



13º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS



NATAL - RN  
18 a 22 de outubro de 2015

## ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE VIGA DE COMPÓSITO CARBONO/EPÓXI SUBMETIDA À FLEXÃO DE TRÊS PONTOS

Eduardo F. Kerche(IC)<sup>1\*</sup>, Fernanda W. da Silva(IC)<sup>1</sup>, Maikson L. P. Tonatto(D)<sup>1</sup>, Laís V. da Silva (D)<sup>1</sup>, Rafael S. Trindade(D)<sup>1</sup>, Sandro C. Amico<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GCOMP/LAPOL, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre – RS, \*E-mail: “[eduardo.fkerche@gmail.com](mailto:eduardo.fkerche@gmail.com)”

**Resumo:** Materiais compósitos poliméricos vêm sendo desenvolvidos para aplicações em engenharia. A produção de uma viga para aplicação principalmente na área da construção civil, pode viabilizar a obtenção de produtos de baixo peso, por um processo simples e largamente difundido na indústria. Foi utilizado o método numérico por elementos finitos para projeto da viga, no qual foi definido como carga de flexão na região central e as condições de contorno foram definidas como duas extremidades biapoeadas, definindo-se três tipos de critérios de falha: Tsai-Hill, Tsai-Wu e de máxima tensão. Para definição das constantes elásticas foram feitos ensaios de tração e de compressão em máquina universal de ensaios. Concluiu-se que a viga projetada e fabricada por infusão a vácuo com 12 camadas de tecido unidirecional de fibra de carbono e massa 1,54 kg, apresentou uma diferença mínima de 4% entre o modelo numérico e experimental, comprovando boa compatibilidade entre os métodos.

**Palavras-chave:** Viga, Materiais compósitos poliméricos, Infusão a vácuo, Análise por elementos finitos.

### *Experimental and numerical analysis of carbon/epoxy composite beams subjected to a three-point bending load*

**Abstract:** Polymeric composite materials have been developed for applications in engineering. The production of a beam for use mainly in the construction area, may facilitate the attainment of low weight's products for a simple and widespread industry's process. It was used the finite element numerical method for beam design in which was defined as bending load applied to the 100 kN model and the boundary conditions were defined as two fixed ends defining three types of failure criteria: Tsai -Hill, Tsai-Wu and maximum tensile. To define the elastic constants were made tests of tensile and compression in universal testing machine. It was concluded that the projected beam and made by vacuum infusion requires 12 layers of unidirectional carbon fiber fabric to obtain the estimated approximate charge which is 44,5 kN with a mass of 1,540 kg.

**Keywords:** Beam, polymeric composite materials, vacuum infusion, finite element analysis.

### **Introdução**

Materiais poliméricos reforçados vêm crescendo em utilização nos últimos anos e têm se mostrado materiais inovadores e, em alguns casos, são considerados de alta tecnologia. Este tipo de material é muito utilizado especialmente quando são necessárias estruturas leves e de fácil processabilidade [1]. O processo de infusão a vácuo é utilizado para a laminação de peças com alto grau de qualidade e é considerado como método de baixo custo para a fabricação de peças de polímeros reforçados com fibras contínuas [2]. A utilização de softwares de simulação para prever determinadas propriedades vem crescendo muito nos últimos anos e tem grande importância em projetos de perfis específicos. Para estabelecer a falha de materiais compósitos, existem diversos critérios de falha disponíveis na literatura, dentre os mais utilizados estão: o Tsai-Hill [3], Tsai-Wu [4] e o de máxima tensão. Esse trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de uma viga fabricada por material compósito de fibra de carbono com perfil quadrado e submetido ao carregamento de flexão em três pontos. Foi desenvolvido um modelo numérico utilizado na determinação da configuração e dos materiais da viga e conseqüentemente a previsão da falha. Para definição das constantes

elásticas foram produzidas placas de compósito com as mesmas características da viga e foram feitos ensaios de tração e de compressão. O modelo foi validado por ensaio de um protótipo de viga.

