

AVALIAÇÃO DE *RODS* PULTRUDADOS PRODUZIDOS COM DIFERENTES SISTEMAS DE FIBRAS E RESINAS

Laís V. Silva^{1*}, Fernanda W. Silva¹, Felipe F. Luz¹, Sandro C. Amico¹, Maria M. C. Forte¹, Ricardo T. Araújo²

¹Grupo de Materiais Compósitos - Laboratório de Materiais Poliméricos - UFRGS – RS (laisvasc@gmail.com)

²PETROBRAS E&P, Av. Chile, 330, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Resumo—Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre o comportamento de seis tipos de *rods* pultrudados fabricados com resina epóxi e resina éster-vinílica com três diferentes fibras (carbono, aramida e vidro) com o objetivo de definir os sistemas mais promissores. Os *rods* foram inicialmente avaliados por microscopia ótica, e foi determinada a fração volumétrica e a densidade. A segunda parte do estudo foi avaliar as propriedades mecânicas a partir de ensaios de tração. Os *rods* com fibras de carbono apresentaram melhores propriedades mecânicas sob tração sobre as demais fibras, em especial aqueles com matriz epóxi. Os diferentes diâmetros e a fração volumétrica não interferiram decisivamente nas propriedades mecânicas dos *rods* avaliados.

Palavras-chave: *rods*, pultrudados, fibra de vidro, fibra de aramida, fibra de carbono, tração.

Introdução

Perfis de materiais compósitos reforçados com fibras (FRP) fabricados pelo processo de pultrusão têm grande potencial de aplicação na construção civil, apresentando como principais vantagens frente aos materiais tradicionais elevada razão resistência/peso e rigidez/peso, leveza, resistência à fadiga, transparência eletromagnética, resistência a ambientes agressivos, e possibilidade de ser produzido em diferentes formas. Os obstáculos à generalização do seu uso deve-se ao elevado custo de produção (ainda pouco competitivo), à inexistência de regulamentação específica, a dificuldades de dimensionamento versus tecnologia de produção, à deformabilidade e à susceptibilidade a fenômenos externos [1]. Os *rods* pultrudados em material compósito têm qualidade e propriedades ideais que atendem a exigência quanto à razão resistência/baixo peso no setor da construção civil [2], especialmente, e no setor *offshore* em tecnologias para uso em águas profundas [3,4]. Para os *rods*, a pultrusão é o método mais eficiente de fabricação por apresentar baixo custo, alta qualidade, e eficiente orientação das fibras, essas barras circulares são produzidas em uma variedade de fibras e matrizes [2].

Os *rods* em ensaio de tração apresentam comportamento tensão-deformação muito próximo ao de um material elástico-linear frágil e as suas propriedades são basicamente influenciadas pelas propriedades das fibras e da resina, pelo teor de fibras e pela eficiência em transferir tensões da superfície do *rod* para as fibras [1].

O âmbito do presente estudo é fornecer uma avaliação de alguns dos sistemas de materiais para *rods* de FRP disponíveis comercialmente para aplicação no setor civil e de águas profundas, através da verificação laboratorial da resistência mecânica dos *rods* com diferentes tipos de fibras e matrizes. Os ensaios de ruptura por tração foram conduzidos utilizando soquetes adequados a fim de fornecer uma base de dados significativa para aplicações no campo.

Parte Experimental

Foram utilizados *rods* pultrudados em compósitos fornecidos por uma empresa nacional, sendo utilizados como recebidos. Todos os perfis pultrudados foram analisados por microscopia ótica (microscópio Carl Zeiss) para determinação de dimensões, controle da qualidade das amostras recebidas, e investigação do processo de fabricação.

A densidade (ρ) dos *rods* foi determinada com picnômetro segundo a norma ASTM D792 [5], em triplicata. A medida de fração volumétrica (V_f) dos pultrudados com fibra de vidro foi realizada através da queima da matriz, segundo norma ASTM D2584 [6], e dos pultrudados com fibra de carbono e aramida através de digestão ácida da matriz, com ácido sulfúrico, segundo norma ASTM D3171[7].

Os ensaios de tração dos *rods* (em triplicata) foram realizados em máquina INSTRON 3382 (100 kN). Os parâmetros utilizados nos ensaios foram os especificados nas normas ASTM D3916 [8] e ASTM D7205 [9], ou seja, velocidade de deslocamento de 5 mm/min, comprimento dos corpos de prova de 510 mm para os *rods* com diâmetro de 1,8 mm, e de 1000 mm para os *rods* com diâmetros superiores. O sistema de ancoragem das extremidades dos corpos de prova para realização dos ensaios de tração foi feito através de soquetes simples com resina.

