

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

## **PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS ARAMIDA/EPÓXI E ARAMIDA/POLIÉSTER PRODUZIDOS POR INFUSÃO Á VÁCUO**

**Amanda A. X da Silva<sup>1\*</sup>, Bruna O. Koehler<sup>1</sup> e Sandro C. Amico<sup>1</sup>**

*1 – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS. amanda.albertin@ufrgs.br*

**Resumo:** O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico de laminados de tecidos de fibras de aramida (Kevlar) com diferentes matrizes poliméricas termorrígidas (poliéster insaturada e epóxi) produzidos por infusão a vácuo. A qualidade do processamento, isto é, a homogeneidade dos compósitos, foi verificada por ensaio não destrutivo (Ultrassom C-Scan) e suas propriedades mecânicas foram obtidas em ensaios de tração, flexão, compressão e *short beam*. O comportamento em tração do compósito com matriz epóxi e poliéster foi similar. Porém, as resistências à compressão, à flexão, e a *short beam* do compósito aramida/epóxi foram até três vezes superiores ao apresentado pelo compósito aramida/poliéster.

**Palavras-chave:** *Laminados. Propriedades Mecânicas. Infusão á vácuo. Aramida. Resinas termorrígidas.*

### ***Mechanical properties of aramid/epoxy and aramid/polyester composites manufactured by vacuum infusion***

**Abstract:** The main objective of this work is to evaluate the mechanical behavior of laminates reinforced with aramid fabrics (Kevlar® 29) with different thermoset polymer matrices (unsaturated polyester and epoxy) manufactured by vacuum infusion. The quality of the processing, i.e. the homogeneity of the composites, was verified with non-destructive testing (Ultrasound C-scan), and their mechanical properties were obtained in tensile, flexural, compression and short beam testing. The tensile properties of the composites with epoxy or polyester matrix were similar. However, the compressive strength, flexural strength and short beam strength of the aramid/epoxy composite were up to 3 times higher than those for the aramid/polyester composite.

**Keywords:** *Laminates. Mechanical Properties. Vacuum infusion. Aramid. Thermoset resins.*

## **Introdução**

Compósitos poliméricos reforçados com fibras têm sido amplamente utilizados em diversos campos de aplicação, como automotivo, aeronáutico, espacial, náutico, civil, esportes e defesa [1]. Os requisitos de alta resistência, baixo peso e a capacidade de suportar as condições de trabalho são essenciais para a disseminação do uso desses materiais [2,3].

Algumas resinas termorrígidas são utilizadas como matriz em compósitos poliméricos, sendo das mais utilizadas as resinas poliéster e epóxi [4]. Resinas epóxi possuem atributos excepcionais como bom desempenho mecânico, estabilidade térmica, boa resistência química e à fadiga, boas propriedades de isolamento, baixo encolhimento durante a cura e estabilidade dimensional [5]. Já a resina poliéster apresenta como principais diferenciais sua versatilidade e baixo custo.

A fibra de aramida, com uma estrutura de poliamida aromática, é uma das mais importantes fibra de reforço em compósitos, com propriedades interessantes como baixa densidade, boa tenacidade e resistência ao impacto [6]. As fibras de aramida são encontradas em uma gama de variações, e a DuPont™, por exemplo, usa a classificação Kevlar® 29, Kevlar® 49 e Kevlar® 129.

Áreas de alta tecnologia estão observando métodos de fabricação favoráveis que podem ser usados com confiança para produzir componentes estruturais sem comprometer seu desempenho, e entre eles está a moldagem líquida [7], que inclui os processos de Moldagem por Transferência de Resina (RTM), Infusão a vácuo, entre outras variações existentes. O processo de infusão a vácuo consiste na utilização de uma cavidade de molde selada, contendo uma pré-forma, que é criada entre um molde único e um *vacuum bag*. A cavidade é evacuada, compactando o reforço e removendo ar residual. O vácuo é acionado e a resina é introduzida através da entrada para impregnar o tecido devido ao gradiente de pressão. A viscosidade da resina utilizada durante o processo de infusão a vácuo é um parâmetro importante para qualidade final do laminado, pois com uma viscosidade mais baixa esta pode fluir mais facilmente no meio poroso (reforço), reduzindo o tempo de processamento e facilitando a obtenção de compósitos homogêneos.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é avaliar a qualidade do processamento e as características mecânicas de laminados aramida/epóxi e aramida/poliéster fabricados por infusão a vácuo.

