

AVALIAÇÃO DO EFEITO DO ENVELHECIMENTO ACELERADO NAS PROPRIEDADES DE RODS PULTRUDADOS

Lais V. Silva ^{1*}, Felipe R. S. Gabbardo¹, 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 ao intemperismo de oito tipos de *rods* pultrudados fabricados em diferentes fibras (carbono, aramida e vidro) e em diferentes matrizes (termoplástica e termorrígida) com o objetivo de avaliar a resistência à degradação destes. A avaliação da resistência ao intemperismo foi comparativa, feita através da análise da resistência mecânica dos *rods*, por meio de ensaios de tração antes e após ensaio de envelhecimento acelerado. Os *rods* com matriz termoplástica apresentaram as maiores variações nas propriedades, diferentemente dos *rods* com matriz termorrígida (epóxi e éster-vinílica) que apresentaram uma maior resistência residual aos raios ultravioletas e a umidade. Já em relação aos *rods* com fibras termoplásticas (aramida), estas por apresentar problemas com umidade, apresentaram as maiores variações de propriedades, se destacando os *rods* de fibras de carbono com variações menores que 5%.

Palavras-chave: Envelhecimento, rod, pultrudado, fibras sintéticas, tração.

Introdução

Nos últimos anos, a durabilidade limitada de estruturas de engenharia civil com materiais tradicionais, como por exemplo, aço e concreto armado, juntamente com o crescente custo de manutenção destas, tem propiciado o uso de materiais inovadores, entre os quais polímeros reforçados com fibras (FRP). Neste setor, perfis pultrudados em material compósito tem tido particular destaque, desempenhando papel importante no desenvolvimento de tecnologias mais avançadas [1, 2]. Dentre estes, os *rods* pultrudados têm sido utilizados em um número crescente de aplicações, devido a características como leveza, elevada resistência, transparência, baixo custo de manutenção, e por não apresentar corrosão oxidativa, particularmente se comparado com materiais convencionais equivalentes.

Já existem vários exemplos de pontes e edifícios que compõem *rods* como elementos estruturais, em ambas as novas construções e reabilitação de infraestrutura degradada [3-5].

Estas aplicações estruturais foram inicialmente impulsionadas no âmbito de projetos-piloto ou pesquisa, mas agora estão encontrando seu próprio caminho, em termos de perspectiva para outros setores como o de águas profundas [6,7].

No entanto, o mecanismo de envelhecimento e degradação sofrido por esses materiais ainda necessita ser melhor compreendido, principalmente o mecanismo de dano sob diferentes condições de serviço susceptíveis em aplicações de engenharia civil ou offshore em águas profundas [6-9].

Os efeitos ambientais como umidade, temperatura, radiação UV, entre outros, presentes na atmosfera devem ser sempre considerados nos projetos de compósitos estruturais antes de empregá-los. A umidade, por exemplo, penetra na matriz polimérica pelo processo de difusão até que a concentração de equilíbrio seja atingida, sendo esse mecanismo acentuado pelo aumento da temperatura [10].

Neste trabalho, *rods* pultrudados produzidos com fibras de carbono, aramida e vidro em diferentes matrizes poliméricas foram avaliados comparativamente com o objetivo de determinar o efeito do envelhecimento. A avaliação da resistência à degradabilidade foi feita por meio da análise da variação das propriedades mecânicas dos *rods* antes e após o envelhecimento acelerado, com o objetivo de se ter um melhor entendimento sobre comportamento dos *rods* quando expostos à radiação e a umidade por 2000 h.

Parte Experimental

Compósitos pultrudados na forma de *rods* foram produzidos com fibras de carbono, aramida ou vidro, sendo fornecidos por duas empresas, sendo utilizados como recebidos. As amostras foram denominadas utilizando o seguinte código: CE (carbono/epóxi); CV (carbono/éster-vinílica); VE (vidro/epóxi); VV (vidro/éster-vinílica); AE (aramida/epóxi); AV (aramida/éster-vinílica); AP (aramida/amida); CP (carbono/poli(sulfeto de fenileno)); 18 (1,8 mm de diâmetro); 22 (2,2 mm de diâmetro); 35 (3,5 mm de diâmetro).

