

## COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES DE MATERIAIS COMPÓSITOS

CESAR LEANDRO VAIS COPATTI<sup>1</sup>, FELIPE BRUM ROSSATO<sup>2</sup>, JHONATAN ACACIO SILVA<sup>3</sup> e MAYARA GABRIELLE STALL<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Acadêmico de Engenharia Mecânica, UNIVALI, Itajaí-SC, cesar\_1303@outlook.com;

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico Acadêmico de Pós Graduação, UNIVALI, Itajaí-SC, felipe.rossato@edu.univali.br;

<sup>3</sup> Docente e Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica, UNIVALI, Itajaí-SC, jhonatanacacio@univali.br;

<sup>4</sup> Acadêmica de Engenharia Mecânica, UNIVALI, Itajaí-SC, mayarastall@outlook.com

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
07 a 10 de outubro de 2024

**RESUMO:** Materiais compósitos reforçados com fibras, como os polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC), ganharam grande adoção em diversas indústrias devido a suas notáveis propriedades mecânicas além de elevada relação entre força, peso e resistência a fraturas. Realizar simulação mecânica do comportamento desses materiais é extremamente importante para minimizar custos de produção e desperdícios. Este trabalho confronta simulações baseadas nos dados extraídos de testes mecânicos com aqueles calculados em regras de mistura. Os corpos de prova foram produzidos utilizando fibra 334-HM e resina epóxi 780E, seguindo as normas ASTM 3039 e ASTM D732. Os testes mecânicos foram realizados dentro do laboratório técnico da Univali o LATEC, enquanto as simulações ocorreram no software Inventor NASTRAN. As simulações através do método de elementos finitos forneceram informações valiosas, contribuindo para a análise de falhas, mesmo diante de desvios padrão significativos nos testes. Em comparação, os testes aprimoraram a qualidade dos resultados obtidos nas simulações, destacando a importância dos ensaios mecânicos em face da variação nas características finais do material.

**PALAVRAS-CHAVE:** Materiais compósitos, simulação mecânica, método de elementos finitos.

## COMPARISON OF COMPOSITE MATERIAL SIMULATIONS

**ABSTRACT:** Fiber-reinforced composite materials, such as carbon fiber reinforced polymers (CFRP), have gained wide adoption in various industries due to their remarkable mechanical properties and high strength-to-weight ratio and fracture resistance. Carrying out simulation of the behavior of these materials is extremely important to minimize production costs and waste. This work compares simulations based on data extracted from mechanical tests with those calculated using mixing rules. The test specimens were produced using 334-HM fiber and 780E epoxy resin, following ASTM 3039 and ASTM D732 standards. The mechanical tests were carried out within the Univali technical laboratory LATEC, while the simulations took place using the Inventor NASTRAN software. The simulations provided valuable information, contributing to failure analysis, even in the face of significant standard deviations in the tests. In comparison, the tests improved the quality of the results obtained in the simulations, highlighting the importance of mechanical tests in view of the variation in the final characteristics of the material.

**KEYWORDS:** Composite materials, mechanical simulation, finite element analysis.

## INTRODUÇÃO

Os compósitos Polímeros Reforçados com Fibra (PRF) são materiais compósitos formados por uma combinação de resistência, leveza e durabilidade. A combinação de uma matriz polimérica com fibras de alta resistência, atribui a esse material um excelente desempenho mecânico e resistência à corrosão. Os PRFs, especialmente os de fibra de carbono, estão substituindo materiais convencionais em diversos setores, como construção civil, esportes e uso doméstico. (PRFC) classificam-se durante uma série de aplicações econômicas, domésticas e de engenharia. Shunmugesh, et al. (2017). Hegde, et al. (2019). Poór, et al. (2021).

Logo, o objetivo geral deste estudo é desenvolver um comparativo entre simulações anisotrópicas alimentadas com diferentes entradas de dados, sendo estas entradas calculadas pela regra da mistura a partir de datasheets ou retiradas de testes experimentais desenvolvidos pelo acadêmico. R Treffler et al (2016). Hull et al. (1996).

## MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foi utilizado a fibra de carbono 334-HM da TEXICARBON e uma matriz a resina epóxi 780E da AIRSTONE com endurecedor 786H. Suas propriedades mecânicas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis de entrada para cálculo.

Material	Modulo de elasticidade [MPa]	Modulo de cisalhamento [MPa]	Coefficiente de Poisson [adm]	Tensão última de tração [MPa]	Tensão última de cisalhamento [MPa]
Fibra	231.000	12.500	0,28	4.900	400
Matriz	3.000	1.000	0,4	74	22,2

Para simular o regime elástico de um material isotrópico, são necessários 6 módulos de elasticidade e 3 coeficientes de Poisson. Os módulos longitudinais de elasticidade incluem  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$  correspondente a tração e compressão e  $G_{12}$ ,  $G_{13}$  e  $G_{23}$  (cisalhamento). Os coeficientes de Poisson são  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$  e  $\nu_{23}$ . Todas as equações para cálculo foram retiradas de Callister (2021) e Askeland (2017). Com as variáveis de entrada definidas o processo de cálculo é simples e as fórmulas necessárias para cálculo são respectivamente, Módulo de elasticidade (Eixo 1  $E_1 = E_f V_f + E_m V_m$ , Eixo 2  $\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$ ); Módulo de cisalhamento (Plano 12  $\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m}$ , Plano 13  $G_1 = G_f V_f + G_m V_m$ ); Coeficiente de Poisson (Eixo 1  $\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_c V_c$ , Eixo 2  $\frac{1}{\nu_{13}} = \frac{V_f}{\nu_f} + \frac{V_m}{\nu_m}$ ). Já as variáveis de entrada para simulação para tensões últimas são dadas pelas seguintes equações, Módulo de longitudinal de tração  $[\sigma_{1-T}]$  ( $\sigma_{1-T} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$ ) e  $[\sigma_{2/3-T}]$  ( $\frac{1}{\sigma_{2/3-T}} = \frac{V_f}{\sigma_f} + \frac{V_m}{\sigma_m}$ ); Módulo de transversal de cisalhamento  $[\tau_{1-T}]$  ( $\tau_{1-T} = \tau_f V_f + \tau_m V_m$ ); Módulo de longitudinal de cisalhamento  $[\tau_{2/3-T}]$  ( $\frac{1}{\tau_{2/3-T}} = \frac{V_f}{\tau_f} + \frac{V_m}{\tau_m}$ ).

Através dos calculados previu-se que o material é homogêneo e sem vãos de ar ("voids"). Portanto, os valores mecânicos de teste deverão ser inferiores aos calculados. Todos os testes foram padronizados de acordo com as normas internacionais ASTM D 3039 utilizada para regulamentar os testes de tração longitudinal e transversal de compósitos e uma adaptação da ASTM D 732.

Os provetes foram obtidos de uma placa de 260 x 260 mm e usinados para as dimensões especificadas. O compósito é composto por 4 camadas de fibra de carbono unidirecional, cada uma com 0,4 mm de espessura, totalizando aproximadamente 1,6 mm. A matriz epóxi foi infundida por vácuo, nesse processo as lâminas de carbono são posicionadas na geometria desejada e seladas com uma bolsa de vácuo que é grudada na placa inferior através de uma fita selante.

