.57%	50.82%	53.52%
Poisson da Matriz (vm)	-11.42%	10.80%	19.82%	16.01%	50.68%	35.12%	-19.19%	-12.46%	-11.13%
Ondulação	42.53%	-43.84%	-2.19%	31.27%	-44.30%	31.98%	0.63%	17.90%	-16.97%
Fração de vazios	-7.19%	7.58%	-1.20%	-10.84%	-0.60%	-6.51%	3.47%	1.78%	2.62%
Número de vazios	2.47%	3.31%	0.65%	-6.39%	-0.37%	1.25%	-0.25%	-1.78%	2.62%

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, F.; YUVARAJ, N.; BAJPAI, P. K. Effect of reinforcement architecture on the macroscopic mechanical properties of fiberous polymer composites: a review. *Polymer Composites*, v. 41, n. 6, p. 2518-2534, 2020.

DINIȚĂ, A.; RIPEANU, R. G.; ILINCĂ, C. N.; CURSARU, D.; MATEI, D.; NAIM, R. I.; TĂNASE, M.; PORTOACĂ, A. I. Advancements in fiber-reinforced polymer composites: a comprehensive analysis. Polymers, v. 16, n. 1, p. 2, 2023.

ELMOGHAZY, Y.; ABUELGASIM, E. M. O.; OSMAN, S. A.; AFANEH, Y. R. H.; EISSA, O. M. A.; SAFAEI, B. Effective mechanical properties evaluation of unidirectional and bidirectional composites using virtual domain approach at microscale. *Archives of Advanced Engineering Science*, v. 1, n. 1, p. 27-37, 2023.

JAPAN CARBON FIBER MANUFACTURERS ASSOCIATION. Type of carbon fiber. Tokyo: Japan Carbon Fiber Manufacturers Association, [s.d.]. Disponível em: https://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/type/. Acesso em: 27 abr. 2026.

KRUCINSKA, I.; STYPKA, T. Direct measurement of the axial Poisson's ratio of single carbon fibres. *Composites Science and Technology*, v. 41, n. 1, p. 1-12, 1991.

MALLICK, P. K. Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. Boca Raton: CRC Press, 2007.

MENEZES, V. G. S. de; SOUZA, G. S. C. de; VANDEPITTE, D.; TITA, V.; MEDEIROS, R. de. Defect and damage detection in filament wound carbon composite cylinders: a new numerical-experimental methodology based on vibrational analyses. *Composite Structures*, v. 276, p. 114548, 2021.

RAJAK, D. K.; PAGAR, D. D.; MENEZES, P. L.; LINUL, E. Fiber-reinforced polymer composites: manufacturing, properties, and applications. *Polymers*, v. 11, n. 10, p. 1667, 2019.

SILVA, M. R.; TITA, V.; MEDEIROS, R. de. Influence of the geometric parameters on the effective properties of piezoelectric composite sensors using real measurements and a new RVE. *Composite Structures*, v. 303, p. 116292, 2023.