



13º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS



NATAL - RN  
18 a 22 de outubro de 2015

## AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA INTERLAMINAR EM PERFIS CURVOS DE MATERIAL COMPÓSITO COM FIBRA DE CARBONO POR ENSAIO SHORT BEAM

Maikson L. P. Tonatto<sup>1\*</sup>(D), Eduardo Kerche<sup>1</sup>(IC), Maria M. C. Forte<sup>1</sup>, Sandro C. Amico<sup>1</sup>

1 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre – RS, [maikson.tonatto@ufrgs.br](mailto:maikson.tonatto@ufrgs.br)

**Resumo:** Este trabalho tem como objetivo investigar a resistência ao cisalhamento interlaminar de compósitos com fibra de carbono (FC) unidirecional com perfil curvo (diâmetro de curvatura: 581 mm) por ensaio *short-beam*. Duas amostras à base de resina epóxi/FC com seção transversal circular de 12,7 mm de diâmetro foram obtidas de espirais, fabricadas por processo de pultrusão e por enrolamento filamental. Uma terceira amostra à base de poli(sulfeto de fenileno)/FC (PPS/FC) com seção transversal quadrada de 11×11 mm<sup>2</sup> foi obtida de anel fabricado com fitas por processo de enrolamento filamental. Ambos espirais e o anel possuem diâmetro médio de 581 mm, com fibras orientadas paralelamente ao perfil. A amostra epóxi/FC do espiral e anel fabricado por pultrusão mostraram excelente resistência interlaminar com valor médio de 67,7 e 51,0 MPa. As demais amostras fabricadas por enrolamento filamental apresentaram valores de resistência interlaminar inferiores, 50,2 e 22,6 MPa.

**Palavras-chave:** Resistência ILSS, compósitos em fibra de carbono, ensaio de short-beam, delaminação.

### *Evaluation of interlaminar strength in curved profiles of carbon fiber composite material by Short beam test*

**Abstract:** This work investigates short-beam interlaminar shear strength of composite materials with unidirectional carbon fiber (CF) using a curved profile (curvature diameter: 581 mm). Two epoxy/CF composite samples of circular cross section (diameter: 12.7 mm) were obtained from spirals made by pultrusion process and by filament winding. A third sample, polyphenylene sulfide/CF (PPS/CF) composite, was obtained from a ring of square cross-section (11×11 mm<sup>2</sup>) produced by filament winding from tapes. The epoxy/FC spiral and ring samples manufactured by pultrusion showed excellent interlaminar strength with mean strength of 67.7 and 51.0 MPa. The other samples, manufactured by filament winding, showed inferior interlaminar strength values of 50.2 and 22.6 MPa.

**Keywords:** ILSS Strength; carbon fiber composites; short-beam test; delamination.

### Introdução

Dentre os diversos processos de fabricação de materiais compósitos, os de pultrusão e enrolamento filamental têm se destacado por possibilitar alta precisão no posicionamento da fibra, alto teor de fibras, baixo teor de vazios e automação de processos. Atualmente, anéis e espirais em compósito são fabricados por enrolamento filamental e também por pultrusão, como as amostras apresentadas na Fig. 1(a) e (b), respectivamente. No entanto, devido às características destes processos, verifica-se que peças curvas são de difícil fabricação, além do comportamento da estrutura ser altamente complexo.

A principal falha de laminados fabricados por enrolamento filamental em compressão diametral é a delaminação entre as camadas de anéis com fibras orientadas no sentido axial (0°), sendo esse o maior empecilho para esse tipo de carregamento [1,2]. Shekar [3] estudou o cisalhamento interlaminar de compósito de fibra de carbono reforçada com nanotubo de carbono e matriz epóxi, e Sánchez [4] avaliou a influência de diferentes tratamentos superficiais do nanotubo de carbono

produzidos por infusão na resistência interlaminar do compósito. Walter [5] analisou a resistência interlaminar de diferentes compósitos fabricados com tecidos e fez uma análise microscópica da falha. Nos três trabalhos relatados, foram utilizados corpos de prova com perfil reto. Por outro lado, Chen [6] fabricou e analisou uma nova matriz com boa aderência com o objetivo de melhorar a resistência interlaminar de anéis fabricados por enrolamento filamental.