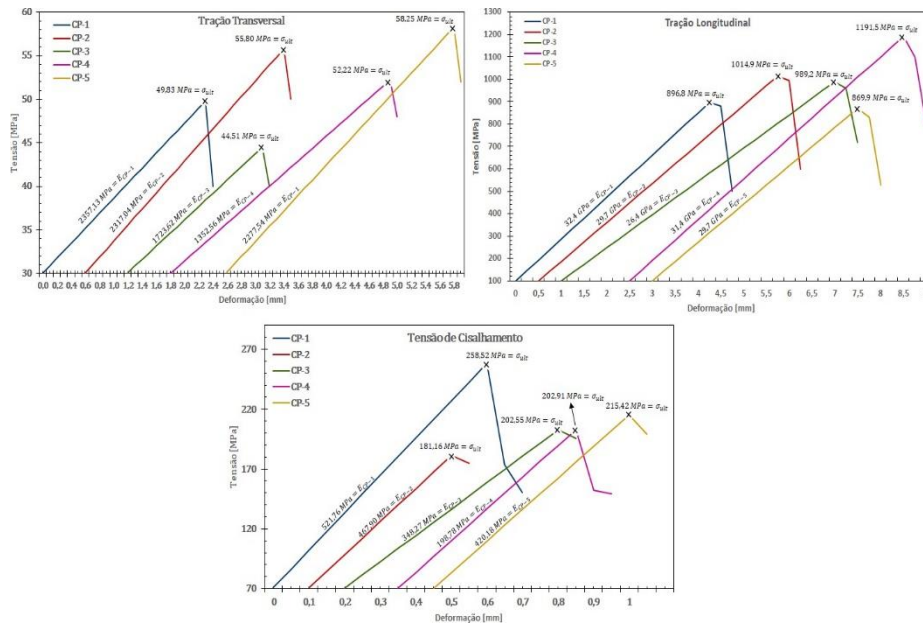
Todos os cortes dos provetes foram realizados manualmente com esmerilhadeira, isso fez com que houvesse pequenas variações nas dimensões. As dimensões dos cinco provetes utilizados para teste de tração tiveram variação na largura de 11,39mm há 11,82mm e na espessura de 1,44mm á 1,79mm. Já os cinco utilizados no teste de cisalhamento variaram de 48,09mm há 51,23mm na largura e no comprimento de 48,58 há 50,19mm.

Demonstrou-se através dos dados uma razão mássica média de 62,10% de fibra, muito alta comparadas ao limite de Chawla em Composite Materials: Science and Engineering. As simulações, realizadas no Inventor NASTRAN, foram estáticas lineares e avaliaram o deslocamento, tensão e força de contato entre camadas. Realizou-se três simulações com duas repetições cada, usando valores calculados e de testes. As peças foram carregadas com faces exteriores da aba inferior engastadas e deslocamento em Y livre na aba superior, resultando em tensões axiais máximas, deformações e força de contato.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 1 apresenta nos gráficos de 1 a 3 as relações de tensão deformação para os cinco testes sendo eles em sequência: tração longitudinal, tração transversal e cisalhamento. É possível notar a relação de tensões últimas e módulos elásticos com seus respectivos desvios padrões. Nestes gráficos acima de cada regime elástico está descrito o módulo de elasticidade referente e descrita a tensão última de cada corpo de prova.

Figura 1. Gráficos de tensão deformação para 1. Teste longitudinal 2. Teste transversal 3. Teste de cisalhamento.



Em relação aos resultados das simulações, os modos de falhas mantiveram-se iguais entre as análises alimentadas com os dados dos cálculos ou dos testes, apenas com diferenças na deformação e na tensão máxima. A Fig. 2 apresenta a tensão máxima e as forças de coesão na peça de tração transversal. Referente a simulação longitudinal, foi similar ao transversal, porém, uma concentração de tensão foi encontrada como apresentada na Fig. 3, lado esquerdo.

Figura 2. Resultado de simulações mecânicas. A esquerda tensão máxima normal a Y aplicada na tração transversal [MPa] e a direita força máxima entre camadas [N].