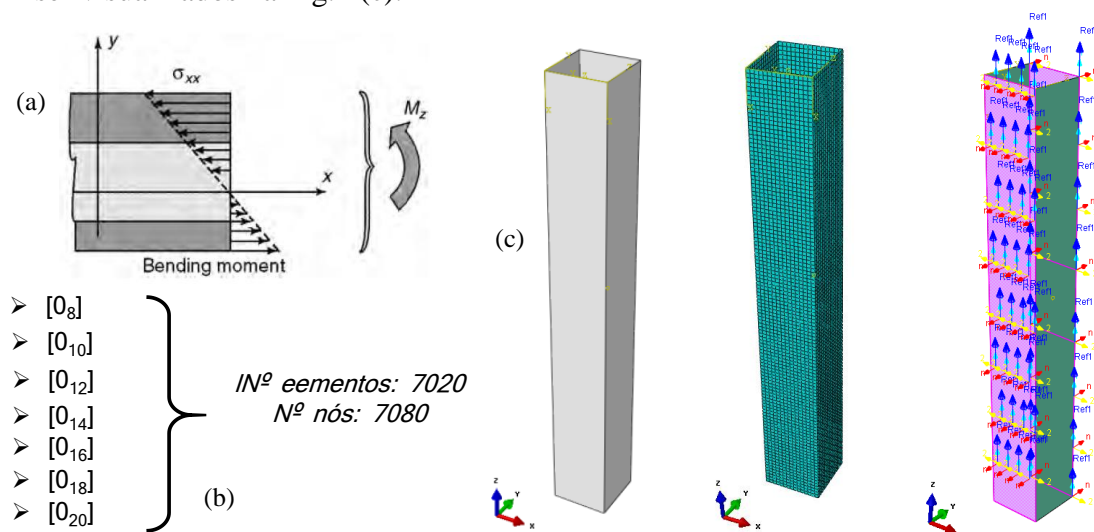
**Procesimento experimental**

### Caracterização dos materiais

Foram realizados ensaios de tração, conforme norma ASTM D3039 [5], e compressão, conforme ASTM D6641 [6], na máquina Instron 3382, para verificar as constantes elásticas e propriedades mecânicas do compósito utilizado no protótipo. Todos os corpos de prova foram retirados e ensaiados na direção longitudinal da fibra (direção 1) e, com base nesses resultados, foram encontradas as propriedades nas demais direções por análise micromecânica. Os corpos de prova foram produzidos com de fibra de carbono unidirecional e resina epóxi, moldados por infusão.

### Modelo numérico

Foram feitas simulações numéricas, por meio do software Abaqus/CAE 6.13, para avaliar o comportamento do protótipo e foi aplicada uma carga de flexão de 100 kN no centro da viga e biapoada nas extremidades. Foi utilizada uma seção transversal com lados de  $76 \times 76$  mm e o comprimento foi de 584,2 mm. O elemento selecionado para previsão falha está localizado nas camadas externas da viga, onde localiza-se a tensão máxima, como mostra a Fig. 1(a). Considerou-se uma geometria não linear, deformações elevadas e desbalanceadas conforme esperado. O modelamento da viga foi feito como do tipo casca, com camadas de compósito como ortotrópicas e malha com elementos lineares S4R. O número de elementos utilizados foi 7020 e de nós 7080. Foram analisadas vigas com as camadas alinhadas a  $0^\circ$  (longitudinal a viga) e variando-se o número de camadas de 8 a 20, como mostra Fig. 1(b). O modelo de casca, malha e orientação das camadas podem ser visualizados na Fig. 1(c).