Neste trabalho, amostras de seção curva de espirais e anel em compósito epóxi/FC fabricados por processo de pultrusão e de enrolamento filamental, e amostra de anel em poli(sulfeto de fenileno)/FC (PPS/FC) fabricados por enrolamento filamental foram avaliadas quanto à resistência interlaminar em ensaio de *short-beam*. Também foi feita uma análise da falha por microscopia óptica para averiguar o mecanismo de falha do compósito.

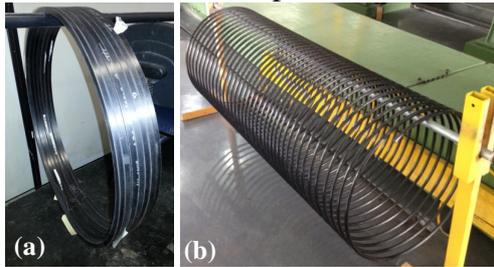


Fig. 1: Imagens de anéis (a) e espiral (b) em material compósito epóxi/FC.

## Experimental

### Materiais

As especificações das quatro amostras utilizadas no trabalho se encontram na Tab. 1. Três foram fabricadas em resina epóxi/FC e uma em PPS/FC. Duas amostras foram fabricadas em resina epóxi/FC, sendo uma retirada de espiral com seção transversal circular de 12,7 mm de diâmetro fabricados por processo de pultrusão (EC\_PU\_Es) e uma por processo enrolamento filamental (EC\_FW\_Es). Uma amostra foi retirada de um anel com seção transversal quadrada de 11×11 mm<sup>2</sup> fabricado com fitas pultrudadas de resina epóxi/FC com 1 mm de espessura e 11 mm de largura e entre as fitas um adesivo estrutural (EC\_PU\_An). A amostra em PPS/FC (PC\_FW\_An) foi retirada de um anel com seção transversal quadrada de 11×11 mm<sup>2</sup> fabricado a partir de fitas de PPS/FC por processo enrolamento filamental. Ambos espirais e anéis apresentam diâmetro médio de 581 mm e fibras orientadas paralelamente ao perfil (ou seja, a 0°).

Tab. 1: Especificação das amostras em resina epóxi/FC e PPS/FC

Amostras	Densidade do compósito Arquimedes - $\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )		Percentual de fibra (%)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
EC_PU_Es	1,49	0,01	61,3	0,6
EC_FW_Es	1,43	0,04	54,3	7,6
EC_PU_An	1,53	0,12	56,0	1,5
PC_FW_An	1,53	0,01	54,7	1,3

### Ensaio *short-beam*

Os ensaios de *short-beam* (ILSS) foram realizados em uma máquina de ensaios universal Instron 3382 de acordo com a norma ASTM D2344 [7]. Para todas as amostras utilizou-se distância entre apoios de 6xespessura do corpo de prova (CP). Foi aplicada uma carga P com monitoramento de uma célula de carga estática afim de proporcionar um carregamento de flexão no CP como no esquema mostrado na Fig. 2a. A velocidade de ensaio foi mantida em 1 mm/min até a falha da

amostra. A Fig. 2b mostra a imagem do CP durante a realização do ensaio. Para determinação da resistência interlaminar (*ILSS*) foi utilizada a Eq. 1:

$$F^{sbs} = 0,75 \times \frac{P_b}{A} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde,  $P_b$  é a carga máxima aplicada no corpo de prova, e  $A$  é a área da seção transversal. Para cada família, foram analisados cinco corpos de prova e determinado o valor médio da resistência.

Antes e após o ensaio, as amostras foram analisadas por microscopia ótica e microscópio para avaliar a característica dos constituintes do compósito e o modo de falha.

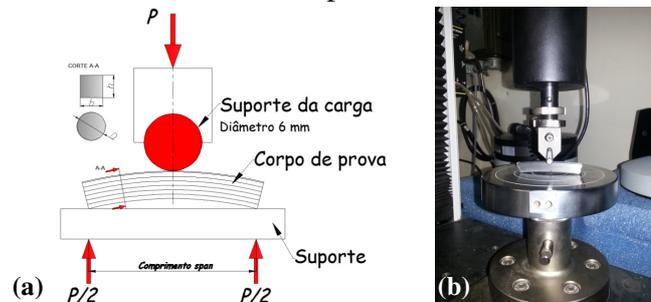


Fig. 2: Esquema ilustrativo (a) e imagem do CP durante ensaio *short-beam* (b).

