



13° CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS



NATAL - RN  
18 a 22 de outubro de 2015

## PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS COM FIBRAS CURTAS ALEATÓRIAS COM AUXÍLIO DE SOFTWARE ONLINE

Eduardo A. W. de Menezes<sup>1\*</sup> (M), Clarissa C. Angrizani<sup>1</sup> (D), Raphael Smidt<sup>1</sup>(IC) e Sandro C. Amico<sup>1</sup>.  
1 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre – RS, \*[eduardo.menezes@ufrgs.br](mailto:eduardo.menezes@ufrgs.br)

**Resumo:** As equações da micromecânica para a predição das propriedades de materiais compósitos vêm sendo amplamente utilizadas para a determinação de propriedades que usualmente requerem ensaios mecânicos, por vezes dispendiosos e demorados. Foi a partir da necessidade de tornar o cálculo destas propriedades mais prático que se criou o *software* MECH-Gcomp. Hospedado no servidor da UFRGS de forma a possibilitar acesso online, o *software* conta com diversos modelos para a avaliação das propriedades mecânicas de materiais compósitos de fibras longas e curtas, com orientação preferencial ou aleatória. No presente trabalho, os cálculos efetuados pelo programa foram confrontados com dados experimentais para compósitos com resina poliéster reforçados com fibra de curauá ou de vidro, ambas aleatoriamente dispostas. Nos dois casos, os modelos utilizados pelo programa apresentaram boa predição do comportamento mecânico do material compósito.

**Palavras-chave:** *Micromecânica, software online, fibras curtas, arranjo aleatório.*

### **MECHANICAL PROPERTIES OF RANDOM SHORT FIBER COMPOSITES ASSISTED BY ONLINE SOFTWARE**

**Abstract:** The micromechanics equations for the prediction of mechanical properties of composites are being widely used to evaluate properties that usually require mechanical tests, usually costly and time consuming. To make these calculations more readily-available, the software MECH-Gcomp was developed. Hosted on UFRGS server to allow online access, the software offers many models to compute mechanical properties of composite materials with long or short fibers, unidirectional or randomly orientated. On the present work, the estimates made by the software were compared with experimental data for two cases, polyester resin composites reinforced by randomly disposed curauá or glass fibers. In both cases, the models used by the software showed good predictions of the mechanical behavior of the composite material.

**Keywords:** *Micromechanics, online Software, short-fibers, random orientation.*

### **Introdução**

Diferentemente de muitos metais e polímeros, a inserção do reforço no interior da matriz faz com que materiais compósitos com fibras orientadas adquiram caráter anisotrópico, por vezes idealizado como transversalmente isotrópico [1], criando simetria entre os dois planos perpendiculares à orientação preferencial da fibra. Devido a essa anisotropia, 13 parâmetros são necessários para a descrição completa do comportamento mecânico de materiais compósitos (quatro constantes de engenharia, cinco parâmetros de resistência, dois coeficientes de expansão térmica e dois coeficientes higrotérmicos), mas a determinação experimental de todos esses parâmetros demanda muito tempo e um alto custo [2].

Neste trabalho propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e cisalhamento foram medidos experimentalmente para compósitos com resina de poliéster reforçados com fibra de vidro ou fibra de curauá, curtas e aleatoriamente dispersas, e comparados com os resultados gerados utilizando diversos modelos da micromecânica provenientes da literatura [1-5], que partem das propriedades da resina e do reforço tomadas individualmente e do volume de reforço no material compósito para calcular as propriedades resultantes.

### Software MECH-Gcomp

Atualmente existem diversos programas capazes de prever as propriedades mecânicas para materiais compósitos de fibras longas e unidirecionais, no entanto nenhum deles foi escrito em português, alguns são caros, mesmo para licenças acadêmicas. Outra desvantagem dos demais programas está no fato de muitos deles possuírem apenas uma abordagem para o cálculo de cada propriedade, sem permitir que o usuário saiba o conteúdo ou autoria das equações envolvidas. Para a criação do MECH-Gcomp foi feita uma vasta pesquisa na literatura, onde foram incluídos diversos modelos, buscando sempre informar ao usuário o autor de cada equação.

Outro importante diferencial do MECH-Gcomp está em não se limitar a compósitos de fibras longas e unidirecionais. Ele também é capaz de prever o comportamento de compósitos constituídos de fibras curtas ou longas com arranjo unidirecional ou aleatório, além de compósitos reforçados por partículas [6].

O *software* está hospedado no servidor da UFRGS e pode ser acessado através de [www.ufrgs.br/mechg](http://www.ufrgs.br/mechg), não necessitando instalar qualquer programa, sendo apenas requisitado um cadastro. O MECH-Gcomp conta também com um banco de dados de fibras e matrizes, sendo facultado ao usuário ainda a inserção de novos materiais. A programação e os cálculos (back-end) são escritos com a linguagem de programação Python, utilizando o framework Django, já para as funcionalidades que envolvem banco de dados é utilizado o sistema MySQL.

