

15º Congresso Brasileiro de Polímeros  
27 a 31 de outubro de 2019

## EFEITO DA RAZÃO COMPRIMENTO:ESPESSURA NA RESISTÊNCIA SHORT-BEAM DE LAMINADOS UNIDIRECIONAIS DE PERFIL CURVO

Vinicius F. A. Drago<sup>1\*</sup>, Maikson L. P. Tonatto<sup>2</sup> e Sandro C. Amico<sup>1</sup>

1 - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS  
vfadrg@gmail.com

2 - Campus de Cachoeira do Sul, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Cachoeira do sul, RS

**Resumo:** Realizou-se uma análise experimental acerca do desempenho de compósitos unidirecionais curvos de *poli* (sulfeto de p-fenileno) reforçados com fibras de carbono quando submetidos a ensaios de cisalhamento *short-beam*. Investigou-se o efeito de cinco diferentes razões entre comprimento e espessura e os resultados apontam que quanto menor o comprimento das amostras, maior a resistência *short-beam*. Os ensaios ocasionaram delaminação do compósito e falha por cisalhamento interlaminar, sendo que em maiores comprimentos verificou-se uma combinação de mecanismos de falha entre flexão e cisalhamento interlaminar, inviabilizando a aplicação do modelo proposto. As amostras de razão de comprimento 4 apresentaram resultados coerentes e falha predominantemente por cisalhamento, acarretando em um valor de resistência *short-beam* mais próximo à tensão de cisalhamento interlaminar do compósito PPS/FC.

**Palavras-chave:** *Compósitos termoplásticos, resistência short-beam, laminados curvos, poli* (sulfeto de p-fenileno).

### *Effect of length:thickness ratio on the short-beam strenght of curved profile unidirectional laminates*

**Abstract:** An experimental analysis on the behavior of curved profile carbon fiber/polyphenylene-sulfide composites was conducted through the short-beam test. The effect of five different length to thickness ratios on the short-beam strenght of the laminate was investigated and results showed that short-beam strenght decreases with the incremente of lenght:thickness ratio. It was observed that the tests produced interlaminar shear failure, but significant results for short beam strenght could be obtained only for the smallest specimen, because of the flexural stress observed for large specimens, that generated mixed failure modes, such as flexure along with shear. The ratio 4 tested specimens presented almost pure shear, wich make the results more reliable to estimate the interlaminar shear strength of the curved PPS/FC composite.

**Keywords:** *Thermoplastic composites, short-beam strenght, curved laminates, polyphenylene sulfide.*

### **Introdução**

Compósitos termoplásticos estruturais curvos são encontrados em *risers* e mangotes de transferência de óleo, longarinas das asas de aviões e pás de turbinas eólicas, situações em que baixo peso aliado à resistência a ambientes severos são determinantes [1-3]. Dentre os termoplásticos de engenharia, tem-se o *poli*(sulfeto de p-fenileno) (PPS), um polímero semi-cristalino, tolerante à chamas, quimicamente resistente e que sob altas temperaturas é capaz de manter sua estabilidade dimensional e resistência mecânica [4,5]. Fibras de carbono (FC) são comumente utilizadas como reforço para este tipo de matriz, porém a resistência dos compósitos de PPS/FC é sempre menor que aquela calculada teoricamente [6].

Delaminação é um modo de falha comum observado em laminados e é essencial na avaliação da durabilidade e da tolerância à danos de compósitos estruturais [7]. Dessa maneira, a correta determinação da resistência ao cisalhamento interlaminar ganha importância ao passo que materiais convencionais passam a ser preteridos a partir da crescente utilização de compósitos.

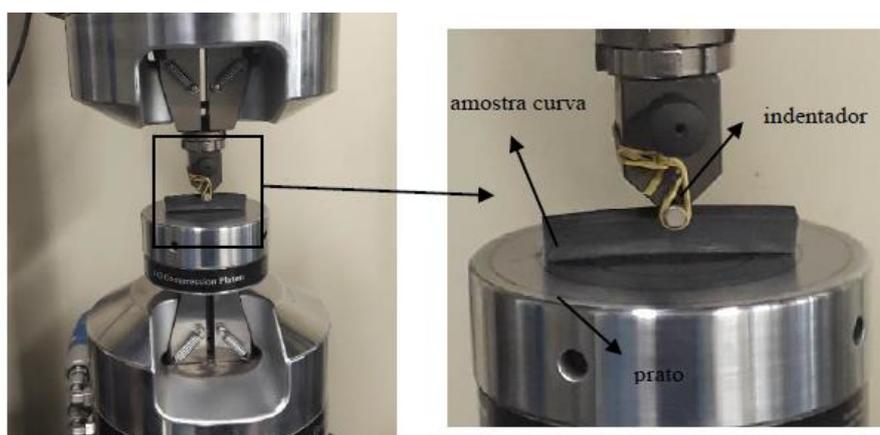
O ensaio de *short-beam* (SBS) consiste em um ensaio de flexão três pontos para avaliar a resistência aparente ao cisalhamento interlaminar, onde uma amostra de pequenas dimensões é submetida ao carregamento de modo que a tensão de cisalhamento ocasione a falha interlaminar em seu plano central [8]. Todavia, ocorre que o modelo clássico utilizado para obtenção da resistência *short-beam* desconsidera, que no carregamento em 3 pontos, além dos planos centrais do corpo de prova a distribuição de tensões difere substancialmente do previsto, apresentando picos de tensão nos suportes e na área de contato com o cilindro, o que não ocasiona em um estado de cisalhamento equiaxial e resulta em outros modos de falha como flexão, compressão e trincas transversais à direção do plano do laminado. [9,10].