A caracterização dos *rods* foi realizada através de ensaios de tração, antes e após a exposição ao envelhecimento acelerado. Os ensaios de tração foram realizados em máquina de ensaios universal INSTRON 3382 (100 kN) de acordo com as normas ASTM D3916 [11] e ASTM D7205 [12] e os corpos de prova foram tracionados até a ruptura a uma

velocidade de 5 mm/min. Para as medidas de deformação axial e transversal, foram utilizados extensômetros analógicos. Todas as medidas dos diâmetros dos *rods* foram feitas com paquímetro digital.

O envelhecimento acelerado dos *rods* foi baseado no ciclo 1 da norma ISO 4892-2 [13] utilizando uma câmera de envelhecimento acelerado Xenon de marca ATLAS, modelo Ci4000, do CETEPO/SENAI. O ciclo I contém:

a) *Daylight* com $0.35 \text{ W/m}^2 \cdot \text{nm}$ - 340 nm, por 102 min a $63 \text{ }^\circ\text{C}$; b) *Light and Water spray* (temperatura ambiente não controlada) por 18 min. Ao final de cada ciclo, foi acrescentado uma etapa no escuro de 6 h a $24 \text{ }^\circ\text{C}$ com 95% de umidade. Após as 2000 h de envelhecimento, os *rods* foram ensaiados em tração nas mesmas condições descritas acima.

Resultados e Discussão

A avaliação dos *rods* foi feita pelo acompanhamento da variação das propriedades mecânicas determinadas em ensaio de tração (Fig. 1), antes e após serem submetidos aos ensaios de envelhecimento acelerado. Na Tabela 1 estão apresentados todos os resultados de valores de carga máxima utilizada, resistência à tração, módulo de elasticidade, coeficiente Poisson, e deformação dos diferentes *rods* ensaiados após o envelhecimento. Os *rods* de fibra de carbono apresentaram valores de resistência à tração e módulo superiores aos dos *rods* de fibras de aramida e de vidro. Também, os dois últimos apresentaram menor deformação na ruptura, sendo superior para os *rods* de vidro. Os *rods* de fibra aramida apresentaram os maiores valores de coeficiente de Poisson e alongamento moderado, porém estas amostras eram muito frágeis e de difícil manuseio durante a preparação dos corpos de prova (Tabela 1).

As fibras de carbono conferiram aos *rods* maior módulo e resistência à tração com aplicação da carga no sentido das fibras [14,15].

Com relação aos *rods* de matriz termoplástica, os *rods* CP35 apresentaram resistência à tração intermediária entre os *rods* com fibra de vidro e com fibra de carbono, mantendo a mesma deformação a ruptura dos *rods* com fibra de carbono, o que não era esperado para um *rod* com matriz termoplástica. Já o *rod* de aramida com matriz amida (AP22), apresentou a mesma resistência à tração dos *rods* de aramida com matriz termofixa, porém com uma maior deformação à ruptura.

Com relação à variação da matriz termofixa do compósito, os *rods* com resina epóxi apresentaram maiores valores de resistência, módulo e deformação na ruptura que a resina éster-vinílica, e não alteraram o coeficiente de Poisson.