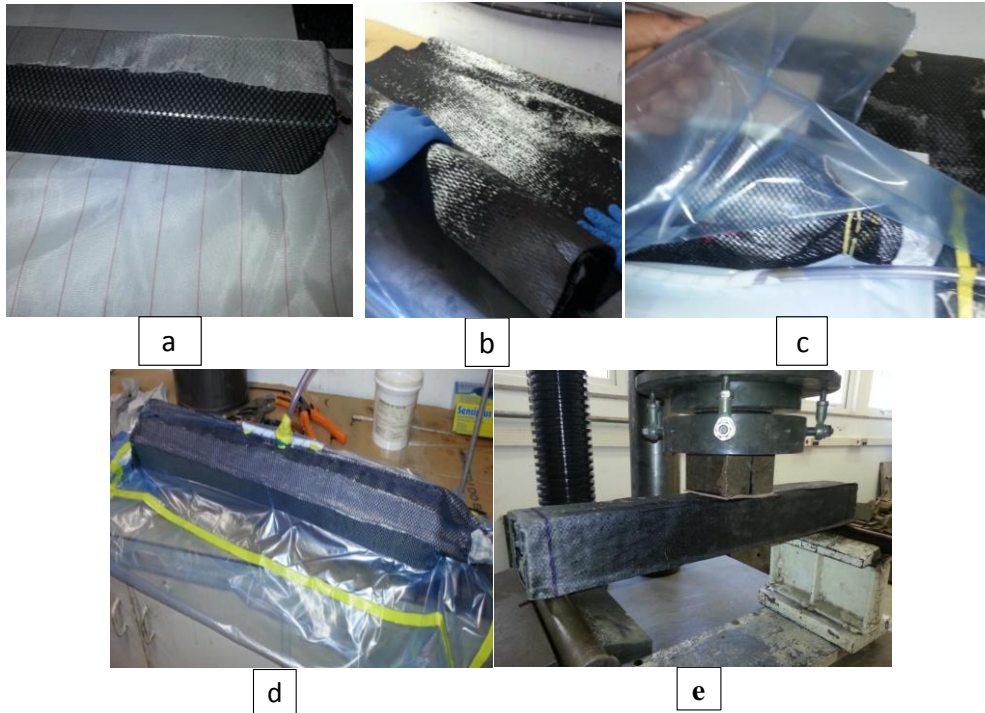


**Fig. 1:** (a) Distribuição de tensões em uma viga solicitada mecanicamente em flexão, (b) layout das camadas analisadas e (c) modelo numérico do tipo casca.

### Protótipo de viga e ensaio de flexão

Após a análise estrutural, os protótipos da viga foram confeccionados com 12 camadas orientadas a  $0^\circ$  de tecido unidirecional de fibra de carbono CVU 334 HM (T300)/Texiglass e epóxi AR-260/Barracuda, por meio do processo de infusão a vácuo, pesando 1,540 kg. O protótipo foi produzido com  $76 \times 76$  mm de seção transversal e 610 mm de comprimento. A Fig. 2(a-d) mostra o passo-a-passo utilizado na fabricação do protótipo. Após cura da peça, durante 48 horas, em temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ), tem-se a pós-cura, a qual é feita em estufa, durante 4 horas a  $60^\circ\text{C}$ , seguida da desmoldagem do molde de alumínio. A Fig. 2(e) mostra a caracterização do protótipo

por meio de ensaios de flexão em três pontos, conforme norma ASTM 7249 [7], utilizado-se um espaçamento entre apoios de 584,2 mm.



**Fig. 2:** (a) Aplicação de peel ply, (b) 12 camadas de tecido unidirecional, (c) fechamento do molde, (d) aplicação de resina com vácuo e (e) ensaio de flexão.

## Resultados e Discussão

### *Constantes elásticas e propriedades de resistência ensaiadas*

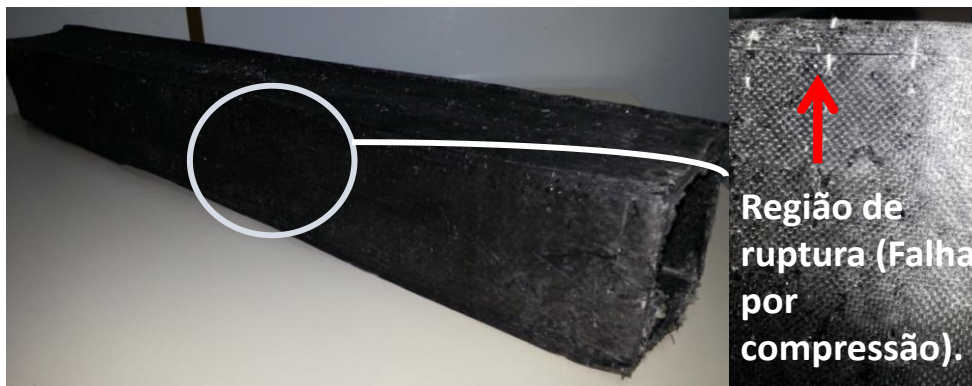
A Tabela 1 mostra as propriedades mecânicas, obtidas pelos ensaios de tração e compressão na direção 1, por análise micromecânica nas demais direções. Observou-se propriedades com coerência e bastante semelhantes as típicas de um tecido unidirecional, onde nota-se que, na direção longitudinal a fibra, o módulo de elasticidade é cerca de 92,4% mais elevado que na direção transversal a fibra. A resistência na direção longitudinal a fibra na compressão é significativamente inferior, cerca de 29%, em relação a resistência na direção longitudinal a fibra em tração.