Pouco se encontra na literatura acerca desse comportamento quando se trata de laminados curvos, especialmente de matriz termorrígida. Além disso, o efeito do comprimento e espessura ainda não é bem entendido. Sendo assim, neste trabalho é proposto a utilização de corpos de prova com diferentes razões de comprimento: espessura (s:h), de modo a investigar as possíveis diferenças no comportamento mecânico do laminado curvo de PPS/FC.

## Experimental

### *Materiais e Métodos*

As amostras utilizadas nos ensaios *short-beam* foram retiradas de um anel com seção transversal quadrada de  $11 \times 11 \text{ mm}^2$  fabricado a partir de fitas de PPS/FC por processo enrolamento filantar ou *filament winding*. Os anéis possuem diâmetro médio de 581 mm e fibras orientadas a  $0^\circ$  (sentido de fabricação dos anéis). Com uma serra fita retirou-se corpos de prova de perfil curvo, com razão s:h (s=comprimento; h=espessura) variável de 4, 6, 8, 10 e 12 vezes a espessura dos anéis. Para cada comprimento, cinco amostras foram produzidas. Uma imagem do perfil curvo durante o teste pode ser observada na Fig. 1.



**Figura 1- Amostra utilizada durante o ensaio *short-beam***

O ensaio SBS foi realizado em uma máquina servo hidráulica *MTS Landmark*, conforme os métodos previstos na norma ASTM D2334 [8], que estabelece a metodologia para ensaios de amostras curvas. As amostras de diferentes comprimentos foram posicionadas na superfície de um prato plano e para aplicação da força utilizou-se um indentador com 6 mm de diâmetro e uma célula de carga de 100 kN, em que ajustou-se a velocidade de deslocamento em 1

mm/min. Atentou-se para que as amostras curvas deslizassem sobre os pratos a fim de promover o esforço de flexão dos corpos de prova. Assim, realizou-se os ensaios de resistência interlaminar aparente onde as extremidades inferiores do corpo de prova são o próprio suporte. O fim do ensaio se deu sempre que uma queda na carga de no mínimo 30% foi registrada. A resistência *short beam* foi calculada segundo a Eq. 1:

$$F^{sbs} = 0.75x \frac{P_m}{bxh} \quad (1)$$

Onde:  $P_m$  é a força máxima registrada durante o teste, e  $b$  e  $h$  são a largura e a espessura do corpo de prova, respectivamente. Para cada razão  $s:h$ , foram executados pelo menos 5 testes, obtendo-se pelo menos 3 resultados validados conforme o modo de falha e a queda de carga previstos na norma.

## Resultados e Discussão

A Fig. 2 mostra as curvas típicas de carga em função do deslocamento obtidas no ensaio *short-beam*, para diferentes comprimentos. As curvas correspondem à mediana dentre as amostras avaliadas para cada razão  $s:h$  e nota-se a queda abrupta de força, característica do teste.

A curva para razão  $s:h = 4:1$  apresentou a maior carga suportada pelo compósito PPS/FC, aproximadamente 6460 N e deslocamento de 1,33 mm. Após um primeiro decréscimo o carregamento voltou a aumentar, até que ocorreu a falha sob uma carga menor que a anterior. O corpo de prova de comprimento 6 vezes a espessura, teve um pico de carga igualmente agudo, com valor máximo de 3773 N e falha sob deslocamento ligeiramente menor.