Resultados e Discussão

A Fig. 1 apresenta micrografias de MO da secção transversal de alguns *rods* com diâmetro de 3 mm, cujo perfil é típico de materiais produzidos pelo processo de pultrusão tradicional. Foram observadas algumas pequenas regiões ricas em resina em todos os *rods* e uma distribuição homogênea das fibras na matriz, exceto o *rod* com fibra de vidro/resina éster-vinílica (VV18), provavelmente devido a não molhabilidade da fibra pela resina durante o processamento e à dificuldade de processar perfis com diâmetro tão reduzido.

Os pultrudados com fibra de vidro são praticamente os únicos encontrados no Brasil, e os perfis com fibra de carbono e de aramida são muito raros. Também, a resina epóxi usada nos processos de pultrusão facilita-o o por possuir uma viscosidade menor que as demais resinas [10]. Isso foi observado pelos perfis processados com resina epóxi que indicaram que o processo foi realizado com sucesso, apresentando perfis homogêneos e baixo teor de vazios, Fig. 1.

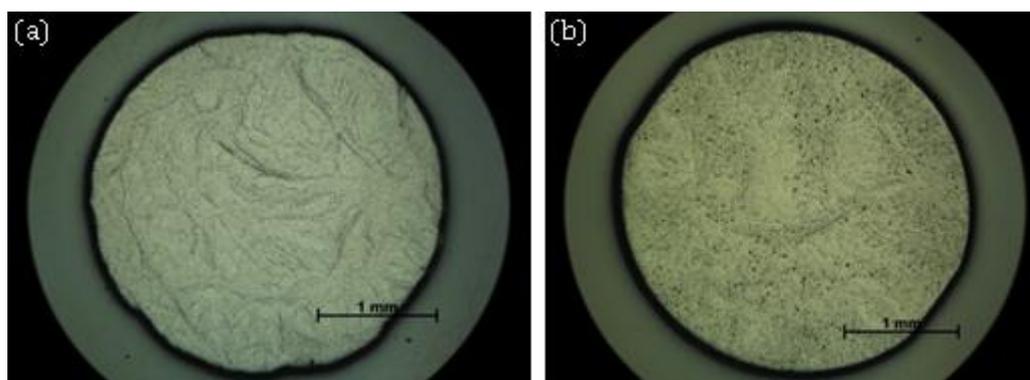


Figura 1 - Micrografias da seção transversal dos *rods* de 3 mm de diâmetro: CE30 (a) e CV30 (b).

Os resultados de diâmetro, densidade e fração mássica dos *rods* avaliados estão apresentados na Tabela 1. Os valores da fração mássica nos *rods* de diferentes diâmetros (1,8 mm, 3 mm e 5 mm) para o mesmo compósito, mostraram que esta foi mantida com a produção dos mesmo, mostrando um equilíbrio de propriedades no processo.

Os valores determinados para a fração mássica dos *rods* foram em geral diferentes dos valores sugeridos pelo fabricante, especialmente para os *rods* com aramida (AE18 e AV18). Como o desvio padrão para as medidas foi em geral baixo, tanto pelo método de queima como por digestão, os métodos adotados para a medida da fração mássica foram considerados confiáveis.

Os valores das medidas de densidade também foram iguais para todos os *rods* de mesma fibra e matriz nos diferentes diâmetro, com exceção dos *rods* de carbono de 1,8 mm de diâmetro, que apresentaram valores menores do que os demais *rods*.

Tabela 1 - Valores do diâmetro, densidade e fração mássica dos *rods* de 1,8, 3,0 e 5,0 mm de diâmetro.

Amostras	Diâmetro (mm)	ρ (g/cm ³)	W _f informado (%)	W _f real (%)
CE18	1,69 ± 0,01	1,36	68	75,9 ± 0,8
CV18	1,71 ± 0,02	1,50	68	75,3 ± 0,1
AE18	1,75 ± 0,04	1,25	72	56,9 ± 2,2
AV18	1,73 ± 0,01	1,26	72	56,7 ± 2,4
VE18	1,62 ± 0,05	2,19	76	81,8 ± 0,4
VV18	1,71 ± 0,03	2,22	76	84,5 ± 0,1
CE30	2,96 ± 0,04	1,60	68	73,4 ± 1,1
CV30	3,00 ± 0,04	1,59	68	69,4 ± 2,1
AE30	2,96 ± 0,03	1,31	72	59,3 ± 0,8
AV30	2,97 ± 0,04	1,31	72	65,5 ± 0,6
VE30	2,99 ± 0,03	1,97	76	72,9 ± 0,1
VV30	3,00 ± 0,02	2,15	76	85,1 ± 0,1
CE50	4,82 ± 0,05	1,56	68	71,4 ± 1,0
CV50	4,87 ± 0,07	1,59	68	73,7 ± 1,0
AE50	4,78 ± 0,07	1,36	72	57,8 ± 1,3
AV50	4,90 ± 0,06	1,42	72	75,4 ± 3,4
VE50	4,82 ± 0,05	2,10	76	81,8 ± 0,1
VV50	4,98 ± 0,02	2,13	76	85,8 ± 0,1