**Tabela 1:** Propriedades mecânicas obtidas por análise de micromecânica.

<b><i>Propriedade</i></b>	<b><i>Valor</i></b>
<b><i><math>E_{1,t} = E_{1,c}</math> (GPa)</i></b>	107,2
<b><i><math>E_{2,t} = E_{2,c}</math> (GPa)</i></b>	8,1
<b><i><math>G_{12}</math> (GPa)</i></b>	3,1
<b><i><math>\nu_{12}</math></i></b>	0,32
<b><i><math>\sigma_{1,t}</math> (MPa)</i></b>	1575,0
<b><i><math>\sigma_{2,t}</math> (MPa)</i></b>	68,2
<b><i><math>\sigma_{1,c}</math> (MPa)</i></b>	457,8
<b><i><math>\sigma_{2,c}</math> (MPa)</i></b>	102,3
<b><i><math>\tau_{12}</math> (MPa)</i></b>	91,2

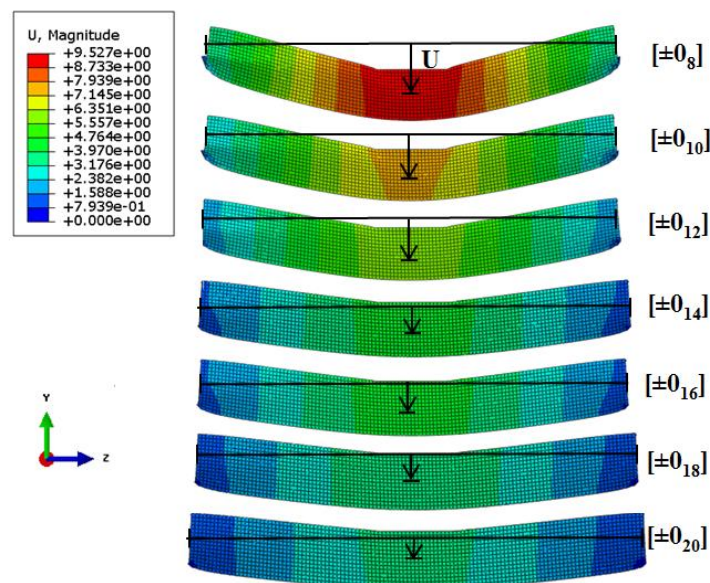
### Ensaio de flexão: modelo numérico vs modelo experimental

A Fig. 3 mostra a imagens do protótipo da viga após o ensaio de flexão, onde observa-se a falha na região superior da viga, ou seja, na região com presença de tensões compressiva. A carga de ruptura no modelo experimental, para resistência a flexão em três pontos, encontrada foi de 42,4 kN e a deflexão máxima na carga de ruptura foi de 12,3 mm.