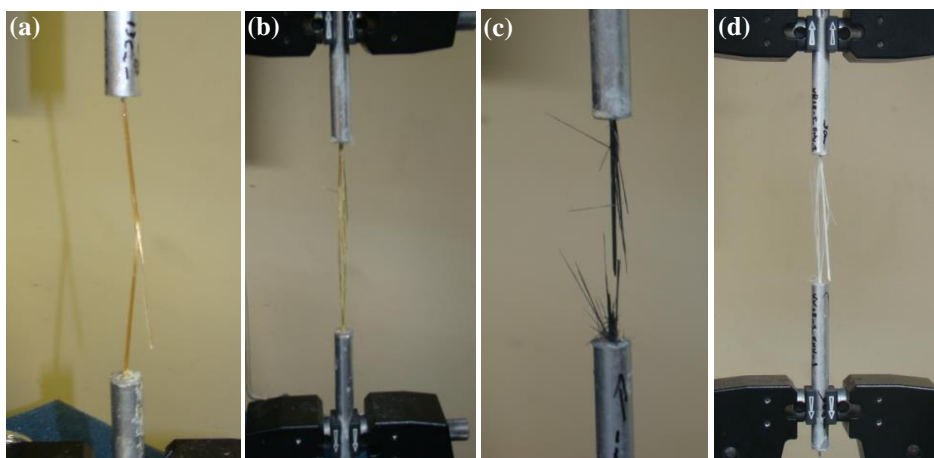


Figura 1 - Aspecto dos *rods* após a ruptura por tração produzida com fibra de aramida/AE18 (a), de aramida/AP22 (b), de carbono/CE18 (c) e de vidro/VE18 (d) (LAPOL/UFRGS).

A Tabela 2 apresenta a variação entre os resultados obtidos como recebido e após o envelhecimento para facilitar a comparação. Os *rods* de compósitos de fibra de aramida apresentaram as maiores variações nas propriedades, especialmente o *rod* de aramida/epóxi (AE18). O efeito da umidade e da radiação ultra-violeta na fibra de poliamida é bem conhecido. Por exemplo, foi relatado que a umidade atua como plastificante na matriz do compósito de aramida/éster-vinílico, diminuindo a T_g e reduzindo o módulo e a resistência à tração. A fibra aramida é altamente higroscópica e a ação do intemperismo pode causar descolamento fibra/matriz, trincas na matriz e quebra de ligações por hidrólise [16].

Diferentemente dos *rods* de aramida, os *rods* de fibras de vidro apresentaram-se praticamente inalterados após o envelhecimento, tanto naqueles com resina epóxi como com éster-vinílico. Os *rods* com fibras de carbono também não apresentaram grandes variações de módulo e de resistência, sendo pouco afetados por efeitos de degradação de interface fibra-matriz [17]. Os *rods* com fibra de carbono/epóxi (CE18) foram um pouco mais estáveis que os *rods* com fibra de carbono/éster-vinílico (CV18).

Tabela 1 - Valores médios das características dos *rods* antes (original) e após o envelhecimento (env).

Amostras	Diâmetro (mm)		Resistência à tração (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)		Coeficiente de Poisson		Def. esp* (%)	
	Original	Env	Original	Env	Original	Env	Original	Env	Original	Env
CE18	1,81±0,01	1,80±0,01	2594±199	2708±44	154±3	148±2	0,30±0,01	0,29±0,03	1,69±0,08	1,77±0,05
CV18	1,79±0,01	1,79±0,01	2320±122	2478±60	160±6	169±1	0,31±0,03	0,28±0,01	1,45±0,07	1,46±0,03
AE18	1,66±0,01	1,70±0,01	1518±90	1130±76	76±3	59±1	0,39±0,02	0,44±0,03	2,00±0,12	1,93±0,12
AV18	1,81±0,01	1,77±0,02	1201±66	1156±66	66±6	68±2	0,39±0,04	0,41±0,04	1,83±0,10	1,68±0,12
VE18	1,75±0,01	1,79±0,01	1588±7	1492±18	56±9	55±1	0,29±0,02	0,28±0,02	2,82±0,04	2,70±0,09
VV18	1,80±0,01	1,80±0,01	1466±108	1480±61	54±2	56±3	0,28±0,01	0,30±0,04	2,73±0,10	2,63±0,05
CP35	3,49±0,01	3,50±0,01	1639±36	1619±59	86±2	79±1	0,31±0,01	0,35±0,01	1,70±0,20	2,06±0,07
AP22	2,27±0,01	2,23±0,01	1085±98	1127±24	47±2	47±1	0,39±0,03	0,36±0,02	2,33±0,18	2,36±0,06

*Def. esp. = (resistência/módulo)×100%

E o *rod* de matriz de poliamida com fibra de aramida (AP22) não mostrou variações significativas, praticamente não foram afetados pelos efeitos de radiação e umidade, provavelmente devido ao encapsulamento eficiente da fibra pela matriz de poliamida, sendo esta mais facilmente processada que a matriz PPS. Vale ressaltar que as amostras de *rods* de termoplástico foram produzidas por um variante do processo de pultrusão convencional adaptado para materiais termoplásticos.