## Resultados e Discussão

As amostras avaliadas diferem entre si quanto ao tipo de processo de fabricação empregado (pultrusão ou enrolamento filментар) ou tipo de matriz (termorrígida ou termoplástica). Duas amostras têm forma espiral e uma anelar. A Fig. 3(a-d) mostra, respectivamente, curvas típicas de força versus deslocamento das amostras em resina epóxi/FC dos espirais produzidos por pultrusão (EC\_PU\_Es), enrolamento filментар (EC\_FW\_Es) e anel produzido por pultrusão (EC\_PU\_An), e da amostra de PPS/FC produzida por enrolamento filментар (PC\_FW\_An).

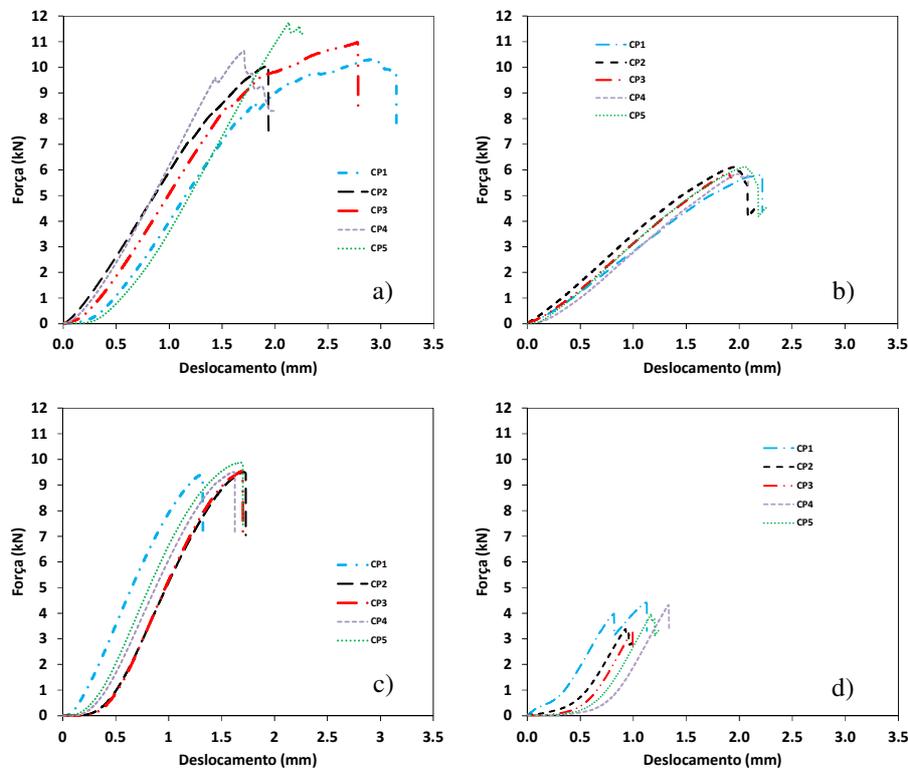


Fig. 3: Força versus deslocamento das amostras: (a) EC\_PU\_Es, (b) EC\_FW\_Es, (c) EC\_PU\_An e (d) PC\_FW\_An.

As amostras apresentam elevação gradual da carga no início da curva e posterior falha global. É possível observar que o espiral obtido por enrolamento filamentar apresentou menor variação no perfil das curvas, o que mostra que os corpos de prova desta amostra são mais homogêneos. A partir dos valores das curvas de força versus deslocamento das amostras, foi calculada a resistência *short-beam* de todas as amostras (Tab. 2). É possível verificar que a amostra do espiral e anel epóxi/FC fabricado por pultrusão (EC\_PU\_Es) e (EC\_PU\_An) apresentaram excelentes valores de resistência interlaminar com valor médio de  $67,7 \pm 3,7$  MPa e  $51,0 \pm 0,9$  MPa, respectivamente. A amostra do espiral fabricado por enrolamento filamentar (EC\_FW\_Es) apresentou valor de ILSS médio de  $38,1 \pm 1,8$  MPa, cerca de 44% inferior ao apresentado pela amostra EC\_PU\_Es. Tal decréscimo pode ser atribuído à diferença no percentual de fibra no espiral devido ao tipo de processo de fabricação, que também influencia o resultado de resistência *short-beam*. Para seção circular similar, o espiral fabricado por pultrusão apresenta maior compactação das fibras e menor quantidade de vazios do que o espiral fabricado por enrolamento filamentar. O anel em PPS/FC fabricado por enrolamento filamentar, apesar de ter seção transversal similar, apresentou resistência ainda menor, com valor médio de  $22,6 \pm 3,0$  MPa. Tal fato pode ser atribuído a uma baixa aderência entre as camadas que compõem o anel de seção quadrada, devido ao processo de fabricação, o que não se observa nos espirais já que estes não são produzidos em camadas.