**Fig. 3:** Protótipo de viga ensaiado e o detalhe da falha.

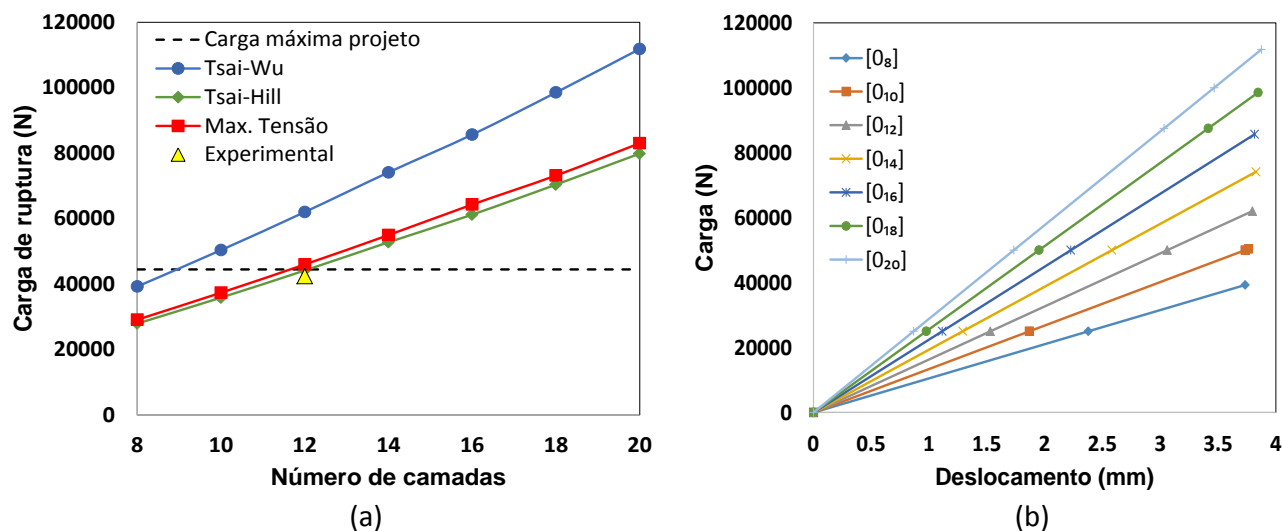
Na Fig. 4 tem-se a distribuição de deslocamento da viga, representada pela variável *displacement* (U), para diferentes números de camadas de fibra de carbono com resina epóxi. Observa-se que o deslocamento (flecha) para uma carga de 100kN é aproximadamente 9,5 mm e 3,5 mm para 8 e 20 camadas, respectivamente. A viga com 12 camadas apresenta uma flexa de aproximadamente 6,1 mm.



**Fig. 4:** Deslocamento da viga para uma carga de 100 kN.

A Fig. 5 (a) mostra curva da variação da carga de ruptura em função do número de camadas para os critérios de falha analisados. Observa-se que para o critério de Tsai-Wu, a carga de ruptura foi maior quando comparado aos outros critérios e os demais critérios apresentam resultado mais próximo do experimental. Para o tecido unidirecional de fibra de carbono com resina epóxi, seria necessário utilizar no mínimo 12 camadas para a ruptura próxima a 44,5 kN. A diferença observada entre Tsai-Wu, Tsai-Will e máxima tensão com o experimental foi 46,3%, 4,0% e 7,9%, para a viga com 12 camadas, respectivamente. A Fig. 5(b) mostra a curva da variação da carga em flexão em função do

deslocamento no ponto central da viga. Nota-se que e para todas as vigas com diferentes números de camada, o deslocamento no ponto da ruptura é similar, aproximadamente 3,5 – 4,0 mm.



**Fig. 5:** Carga de ruptura versus número de camadas (a), carga versus deslocamento da viga (b).

### Conclusões

A moldagem por infusão apresentou um excelente processo para confecção deste tipo de componente, apresentando preenchimento completo do molde, garantindo um ótimo acabamento superficial e uma excelente qualidade. O modelo experimental apresentou uma carga de ruptura muito próxima da carga da carga de ruptura prevista no modelo numérico, o que prova a boa acurácia dos resultados encontrados. O critério de falha de Tsai-Hill apresentou melhor compatibilidade com os resultados experimentais, mostrando-se um ótimo critério para esse tipo de carregamento.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME/UFRGS), à empresa Petrobras e ao SAMPE-BRASIL pela oportunidade de desenvolvimento deste estudo.

### Referências Bibliográficas

1. Almaco. (2013). Quem somos. [Internet]. Acesso em 22 de dezembro de 2013.
2. ABMACO, *Compósitos I - Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências*. 1ª edição. São Paulo, 2009.
3. Stephen W. Tsai, NASA Contractor report, 1965, CR-244, 1-95.
4. Stephen W. Tsai, Edward M. Wu, Tsai, *Journal of composites materials*, 1971,5,58-80.
5. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
6. Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture.
7. Standard test method for facing properties of sandwich construction by long beam flexure.
8. Callister W.D.J.R. em *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. John Wiley & Sons, 2002.