Já os *rods* com carbono/PPS (CP35) tiveram uma queda de aproximadamente 8% nos valores dos módulos e um aumento de 17% na deformação a ruptura, os efeitos de umidade podem estar plastificando a matriz e tornando-a mais tenaz [16], mesmo assim a resistência à tração foi mantida.

Tabela 2 - Variações das propriedades dos *rods* após o envelhecimento.

	Varição de resistência à tração (%)	Varição de Módulo (%)	Varição do coeficiente de Poisson (%)	Varição da deformação específica (%)
CE18	+4,4	-3,7	-6,1	+4,6
CV18	+6,8	+5,4	-8,4	+1,0
AE18	-23,4	-23,0	+11,4	-25,7
AV18	-3,8	+4,2	+9,2	-8,5
VE18	-6,0	-2,1	-7,5	-4,2
VV18	+0,9	+4,6	-4,8	-3,5
CP35	-1,2	-8,4	+11,1	+8,5
AP22	+3,9	-0,4	-6,3	+0,9

Conclusão

Em relação ao comportamento em tração dos *rods* como recebidos, os materiais com fibra de carbono e matriz termorrígida foram mais resistentes e rígidos, especialmente os *rods* com matriz epóxi.

Os *rods* com matrizes termoplásticas mostraram ter igual desempenho mecânico com maior deformação, no caso do *rod* com aramida e poliamida. Já os *rods* com carbono e matriz de poli(sulfeto de fenileno), apresentaram resistência mecânica intermediária entre os *rods* com fibra de carbono e com fibra de vidro, e baixa deformação, semelhante aos *rods* com carbono e resina termofixa. Neste último caso o uso da matriz termoplástica não alterou a flexibilidade do compósito, propriedade de maior interesse quando produzidos com matrizes termoplásticas.

Em relação aos ensaios de envelhecimento, os *rods* com matriz termorrígida e fibras sintéticas de carbono e de vidro apresentaram menores variações nos valores de resistência, indicando uma maior resistência ao intemperismo, diferentemente dos *rods* com matrizes termoplásticas (PA e poli(sulfeto de fenileno)) e/ou fibra termoplástica (poliamida).

Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS pelo financiamento do projeto.

Referências

1. C. E. Bakis; L. C. Bank; V. L. Brown; E. Cosenza; J. F. Davalos; J. J. Lesko; A. Machilda; S. H. Rizkalla; T. C. J. *Compos. Construct.* 2002, 6, 73.
2. L. C. Hollaway. *Construct. Build. Mater.* 2003, 17, 365.
3. T Keller *Prog. Struct. Eng. Mater.* 2001, 3, 132.
4. T. Keller, *Struct. Eng. Int.* 1999, 9, 297.

12° Congresso Brasileiro de Polímeros (12°CBPol)

5. J. A. Sobrino; M. D. G. Pulido *Struct. Eng. Int.* 2002, 12, 84.
6. J. F. Noisternig *Applied Composite Materials*. 2000, 7, 139.
7. C.Sparks; I. Zivanovic; J. Luyckx; W. Hudson This paper was prepared for presentation at the *Offshore Technology Conference*, Houston, 2003].
8. N. K. Kar; Y. Hu; E. Barjasteh; S. R. Nutt *Composites: Part B*, 2012.
9. 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.
10. S. Cabral-Fonseca; J. R. Correia; M. P. Rodrigues; F. A. Branco *Strain*, 2012, 48, 162.
11. ASTM D3916 - *Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod*.
12. ASTM D7205 - *Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars*.
13. ISO 4892-2 -Plastics -- *Methods of exposure to laboratory light sources - Part 2: Xenon-arc lamps*.
14. G. P Silva. *Tese de doutorado*, Universidade Estadual de Minas Gerais, 2000.
15. P.T Curtis. *Journal of Strain Analysis*. 1989, 24, 235.
16. M. C. M. de Faria; F. C. Apezato; M. L. Costa; P. C. Oliveira; E. C. Botelho. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011, 30, 1729.
17. L. A. L. Franco. *Tese de doutorado*, Instituto de Pesquisa Aeronáutica, 2008.