A partir da razão comprimento:espessura 8:1, há significativo aumento no deslocamento e a redução da carga suportada. Isso representa redução na resistência *short beam* e também, que para amostras com razão  $s:h = 6:1$ , a ruptura possivelmente ocorre em função de uma combinação de mecanismos onde a distribuição de tensões faz com que o modo de falha não seja apenas cisalhamento. A amostra de razão  $s:h = 8:1$  apresentou carga máxima de 3361 N, vindo a falhar além de 2 mm. Para a amostra de razão 10:1 a falha ocorreu em 2140 N, sob deslocamento superior à 2 mm. O corpo de prova de maior dimensão, veio a falhar sob uma carga de 1600 N e deslocamento de quase 4 mm.

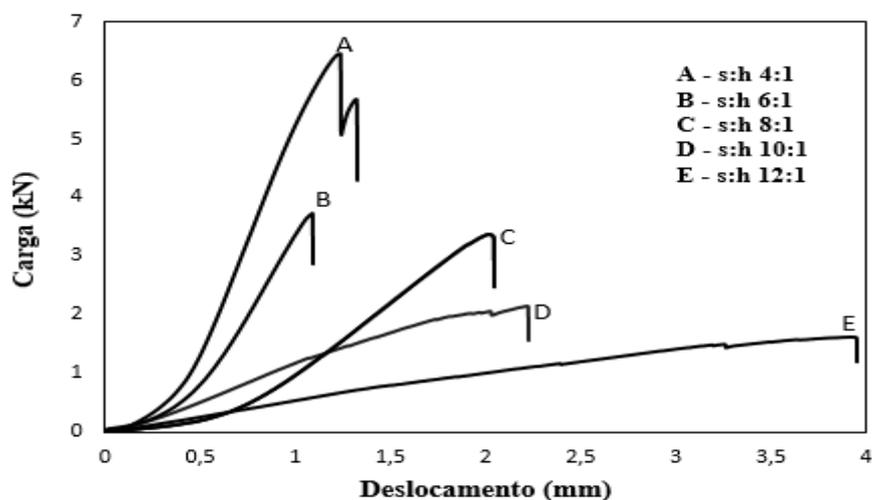
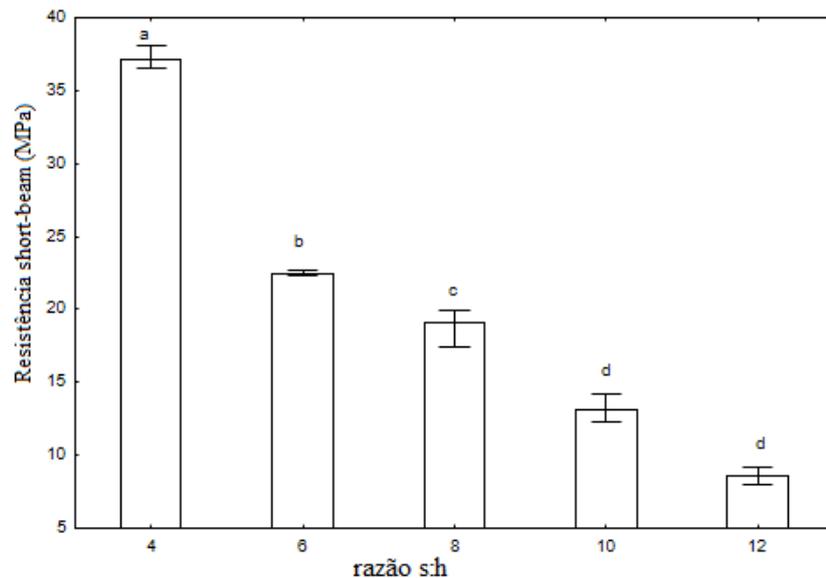


Figura 2 – Curva de carga versus deslocamento para diferentes razões  $s:h$

A Fig.3 relaciona o tamanho das amostras com a resistência *short-beam* média calculada conforme a Eq.1. Amostras de razão s:h = 4:1 tem os maiores valores de SBS, em média 37 MPa. Para razões 8:1 e 6:1 os valores médios foram 19.5 e 22.5 MPa, este último muito próximo ao resultado verificado por Tonatto [11]. Amostras de razão s:h = 10:1 apresentaram resistência *short-beam* média de 13.09 MPa e para os espécimes s:h = 12:1, a média da resistência *short-beam* foi de 8.55 MPa. A análise de variância confirmou que o fator comprimento tem influência significativa na resistência *short-beam* ( $p < 0,01$ ). Conforme o teste *HSD de Tukey*, as letras apontam que as médias dos grupos diferem estatisticamente umas das outras, exceto razões 12:1 e 10:1.

Na Tabela 1 apresenta-se os valores médios da resistência *short-beam*, desvio padrão e coeficiente de variação para os diferentes grupos avaliados.