Na seção de fibras curtas unidirecionais, utiliza-se o modelo de Halpin-Tsai retirado de [7] para o cálculo dos módulos de elasticidade nas direções paralela ( $E_1$ ) e perpendicular à fibra ( $E_2$ ), como apresentado na Eq. 1.

$$E_1 = E_m \left( \frac{1 + 2 \left( \frac{l_f}{d_f} \right) \eta_1 V_f}{1 - \eta_1 V_f} \right) \quad \text{e} \quad E_2 = E_m \left( \frac{1 + 2\eta_2 V_f}{1 - \eta_2 V_f} \right) \quad (1)$$

Onde  $V_f$  é o volume de reforço no compósito,  $l_f$  e  $d_f$  são o comprimento e diâmetro da fibra, respectivamente. As variáveis  $\eta_1$  e  $\eta_2$  são dadas pela Eq. 2.

$$\eta_1 = \frac{\left( \frac{E_f}{E_m} \right) - 1}{\left( \frac{E_f}{E_m} \right) + 2 \left( \frac{l_f}{d_f} \right)} \quad \text{e} \quad \eta_2 = \frac{\left( \frac{E_f}{E_m} \right) - 1}{\left( \frac{E_f}{E_m} \right) + 2} \quad (2)$$

Onde  $E_m$  e  $E_f$  são os módulos de elasticidade da matriz e fibra, respectivamente.

Para compósitos de fibras curtas aleatórias uma abordagem é proposta por Lavengood e Goettler retirada de [8] para a determinação do módulo de elasticidade ( $E$ ), módulo de cisalhamento ( $G$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do compósito resultante a partir de  $E_1$  e  $E_2$ , mostrada na Eq. 3.

$$E_{Halpin} = \frac{3}{8} E_1 + \frac{5}{8} E_2, \quad G_{Halpin} = \frac{1}{8} E_1 + \frac{1}{4} E_2 \quad \text{e} \quad \nu_{Halpin} = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3)$$

Também foram utilizados os modelos de Manera e Pan obtidos a partir de De & White [9] para o cálculo das constantes  $E$ ,  $G$  e  $\nu$ , conforme as Eqs. 4-5.

$$E_{Manera} = \left( \frac{16}{45} E_f + 2E_m \right) V_f + \frac{8}{9} E_m, \quad G_{Manera} = \left( \frac{2}{15} E_f + \frac{3}{4} E_m \right) V_f + \frac{1}{3} E_m \quad \text{e} \quad (4)$$

$$\nu_{Manera} = \frac{1}{3}$$

$$E_{Pan} = E_f \frac{V_f}{\pi} + \left( 1 - \frac{V_f}{\pi} \right) E_m, \quad \nu_{Pan} = \frac{V_f}{\pi} \nu_f + \left( 1 - \frac{V_f}{\pi} \right) \nu_m \quad \text{e} \quad G_{Pan} = \frac{E}{2(1 + \nu_{Pan})} \quad (5)$$

Onde  $\nu_m$  é o coeficiente de Poisson da matriz e  $\nu_f$  é o coeficiente de Poisson da fibra.

É importante salientar que a abordagem proposta por Manera é válida somente para  $V_f \leq 40\%$ ,  $2 \text{ GPa} \leq E_m \leq 4 \text{ GPa}$  e  $\nu \approx 0,4$ , o que está de acordo com as propriedades dos compósitos aqui analisados.

## Metodologia

### Materiais

- Resina poliéster Arazyn 13.0 da Ara Ashland;
- Iniciador AAP (peróxido de acetil-acetona);
- Mantas de fibra de vidro-E (gramatura =  $300 \text{ g/m}^2$ ) da Owens Corning, com fibras de comprimento de 50 mm e diâmetro de 14  $\mu\text{m}$ ;
- Fibra de curauá: As fibras, provenientes da região Norte do Brasil com diâmetro médio de 60  $\mu\text{m}$ , foram desembaraçadas, cortadas no comprimento de 50 mm e imersas em água destilada por 1 h para remover sujidades, tais como graxa e poeira. As fibras foram então secas por 1 h a 100 °C em estufa com circulação de ar. As mantas foram subsequentemente produzidas com fibras curtas de curauá distribuídas de modo manual, homogêneo e aleatório.