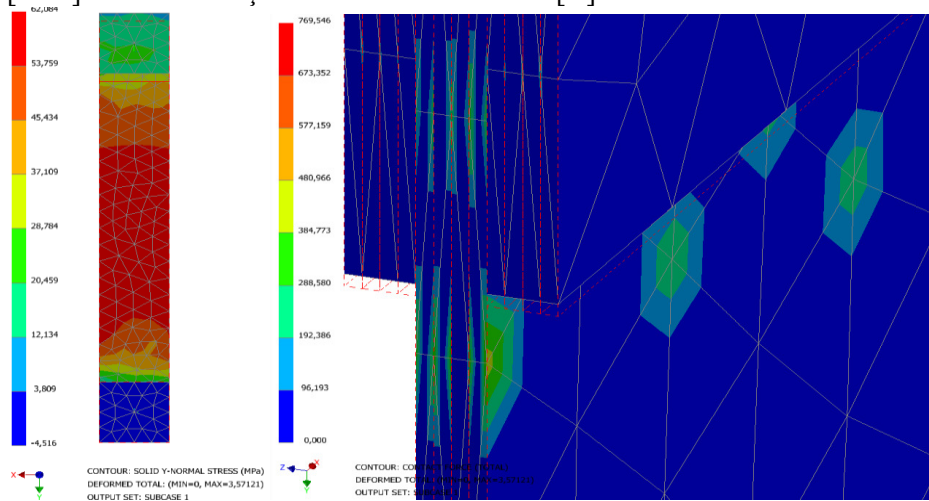
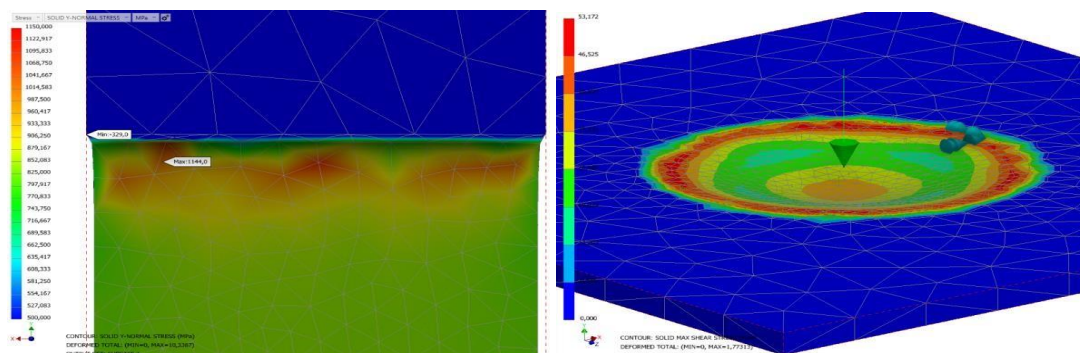


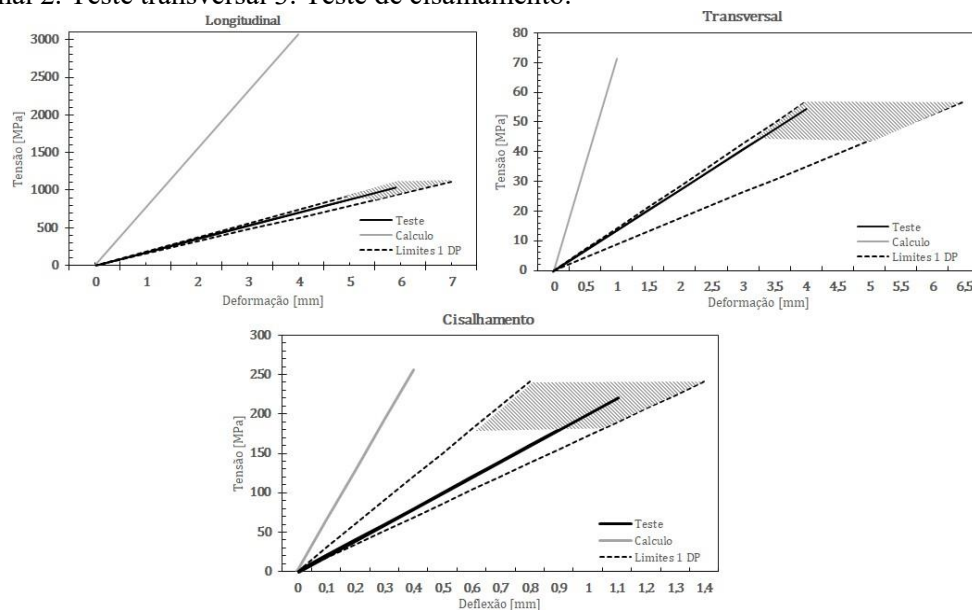
Figura 3. Resultado de simulações mecânicas. A esquerda tensão máxima normal a Y aplicada na tração longitudinal [MPa] e a direita cisalhamento máximo aplicado no teste de cisalhamento [MPa].