* Legenda: CE (carbono/epóxi); CV (carbono/éster-vinílica); VE (vidro/epóxi); VV (vidro/éster-vinílica); AE (aramida/epóxi); AV (aramida/éster-vinílica); 18 (1,8 mm de diâmetro); 30 (3,0 mm de diâmetro); 50 (5,0 mm de diâmetro).

A Fig. 2 mostra curvas típicas de força versus deslocamento determinadas em ensaio de tração para os *rods* com fibra de carbono (CV18), de vidro (VE18) e de aramida (AV18). Pode-se observar o comportamento mais frágil dos *rods* com fibra de carbono que apresenta uma curva mais inclinada em relação aos demais, típica de materiais de elevada performance mecânica. Os *rods* de fibra de aramida e de vidro apresentaram curvas com menor inclinação, sendo menos rígidos e resistentes que os *rods* com fibra de carbono.

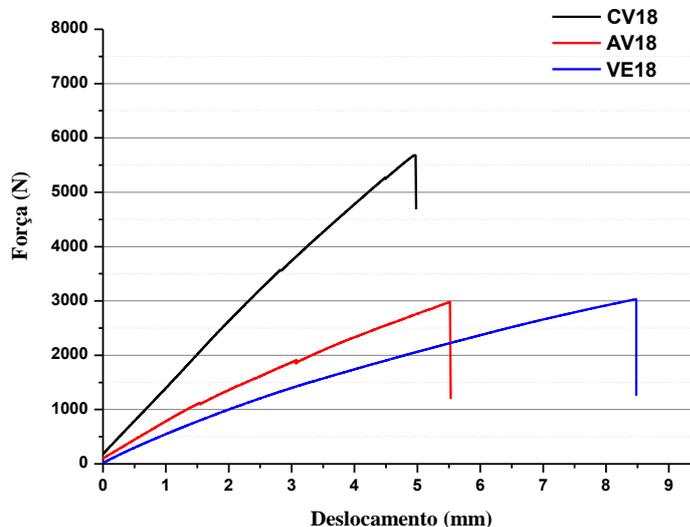


Figura 2 - Curvas típicas de força vs deslocamento dos *rods* CV18, AV18, VE18.

A Tabela 2 apresenta os valores das propriedades em tração dos *rods* de fibra de carbono, aramida e vidro. Foi observada uma maior carga de ruptura, resistência à tração e módulo de elasticidade para os *rods* de carbono, e a menor para os *rods* de vidro. Isso se deve principalmente ao fato da fibra de carbono possuir uma maior resistência e módulo de elasticidade [9] em relação às demais fibras. Os *rods* de fibra de vidro apresentaram maior alongamento à ruptura, pois a fibra de vidro tem alongamento maior que as outras fibras (cerca de 2 a 4% [11]), como pode ser observado na Fig. 2. A fibra de aramida apresenta também deformação na ruptura elevada, mas como observado pelos resultados, o ganho de sua utilização foi notado apenas em rigidez e um pouco em deformação na ruptura.

Vê-se também a consistência dos valores das propriedades mecânicas em função da mudança de diâmetro, principalmente para os *rods* de carbono. As pequenas diferenças observadas podem ser atribuídas às variações do teor de fibra nos *rods* de diferentes diâmetros.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de tração dos *rods*.

