

## Avaliação do Comportamento Mecânico do Novo Biocompósito: Fabricação, Análise Experimental e Computacional.

### Evaluation of the Mechanical Behavior of the New Biocomposite: Manufacturing, Experimental and Computational Analysis.

Silvio Loechelt Cavicchioli Júnior  
[silvioclochelt@gmail.com](mailto:silvioclochelt@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Brasil

Romeu Rony Cavalcante da Costa  
[romeu.rony@outlook.com](mailto:romeu.rony@outlook.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Brasil

#### RESUMO

O escopo deste trabalho consiste em analisar a paridade de simulações computacionais com ensaios experimentais sob o desenvolvimento teórico de critérios de falha no âmbito dos materiais compósitos. Consumou-se o estudo do biocompósito de poliuretana derivada de óleos vegetais reforçado com fibras de algodão orientadas unidirecionalmente. Frente às propriedades obtidas experimentalmente, por ensaios de tração e flexão, pode-se estimar o limiar de falha do material sob a teoria de falha de Hashin com a abordagem da falha da primeira lâmina (FPF). Facultou-se simulações computacionais, cometidas pelo método de elementos finitos, no que concerne o estudo, para os modos de falha trativos. Verificou-se que a orientação das fibras está expressamente correlacionada com o comportamento mecânico do material bem como a viabilidade do estudo na identificação do instante em que a falha sucede.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biocompósito. Critério de falha. Validação computacional.

#### ABSTRACT

The objective of this work consists of analyzing the parity of computational simulations with experimental tests under the theoretical development of failure criteria in composites materials. The study of the biocomposite of polyurethane derived from vegetable oils reinforced with unidirectionally cotton fibers was carried out. Based on experimental properties obtained by tensile and flexural tests, the material failure, under the Hashin failure criteria theory and using the First Ply Failure (FPF), can be estimated. Computational simulations were carried out, using the finite element method, for the tractive failure modes. It was found that the orientation of the fibers is expressly correlated with the mechanic behavior of the material as well as the feasibility of the study in identifying the instant the failure occurs.

**KEYWORDS:** Biocomposite. Failure criterion. Computational validation.

**Recebido:** 31 ago. 2018.

**Aprovado:** 04 out. 2018.

#### Direito autoral:

Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Um material compósito, de uma maneira geral, pode ser caracterizado como uma combinação de dois ou mais materiais na escala macroscópica, de forma que eles obtenham um conjunto de propriedades de engenharia que nenhum dos componentes individualmente apresentaria (REDDY, 2004).

Atualmente, estes materiais são cada vez mais utilizados no cenário industrial, demonstrando assim, necessidade em estudá-los de forma mais eficiente. O compósito a ser explorado é composto de uma matriz de poliuretana reforçada por 7 camadas de fibras de algodão unidirecional nas direções  $[0^\circ]_7$  e  $[90^\circ]_7$ .

Em razão das dificuldades econômicas e práticas associadas à avaliação do comportamento estrutural do material, por ensaios de tração e compressão, o desenvolvimento e o uso de métodos de simulação numérica se fazem necessários. Dentre esses, o Método dos Elementos Finitos (MEF) mostra-se conveniente, visto suas qualidades com relação a simples modelagem e implementação numérico-computacional, assim como a flexibilidade com relação a alteração de parâmetros e condições de contorno (DIACENCO, 2010).

Nesse contexto, é fundamental a validação de simulações computacionais por meio de resultados experimentais e, paralelamente, estudar os conceitos de critérios de falha no âmbito dos materiais compósitos.

## MATERIAL

O material compósito laminado utilizado nos ensaios uniaxiais de tração e flexão, analisados neste trabalho, foram desenvolvidos por SILVA (2018) seguindo, respectivamente, as normas ASTM D3039/D3039M-00 e ASTM D790-03. Executou-se ensaios normalizados de tração e flexão para a obtenção das seguintes propriedades elásticas e valores de resistência do material para a posterior implementação das simulações computacionais. No Quadro (1) abaixo, estão exibidos os valores médios das propriedades mecânicas do material, sendo o primeiro módulo de elasticidade paralelo às fibras ( $E_{11}$ ) e os outros módulos perpendiculares às fibras ( $E_{22}$ ,  $E_{33}$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ), os módulos de cisalhamento ( $G_{12}$ ,  $G_{13}$  e  $G_{23}$ ), resistência ao cisalhamento ( $S_{12}$ ,  $S_{13}$  e  $S_{23}$ ), resistência da lâmina à tração e à compressão na direção longitudinal às fibras ( $X_{T,C}$ ) e, por fim, resistência da lâmina à tração e à compressão na direção transversal das fibras ( $Y_{T,C}$ ). Deve-se salientar que materiais compósitos reforçados por fibras unidirecionais são transversalmente isotrópicos.