### Moldagem dos compósitos e caracterização

A resina foi misturada com 1,5% em massa de peróxido e degasada em um banho de ultrassom por 5 min. As mantas foram inseridas na cavidade interna do molde metálico ( $170 \times 170 \times 20 \text{ mm}$ ) sendo que no compósito de fibra de vidro foram oito mantas e no caso do de curauá foi somente uma, e entre as mantas a resina poliéster tratada foi vertida. Em seguida foi aplicada uma carga de 2,6 ton por 70 min a 90 °C, e após foi realizada pós-cura dos compósitos em uma estufa com circulação de ar a 80°C/1,5 h. Conhecendo a quantidade mássica real de fibra dos compósitos e a massa dos compósitos concluiu-se que o % $V_f$  do curauá é 30% e do vidro 37% (valores utilizados como *inputs* do *software*).

Em virtude de fatores como a quantidade e dimensões da amostra (2 amostras/dimensões:  $100 \times 15 \times 2,9 \text{ mm}$ ) e coeficiente de variação dos resultados obtidos, optou-se pelo ensaio não destrutivo *Sonelastic* [10] ao invés de ensaios mecânicos tradicionais para obtenção das propriedades elásticas. O *Sonelastic* é um equipamento composto de um excitador (equipamento que aplica o impacto no corpo de prova para gerar as vibrações mecânicas, sem danificá-lo) e um microfone (que capta a resposta acústica e a transforma em sinal elétrico de maneira que se possa ler as frequências de ressonância), e gerar os resultados de módulo em cisalhamento, tração e coeficiente de Poisson para materiais isotrópicos. O ensaio foi realizado de acordo com a ASTM E-1876 [11].

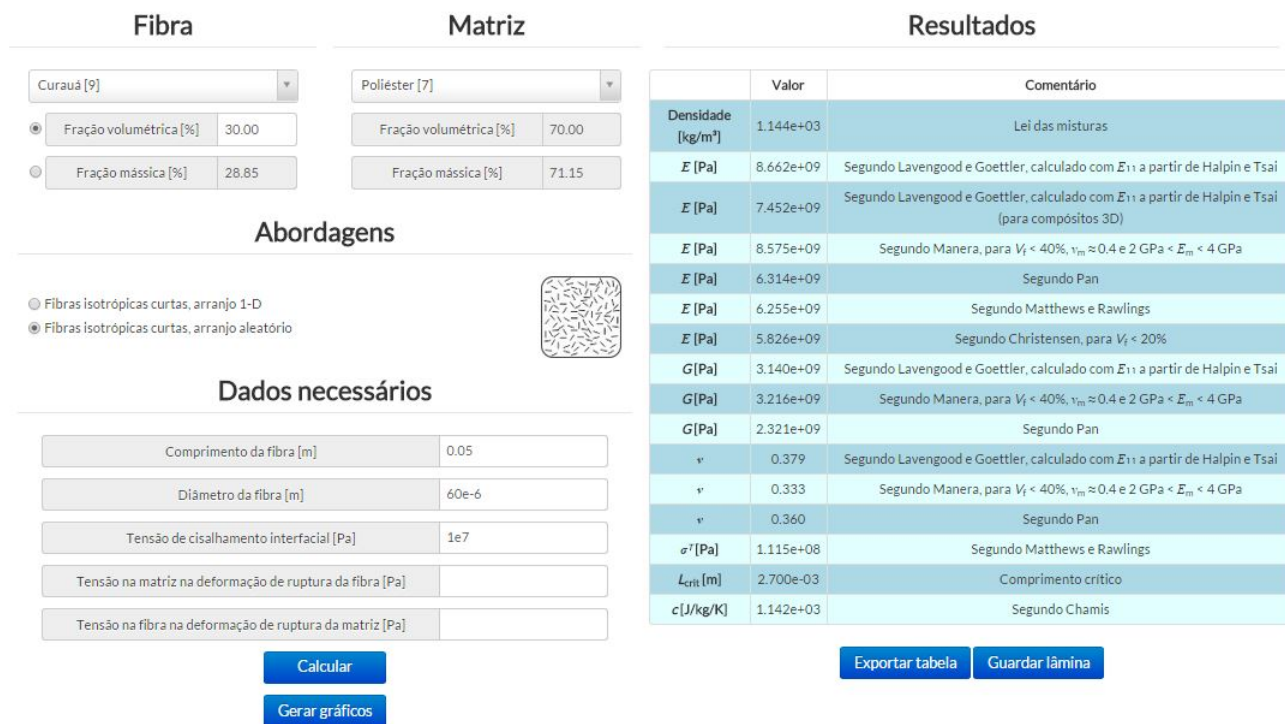
### Dados Software

As propriedades da fibra de vidro utilizadas para os cálculos no *software* foram retiradas de [2] ( $E = 85 \text{ GPa}$ ) e da base de dados do *software* Autodesk Simulation Composite Design® ( $\nu = 0,20$ ). Os dados da resina de poliéster foram obtidos de Farias et al. [12] ( $E = 3,18 \text{ GPa}$  e  $\nu = 0,38$ ). Para os dados da fibra de curauá é importante salientar a grande variação que ocorre devido ao fato de se tratar de uma fibra vegetal. Um estudo da variação do módulo de elasticidade em função do

diâmetro e comprimento da fibra foi realizado por Tomczak et al. [13], determinando uma variação de 30 a 96 GPa em função do diâmetro, e 26 a 52 GPa em função do comprimento. Foram utilizados neste trabalho os valores encontrados em Spinacé et al. [14], cujo módulo de elasticidade foi de 36 GPa. O coeficiente de Poisson da fibra de curauá não foi encontrado na literatura. Então, neste trabalho, foi utilizado para esta propriedade o valor do coeficiente de Poisson da fibra de sisal ( $\nu = 0,17$ ) [15].