Amotras	Diâmetro	Carga máxima (kN)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	ε^* (%)	Coefficiente de Poisson
CE18	1,81	6,7	2594	154,2	1,7	0,30
CV18	1,78	5,7	2320	160,5	1,4	0,31
AE18	1,66	3,3	1518	76,1	2,0	0,39
AV18	1,81	3,1	1201	65,5	1,8	0,39
VE18	1,75	3,8	1588	56,3	2,8	0,29
VV18	1,80	3,7	1466	53,7	2,7	0,28
CE30	3,06	20,5	2786	147,6	1,9	0,30
CV30	3,02	19,4	2726	143,5	1,9	0,30
AE30	3,03	9,5	1328	72,6	1,8	0,43
AV30	3,04	9,6	1349	69,8	2,0	0,46
VE30	2,84	7,9	1242	48,8	2,5	0,31
VV30	3,04	8,5	1173	56,1	2,1	0,29
CE50	5,00	53,6	2759	143,5	1,9	0,30
CV50	4,92	48,8	2569	147,4	1,9	0,31
AE50	4,95	23,4	1236	68,1	1,8	0,41
AV50	4,95	27,4	1448	70,9	2,0	0,43
VE50	4,95	26,7	1389	53,8	2,6	0,28
VV50	5,06	24,0	1195	54,5	2,3	0,27

ε^* = deformação na ruptura = resistência/ módulo

12° Congresso Brasileiro de Polímeros (12°CBPol)

Em relação às diferentes resinas, quando comparados os *rods* pultrudados com diferentes fibras e diferentes diâmetros, a resina que mais se destaca é a epóxi, que produziu *rods* com maiores valores de resistência, em geral. Isso também é visto por Curtis (1989) em estudos comparativos entre a resina epóxi, a resina poliéster e outras resinas termofixas, a resina epóxi apresentou melhor comportamento mecânico estático [12].

A variação do teor de fibra entre os *rods* do mesmo tipo de compósito não alterou as propriedades mecânicas significativamente, podendo-se ser identificado o comportamento para cada tipo de material envolvido, exceto para o *rod* VE30 que teve uma fração menor (cerca de 8%) do que os demais *rods* de mesmo material, gerando valores de resistência e módulo inferiores aos demais.

Os *rods* de diferentes diâmetros (1,8 mm, 3 mm e 5 mm) mostraram uma homogeneidade nos valores resistência mecânica para os diferentes tipos de compósitos, indicando uma reprodutibilidade dos valores mesmo com tais mudanças no processo.

Os valores de resistência à tração e módulos dos diferentes tipos dos *rods* nacionais estudados neste trabalho são comparáveis a níveis de fabricantes internacionais como *Technora*, *Leadline*, *Carbon Stresse*, *Tokyo Rope*, alcançando valores semelhantes e até superiores aos já comercializados [13-16].

Conclusão

Análise dos diversos *rods* em compósitos se mostrou bem-sucedida, observando-se um baixo desvio padrão nas medidas em geral. Foi possível distinguir o comportamento mecânico dos *rods* de diferentes fibras e matrizes através das análises realizadas por meio dos ensaios de tração. Os *rods* de mesmo compósito com diferentes diâmetros e flutuações no teor de fibras não apresentaram consideráveis variações nas propriedades mecânicas (dentro de um erro de 10%). Os *rods* de produção nacional analisados neste estudo, com diferentes fibras e resinas poliméricas, atenderam as especificações desejadas, sendo similar aos *rods* de procedência internacional.

Agradecimentos

Os autores desse trabalho agradecem à PETROBRAS pelo apoio financeiro, e ao LACAR/UFRGS e LACER/UFRGS pelas análises disponibilizadas.

Referências

1. J. R. Correia; S. Cabral-Fonseca; F. A. Branco; J. G. Ferreira; M. I. Eusébio; M. P. Rodrigues *Mechanics of Composite Materials*, 2006, 42, 1.
2. A. Nanni; C. E. Bakis; E. F. O'Neil; T. O. Dixon. *PCI Journal*, 1996, 34
3. J. F. Noisternig. *Applied Composite Materials*. 2000, 7, 139.
4. P. Odru; R. L. Geffroy *artigo online da revista France: acessado Mar/2013*.
5. ASTM D792 - *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*.
6. ASTM D2584 - *Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*.
7. ASTM D3171 - *Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials*.
8. ASTM D3916 - *Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod*.
9. ASTM D7205 - *Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bar*.
10. D. F. Kersting, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
11. G. P. Silva, PhD. Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.
12. Curtis P.T., in *Advanced Composites*, I.K. Partridge, Ed.; Elsevier Applied Science, London, 1989, 331-368.
13. N.K. Kar; Y. Hu; E. Barjasteh; S.R. Nutt *Composites: Part B*, 2012.
14. D. Lee; L. Cheng, M. Asce *Journal of Composites for Construction*, 2011, 615.
15. C. Sparks; I. Zivanovic; J. Luyckx; W. Hudson in *Anais of the Offshore Technology Conference*, Houston, 2003.
16. N. Grace; M. Asce; T. Enomoto; P. Baah; M. Bebawy *J. Compos. Constr.* 2012, 16, 225.