Quadro 1 – Propriedades mecânicas do biocompósito de matriz de poliuretana derivada de óleos vegetais reforçadas com fibras de algodão

| $E_{11}$    | $E_{22}$    | $\nu_{12}$ | $G_{12} = G_{13}$ | $G_{23}$ | $S_{12} = S_{13}$ | $S_{23}$ | $X_T$       | $Y_T$       | $X_C$ | $Y_C$ |
|-------------|-------------|------------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------|-------------|-------|-------|
| 3,61<br>GPa | 1,08<br>GPa | 0,42       | 0,88<br>GPa       | *        | 32,7<br>MPa       | *        | 78,3<br>MPa | 11,6<br>MPa | *     | *     |

Fonte: Autoria própria (2018).

Por exigir grande complexidade na obtenção dos valores experimentais evidenciados com (\*), estes não foram utilizados, porém, não anulam sua

relevância na caracterização do comportamento mecânico do material.

## MÉTODOS

### CRITÉRIO DE FALHA DE HASHIN

É de extrema complexidade abranger todos os aspectos envolvidos no fenômeno da falha, porém, várias teorias compreendem a modelagem desta pluralidade. Dentre os modelos de falhas estudados, o critério de falha de Hashin permite sua identificação e se adequa ao domínio dos materiais compósitos.

Hashin apresentou um critério polinomial de segunda ordem para laminados unidirecionais transversalmente isótropos, considerando representar diferentes modos de falha do material. Dessa forma, pode-se avaliar a falha da fibra e da matriz sob carregamento de tração e compressão através de quatro equações distintas. As equações propostas por Hashin identificam os modos de falhas predominantes do material em estudo e são utilizadas na implementação numérico-computacional do software de elementos finitos (SOUZA, 2003).

Modo de falha das fibras por tração ( $\sigma_1 > 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \frac{1}{S_{12}^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \text{ ou } \sigma_1 = X_T \quad (1)$$

Modo de falha das fibras por compressão ( $\sigma_1 < 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 = 1 \text{ ou } \sigma_1 = -X_C \quad (2)$$

Modo de falha da matriz por tração ( $\sigma_2 + \sigma_3 > 0$ )

$$\frac{1}{Y_T^2}(\sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{S_{23}^2}(\sigma_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3) + \frac{1}{S_{12}^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (3)$$

Modo de falha da matriz por compressão ( $\sigma_2 + \sigma_3 < 0$ )

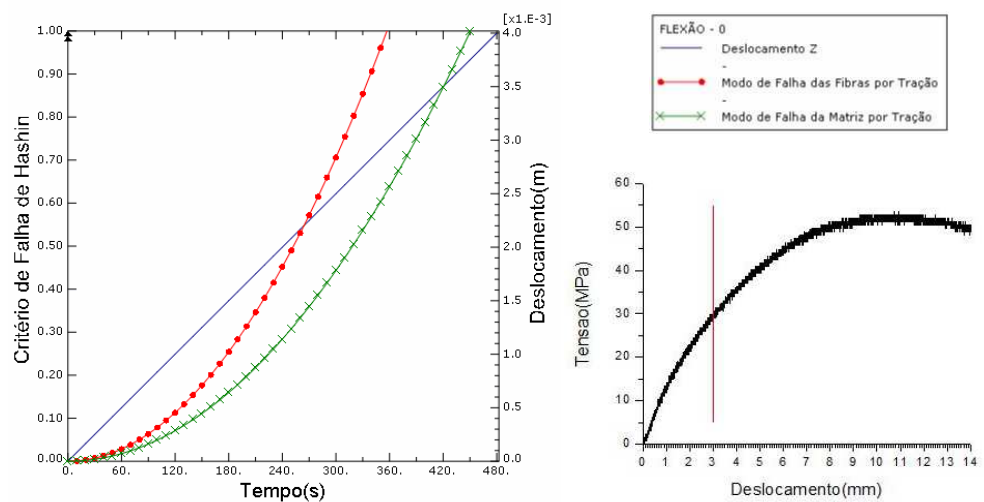
$$\frac{1}{4S_{23}^2}(\sigma_2 + \sigma_3)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}^2}\right)^2 - 1\right]\frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{Y_C} + \frac{1}{S_{23}^2}(\sigma_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3) + \frac{1}{S_{12}^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (4)$$