## Resultados e Discussão

A Fig. 1 mostra a interface com os resultados gerados pelo MECH-Gcomp, onde foram utilizados os módulos de elasticidade para compósitos 2D. É possível verificar também que o comprimento escolhido da fibra ultrapassou o comprimento crítico, também calculado pelo *software*.



**Figura 1** – Tela com os outputs fornecidos pelo programa MECH-Gcomp para o compósito com fibra de curauá.

A Tabela 1 compara os resultados do *software* com os obtidos experimentalmente para reforços de vidro e curauá.

**Tabela 1** – Comparação entre resultados obtidos para os compósitos para os diferentes modelos

Propriedades	Fibra de Curauá			Fibra de Vidro		
	E (MPa)	G (MPa)	$\nu$	E (MPa)	G (MPa)	$\nu$
Experimental	8360	2590	0,330	17640	6140	0,350
Halpin-Tsai	8662	3140	0,379	17880	6290	0,421
Manera	8575	3216	0,333	16740	6279	0,333
Pan	6314	2321	0,360	13160	4842	0,359

Analisando a Tabela 1 pode-se notar que os modelos do *software*, a exceção de Pan, superestimou as propriedades do compósito, o que pode ser explicado devido à não consideração do teor de vazios nas equações utilizadas, sendo esta quantidade significativa quando se trata de moldagem por compressão, e pela estimativa em relação às propriedades das fibras e matriz, visto que as propriedades dos constituintes individuais não foram mensuradas e sim obtidas da literatura.

### Conclusões

Embora seja uma ferramenta rápida e prática, o uso da teoria da micromecânica depende de muitos dados de difícil aquisição via métodos experimentais, como propriedades individuais da fibra e da matriz, o que faz com que sua resposta nem sempre seja precisa. Nos casos analisados, a teoria de Halpin-Tsai reproduziu com grande precisão os módulos de elasticidade de ambos os compósitos, mas apresentou divergência em relação ao coeficiente de Poisson medido experimentalmente, cujo valor foi reproduzido apenas pelo modelo de Manera. Já o módulo de cisalhamento foi previsto com razoável precisão por Manera e Halpin-Tsai apenas para a fibra de vidro.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o auxílio na condução de ensaios experimentais fornecidos pela empresa ATCP Engenharia, e à UFRGS pelas bolsas de graduação associadas.

### Referências Bibliográficas

1. S. W. Tsai; H. T. Hahn in *Introduction to Composite Materials*, Technomic Publishing Company, Pennsylvania, 1980.
2. A. K. Kaw in *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis, New York, 2006
3. I. M. Daniel; O Ishai in *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, New York, 1994.
4. E. J. Barbero in *Introduction to Composite Materials Design*, Taylor & Francis, New York, 1999.
5. G. Eckold in *Design and Manufacture of Composite Structures*, Woodhead Publishing, Cambridge, 1994.
6. C. C. Angrizani; S. C. Amico; A. A. Muller in Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá, 2014.
7. S. K. De; J. R. White in *Short-fibre polymer composites*, Woodhead Publishing, Cambridge, 1996.
8. S. Y. Fu; B. Lauke; Y. W. May in *Science and engineering of short fibre reinforced polymer composites*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2009.
9. N. Pan. *Sci Eng of Comp Mat*, 1995, 5, 63.
10. Manual do equipamento *Sonelastic* da ATCP, disponível em <<http://www.atcp.com.br/imagens/produtos/sonelastic/manuais/Folder-Sonelastic.pdf>> Acessado em 20/04/2015.
11. ASTM E1876, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, ASTM International American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2009.
12. M. A. Farias; M. Z. Farina; A. P. T. Pezzin; D. A. K. Silva *Mater Sci Eng C*, 2008, 29, 510.
13. F. Tomczak; K. G. Satyanarayana; T. H. D. Sydenstricker, *Comp: Part A*, 2007, 38, 2227.
14. M. A. S. Spinacé; C. S. Lambert; K. K. G. Feroselli; M. A. Paoli *Carb Poly*, 2009, 77, 47.
15. S. Rao; K. Jayaraman; D. Bhattacharyya, *Comp: Part B*, 2012, 43, 2738.