Tab. 2: Resistência *short-beam* das amostras em resina epóxi/FC e PPS/FC

Amostras	Tipo de Processo	Força máxima (kN)		Resistência <i>short-beam</i> (MPa)	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
EC_PU_Es-espiral	Pultrusão	10,872	0,757	67,7	3,7
EC_FW_Es-espiral	Enrolamento filamentar	6,130	0,333	38,1	1,8
EC_Pu_An-anel	Pultrusão	9,567	0,183	51,0	0,9
PC_FW_An-anel	Enrolamento filamentar	3,879	0,522	22,6	3,0

#### Análise da falha por microscopia óptica

As Fig. 4 (a-d) mostra a imagem fotográfica da seção transversal das diferentes amostras. Nota-se que as amostras EC\_PU\_An (c) e PC\_FW\_An (d) apresentaram falha clara entre as camadas intermediárias e as amostras EC\_PU\_Es (a) e EC\_FW\_Es (b) apresentaram falha com ocorrência aleatória. A maior resistência da amostra EC\_FW\_Es (b) se deve ao tipo de processo de fabricação por pultrusão, o qual permite a formação de uma seção homogênea não apresentando camadas definidas de fibra, ou regiões ricas em resina, delineando domínios. Assim, não se observa processo de delaminação entre camadas de fibra no sentido do cisalhamento causado pelo carregamento em flexão.

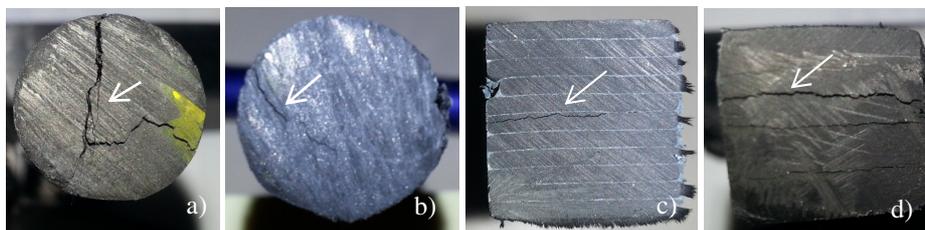


Fig. 4: Imagem macroscópica da seção transversal das amostras EC\_PU\_Es (a), EC\_FW\_Es (b), EC\_PU\_An (c) e PC\_FW\_An (d).

A Fig. 5 mostra as seções transversal das amostras antes e após a ocorrência da falha analisadas por microscopia óptica. É possível verificar que as fibras (região clara) estão alinhadas a  $0^\circ$  na amostra EC\_PU\_Es (Fig. 5a), e que há certa homogeneidade em todo o perfil, com grande parte das fibras impregnadas pela resina. Regiões mais escuras evidenciam a presença de vazios. A Fig. 5b mostra imagem mais aproximada da região da falha, na qual se verifica a aleatoriedade da falha visto anteriormente. A amostra EC\_FW\_Es apresenta maior número de vazios (regiões escuras) (Fig. 5c),

o que justifica a menor resistência quando comparada com a amostra EC\_PU\_Es, e a falha (Fig. 5d) é bastante similar à da amostra EC\_PU\_Es. Nas duas amostras à base de epóxi/FC não ocorre falha interlaminar propriamente dita, mas sim falha entre as fibras, o que dificulta a sua propagação sob esse tipo de carregamento. A amostra EC\_Pu\_An (Fig. 5e) apresenta baixa presença de vazios nas fitas pultrudadas e entre as fitas a presença do adesivo estrutural e a falha (Fig. 5f) ocorrida na região do adesivo estrutural. A amostra PC\_FW\_An apresenta menor quantidade de vazios (Fig. 5g) quando comparada a amostra EC\_FW\_Es, com falha ser tipicamente interlaminar (Fig. 5h).