Este critério foi associado à consideração quanto à caracterização da falha pela abordagem *FPF* (Falha da Primeira Lâmina). Esta demonstra-se mais conservadora em termos de segurança, pois considera a falha completa do laminado quando este sofre falha na primeira lâmina. Neste trabalho, o objetivo é determinar a falha sob esta abordagem, sem a execução da análise progressiva da mesma, por esta carecer de estudos mais precisos sobre seu comportamento ulterior.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

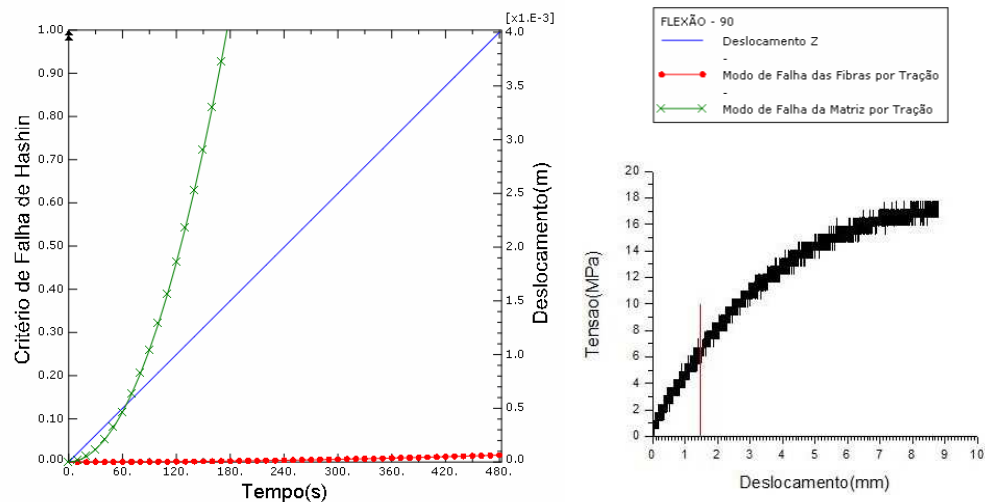
Após todas as considerações feitas anteriormente no desenvolvimento teórico do critério de falha de Hashin, é evidente que o limiar de falha, segundo este princípio, ocorre no momento em que suas expressões gerais apresentam valores iguais a um. Plotou-se os gráficos de deslocamentos máximos suportados, a curva polinomial representando os modos de falha de tração das fibras e da matriz, bem como o tempo total da simulação. O estudo tem caráter comparativo, portanto, estão exibidos os ensaios de tensão-deslocamento obtidos experimentalmente e as respectivas análises computacionais, juntamente com o instante em que a falha sucede.

Figura 1 - Análise de falha teórica e gráfico Tensão-Deslocamento do compósito de PU+7FA[0°]<sub>7</sub> – Flexão



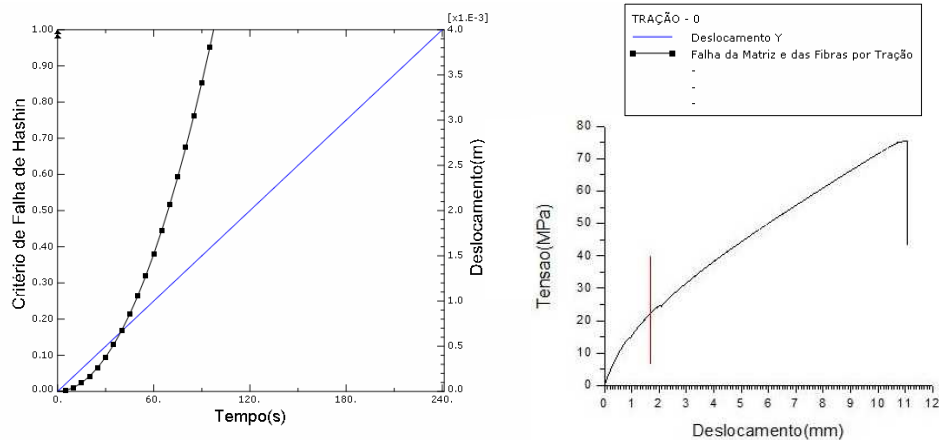
Fonte: Autoria Própria (2018).