Como o método de análise da simulação foi linear estático não foi possível apresentar rompimento da peça e o único regime estudado foi o elástico, isso não subtrai em nada da análise do artigo uma vez que materiais compósitos não detém um regime elástico longo e apresentam falhas abruptas quando a tensão última é atingida como evidenciado pelos gráficos da Fig 1.

Referente ao comparativo entre simulações, 3 gráficos foram desenvolvidos com a finalidade de apresentar a região esperada de falha com os resultados obtidos em cada análise, estes gráficos estão apresentados na Fig. 4. Neste gráfico as áreas apresentadas como cinza hachurado são delimitadas por um desvio padrão em cada sentido sendo ele no módulo de elasticidade ou na tensão última, sendo assim é esperado que as simulações caiam dentro destas áreas.

Figura 4. Gráficos comparativos entre simulações alimentadas por cálculos e testes sendo 1. Teste longitudinal 2. Teste transversal 3. Teste de cisalhamento.



Observa-se que nenhuma resistência se aproximou dos valores calculados, como representado pelos gráficos sendo a maior diferença de 207,37% referente a tensão longitudinal. Esta diferença inesperada pode ter vindo de entradas errôneas, além da não utilização de elastômeros para medir a deformação resultando em módulos de elasticidade que não são os valores reais o que inflacionou os erros apresentados.

## CONCLUSÃO

De acordo com os resultados o teste mecânico auxiliou e muito na precisão dos dados referente ao material, desta forma realizar testes seguindo o processo de manufatura podem ser fornecer dados ainda mais precisos sobre o comportamento do compósito.

Entretanto, sabendo da alteração dos valores de tensão máxima e deformação máxima nas simulações, mantiveram-se as características de falha como, pontos de maior concentração de tensão e forças internas, portanto, é valido realizar uma simulação preliminar para compreender melhor os mecanismos de falha.

Para trabalhos futuros sugere-se realizar, comparativo entre simulação e teste prático em produtos já acabados utilizando como entrada compósitos já testados e validados na literatura.

## REFERÊNCIAS

- ASKELAND, Donald R. **The Science and Engineering of Materials**. 7th edition. Boston: Cengage Learning, 2019.
- ASTM D3039-17. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- ASTM D732. **Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2021
- Chawla, krishan k. **Composite materials: science and engineering**. 4th ed. New york: springer, 2012
- D. Hull, T.W. Clyne, **An Introduction to Composite Materials**, Cambridge University Press, New York, 1996.
- Dániel István Poór, Norbert Geier, Csongor Pereszlai, Jinyang Xu, **A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges**, Composites Part B: Engineering, Volume 223, 2021, 109155, ISSN 1359-8368, Poor DI, Geier N, Pereszlai C, Xu J. A critical review of the drilling of CFRP composites: burr formation, characterisation and challenges. Compos Pt B - Eng 2021;223:109155.
- Hegde S, Satish Shenoy B, Chethan KN. **Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance**. Mater Today: Proc 2019;19:658e62.
- K. Shunmugesh and K. Panneerselvam. **Optimization of Machining Process Parameters in Drilling of CFRP Using Multi-Objective Taguchi Technique, TOPSIS and RSA Techniques**. Polymers and Polymer Composites Volume 25, Issue 3. Mar 2017 Pages 185-246
- TREFFLER, R. Modelling and simulation of randomly oriented carbon fibre-reinforced composites under thermal load. **Materials Science And Engineering: International Conference on Materials, Processing and Product Engineering 2015**, Munich, Germany, Maio. 2016.