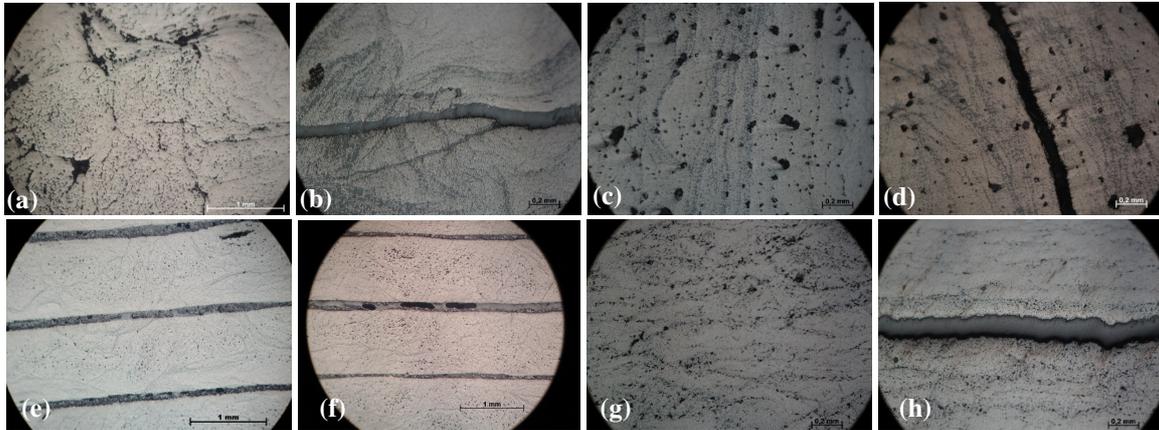


Fig. 5: MO das amostras antes e após a falha: EC\_PU\_Es (a, b); EC\_FW\_Es (c, d); EC\_Pu\_An (e, f); PC\_FW\_An (g, h).

## Conclusões

Este estudo revelou os valores de resistência interlaminar de perfis curvos fabricados com FC e diferentes resinas (epóxi e PPS), sendo estes na forma de espiral ou anel. O tipo de ensaio e o procedimento de ensaio adotados apresentaram boa acurácia, sendo possível avaliar comparativamente as amostras. As amostras ensaiadas do espiral fabricado por processo de pultrusão apresentaram melhor performance, o que indica a grande vantagem do processo pultrusão sobre o de enrolamento filamentar. Por outro lado, se o espiral estiver exposto ou for submetido a carregamentos de compressão diametral terá resistência 335% maior que o espiral ou anel fabricados tradicionalmente por enrolamento filamentar. A falha interlaminar é facilitada entre as lâminas ou camadas componentes do anel, o que não acontece nos espirais fabricados por ambos os processos já que os componentes (fibra e resina) nestes não apresentam camadas ou domínios bem definidos no sentido da tensão cisalhante causada pelo carregamento em flexão.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pelo apoio financeiro e desenvolvimento do projeto, e ao CNPq pelo suporte à pesquisa.

## Referências Bibliográficas

1. H. Mahfuz; A. Pal; M. Rahman; S. Jeelani in Anais de 12º International Conference on Composite Materials (ICCM-12), 1999, p. 9, 445.
2. S. L. Bazhenov *Composites*, 1995, v. 26, p. 757-765.
3. K. C. Shekar; B. A. Prasad; N. E. Prasad in Anais de 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014), 2014. p. 1336 – 1343.
4. M. Sánchez; M. Campo; A. Jiménez-Suárez; A. Ureña *Composites: Part B*, 2013, v. 45, p. 1613–1619.
5. T. R. Walter; G. Subhash; B.V. Sankar; C. F. Yen *Composites Science and Technology*, v. 70, 2010, p. 2190–2197.
6. W. Chen; Y. Yu; P. Li; C. Wang *Composites Science and Technology*, 2007, v. 67, p. 2261–2270.
7. Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates. ASTM International. West Conshohocken, p. 8. 2013. (ASTM D2344/D2344M).