Figura 2 - Análise de falha teórica e gráfico Tensão-Deslocamento do compósito de PU+7FA[90°]<sub>7</sub> – Flexão



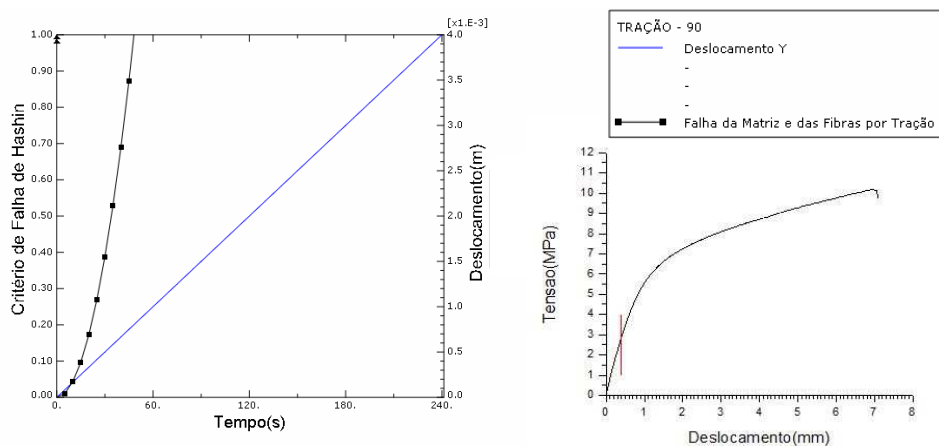
Fonte: Autoria Própria (2018).

Figura 3 - Análise de falha teórica e gráfico Tensão-Deslocamento do compósito de PU+7FA[0°]<sub>7</sub> – Tração



Fonte: Autoria Própria (2018).

Figura 4 - Análise de falha teórica e gráfico Tensão-Deslocamento do compósito de PU+7FA[90°]<sub>7</sub>



Fonte: Autoria Própria (2018).

## CONCLUSÃO

O escopo deste trabalho é caracterizar o comportamento mecânico do biocompósito de poliuretâna reforçada por fibras de algodão. Frente às simulações computacionais, em concordância com os ensaios experimentais, o estudo mostrou-se conveniente neste âmbito. Partindo-se de modelos computacionais, cometidos pelo método de elementos finitos, e concomitantemente ponderados pelo critério de falha de Hashin, foram possíveis as precedentes simulações. No que concerne ao trabalho, apenas análises da falha da primeira lâmina (FPF) pelos modos trativos – da matriz e das fibras - foram condescendentes ao estudo, eximindo assim, as falhas por compressão e a progressão da mesma. A ausência de dados inviabilizou estas interpretações, porém, não se deve anular a importância das considerações acerca destas, visto que, nos ensaios flexurais, os modos de falha por compressão são bem evidentes sob este tipo de carregamento.



A identificação do limiar de falha segundo estas análises - critério de falha de Hashin e falha da primeira lâmina - respaldam-se nas análises das curvas polinomiais apresentadas na simulação. As predições dos modos de falha por tração, associados à orientação das fibras, foram sustentadas pelas simulações computacionais, indicando de maneira assertiva as asserções sobre o que se referem. Sendo assim, é possível identificar se a falha sucede primeiramente na matriz, nas fibras ou em ambas. No que se refere ao instante em que a falha transcorre de acordo com a teoria de Hashin com abordagem *FPF*, este não apresentou fidelidade nos resultados, haja vista que a linearidade da curva Tensão-Deslocamento dos dados experimentais não cessa no instante determinado pela teoria de falha. Este resultado pode ser explicado por uma série de fatores, como defeitos intrínsecos no corpo de prova, ocorrência antecedente de delaminações, imprecisão de dados, carência das análises de compressão para obtenção de propriedades e até mesmo exclusão de considerações paralelas ao ensaio, como o atrito do corpo de prova com os apoios do teste de flexão.

### REFERÊNCIAS

REDDY, J. N. **Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis**. 2. ed. Boca Raton, Fl: Crc Press, 2004. 830 p.

DIACENCO, A. A. **Modelagem por elementos finitos de materiais compósitosestruturais incorporando material viscoelástico para o controle passivo devibração e ruído**. 2010. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, MG.

SILVA, A. A. X. **Comportamento mecânico e de inflamabilidade do compósito de poliuretana derivada de óleos vegetais (PU) reforçado com fibra de algodão e alumina tri-hidratada**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

SOUZA, G. P. **Avaliação de critérios de falhas em compósitos poliméricos reforçados aplicados a vigas sob carregamento de flexão**. São Carlos, 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carols, Universidade de São Paulo.