**Figura 3 - Efeito da razão s:h na resistência *short beam* média dos compósitos**

**Tabela 1 – Valores da resistência aparente ao cisalhamento**

Razão s:h	4	6	8	10	12
Média SBS (MPa)	37.13	22.50	19.01	13.09	8.55
DP (%)	0.82	0.15	1.38	0.98	0.60
CV(%)	2.2	0.67	7.23	7.50	7.67

Na Figura 4 está a área da seção transversal de uma das amostras testadas, para cada família. A realização do ensaio *short beam* só é capaz de proporcionar um resultado confiável se ocorrer falha por cisalhamento puro, ou apresentar deformação inelástica com a presença de delaminação [13]. A imagem mostra modos de falha como cisalhamento simples, cisalhamento múltiplo. Amostras de comprimento 4 e 6 apresentaram leve deformação inelástica na região de aplicação da carga. Em dois casos houve delaminação ao longo do eixo longitudinal, resultando no descolamento de camadas até uma das faces, acima e abaixo do plano médio. Mesmo assim, não foi verificada falha decorrente exclusivamente de danos na região comprimida. Para razão s:h = 6:1, em um espécime apenas houve delaminações aparente ao longo do eixo longitudinal, que propagaram-se apenas até uma das faces e neste caso, localizadas abaixo do plano médio.

Para razão  $s:h = 8:1$  apenas um CP delaminou em duas faces, sendo estas distribuídas logo acima e abaixo do plano médio. As falhas predominaram nas regiões inferiores dos corpos de prova. Na família de razão 10:1, houve delaminação em todas amostras e falhas nas duas faces, localizadas predominantemente abaixo do plano mediano. Em espécimes de razão 12:1 apenas uma amostra apresentou delaminação longitudinal aparente, que ocorreu nas extremidades da peça, próximo à região inferior. Neste caso, ambas as faces apresentaram delaminação. Nos outros testes, uma das faces apresentou delaminação, sendo que em ambos os casos, se deu na região inferior da amostra.



Figura 4 – Seção transversal de alguns corpos de prova de comprimento: a) 4, b) 6, c) 8, d) 10 e e) 12.

## Conclusões

Neste estudo, observou-se a influência significativa de diferentes valores de comprimento de amostras na resistência *short-beam* de um compósito PPS/FC, e que corpos de prova menores resultam em menor resistência aparente ao cisalhamento. O ensaio SBS ocasionou modos de falha necessários à sua validade, as curvas de carga versus deslocamento apresentaram perfis coerentes com o teste e os valores médios obtidos para resistência *short-beam* foram significativos estatisticamente e aproximaram-se da literatura. Entretanto, no grupo de razão  $s:h = 4:1$  houve predomínio de um estado equiaxial de cisalhamento, o que resultou em um valor de resistência *short-beam* mais próximo da resistência ao cisalhamento interlaminar real do compósito, sendo mais adequado para a determinação de parâmetros necessários à caracterização do fenômeno da delaminação do compósito.

## Agradecimentos

Esta pesquisa foi viabilizada a partir do suporte concedido pela Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## Referências

1. Arhant, M., & Davies, P. in *Marine Composites*, Ed. W. P., 2018, Vol.1, 31-53.
2. Ciang, C. C; Lee, J. R.; Bang, H.J. *Measurement Science Technology*, 2008, 19, 12201.
3. Kassapoglou C, *Des. and analysis of composite structures*, John Wiley & Sons, N. York, 2013.
4. Sacchetti, F., Groupe, W. J. B., Warnet, L. L., & Villegas, I. F. *Eng. Fract.. Mechanics*. 2018.
5. McKeen, L. W. *Fatigue and Tribological Properties. of Plastics and Elastomers*, Ed.: PDL, 2010, Ed.:6, 265-285.
6. R. Zhang, K., Zhang, G., Liu, B.Y., Wang, X.J., Yang, J. *Compos. Sci. Technol.* 98, 2014.
7. N. J. Pagano *Interlaminar Response of Comp. Mat.*, Ed.:Elsevier, Delaware, 1989, Vol. 5, 162.
8. ASTM D2344 – Standard Test Method for Short-Beam Strength of Pol. Matrix Composite Materials.
9. Whitney, J. M., and Browning, C. E., *Experimental Mechanics*, Vol 25, 1985.
10. Sullivan, J. L., and Van Oene, H., *Composites Science and Technology*, Vol 27, 1986.
11. Tonatto M.L.P, Forte M.M.C., Tita V. and Amico S.C., *Materials Design* 108, 2015.
12. Botelho, E. C.; Fígiel, L.; Lauke, B.; Rezende, M. C., *Pol.: Ciência e Tec.:* Vol. 12, 3, 153-163.