## Experimental

Como reforço dos compósitos laminados, foi utilizado o tecido plano de aramida, fornecido pela DuPont®, Kevlar, 440 g/m<sup>2</sup>. Como matriz, foram utilizadas a resina epóxi AR260, com endurecedor AH260 (AR/AH 260) na proporção 100/26 g, e a resina poliéster 14.0 com iniciador DML 14, na proporção 100:1 g, ambas adquiridas da Barracuda.

O tempo de gel das duas resinas foi obtido utilizando a norma ASTM D2471, sendo 120 min para a resina epóxi e 70 min para a poliéster. A viscosidade da resina epóxi, medida em viscosímetro Brookfield, *spindle* S62 com uma rotação de 20 rpm a 30 °C, foi em torno de 250 cP, e a da poliéster era de 170 cP a 25 °C (dados do fornecedor). Esta faixa de valores é aceitável para uso do processo de infusão a vácuo.

### *Produção dos laminados*

Inicialmente o tecido de Kevlar é seco em estufa por 2 h a 100 °C para remoção da umidade. Os tecidos são posicionados em um *lay-up* sobre o molde rígido, acima é posicionada uma camada de *peel ply* e é colocada uma malha de fluxo cobrindo parte da superfície do reforço para ajudar na distribuição da resina. A entrada e a saída de resina são realizadas por canais de distribuição, tubos espirais, posicionados no molde. O molde é selado com auxílio da fita *tacky tape*, em toda a periferia da área de moldagem, e um *vacuum bag*. As placas são curadas por 24 h sob vácuo (100 kPa = 1 bar), depois desmoldadas e pós-curadas por 16 h a 65 °C, para a resina epóxi, e por 2 h a 80 °C, para resina poliéster. Foram fabricados laminados (310 × 420 mm<sup>2</sup>) de aramida/epóxi (K<sub>5</sub>-Epóxi) e aramida/poliéster (K<sub>5</sub>-Poliéster), com 5 camadas de tecido de fibras de aramida e realizando a infiltração no sentido do urdume ou da trama.

### *Caracterização dos laminados*

Os laminados foram analisados com ultrassom C-scan (NDT Systems, modelo Raptor), com transdutor de 2.25 MHz (0.5") e água com detergente como meio de acoplamento. A densidade de cada laminado foi determinada segundo a norma ASTM D792 e as frações volumétricas dos constituintes (fibra (V<sub>f</sub>) e matriz (V<sub>m</sub>)) foram determinadas pela norma ASTM D3171.

Amostras foram obtidas por corte das placas para os ensaios mecânicos. Ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D3039 e cinco amostras (formato retangular de 25 × 250 mm<sup>2</sup>) de cada material foram ensaiadas a uma velocidade de 2 mm/min até a sua ruptura. As deformações longitudinais e transversais foram obtidas utilizando vídeo extensômetro. Os ensaios de flexão foram realizados segundo a norma ASTM D7264, onde 5 amostras de cada compósito

com dimensões de  $127 \times 12 \text{ mm}^2$  foram ensaiadas a uma velocidade de  $1 \text{ mm/min}$  com uma distância entre os suportes de  $48 \text{ mm}$ , até 5% de deformação.

O ensaio de *short-beam* foi realizado de acordo com a norma ASTM D2344, utilizando uma distância entre apoios de  $12 \text{ mm}$ , a uma velocidade de  $1 \text{ mm/min}$  e com amostras com dimensões de  $18 \times 6 \text{ mm}^2$  (comprimento  $\times$  largura). Doze amostras de cada compósito, retiradas de 4 áreas diferentes da placa, foram ensaiadas para assim avaliar a homogeneidade dos laminados. Todos os ensaios foram realizados utilizando uma máquina de ensaio universal Instron modelo 3382.

## Resultados e Discussão

Na Fig. 1 podem ser vistas imagens C-Scan obtidas dos laminados. Nos compósitos fabricados por fluxo na dimensão de  $420 \text{ mm}$  (infusão na direção do urdume do tecido), K<sub>5</sub>-Epóxi-urdume e K<sub>5</sub>-Poliéster-urdume (Fig.1(a) e Fig.1(b), respectivamente) houve acúmulo de resina (área em azul claro) na área de entrada da resina. Já para o K<sub>5</sub>-Poliéster-trama, utilizando as mesmas dimensões, porém com fluxo na direção de menor dimensão ( $310 \text{ mm}$  – direção da trama do tecido), para o qual a imagem C-Scan pode ser visualizada na Fig. 1(c), fica visível uma maior homogeneidade.

Os tempos de infiltração apresentaram diferenças significativas, sendo de  $75 \text{ min}$  para a epóxi e de  $22 \text{ min}$  para o poliéster, utilizando parâmetros iguais de processamento. Já o  $V_f$  obtido para todos os compósitos foi similar  $\approx 55\%$ .

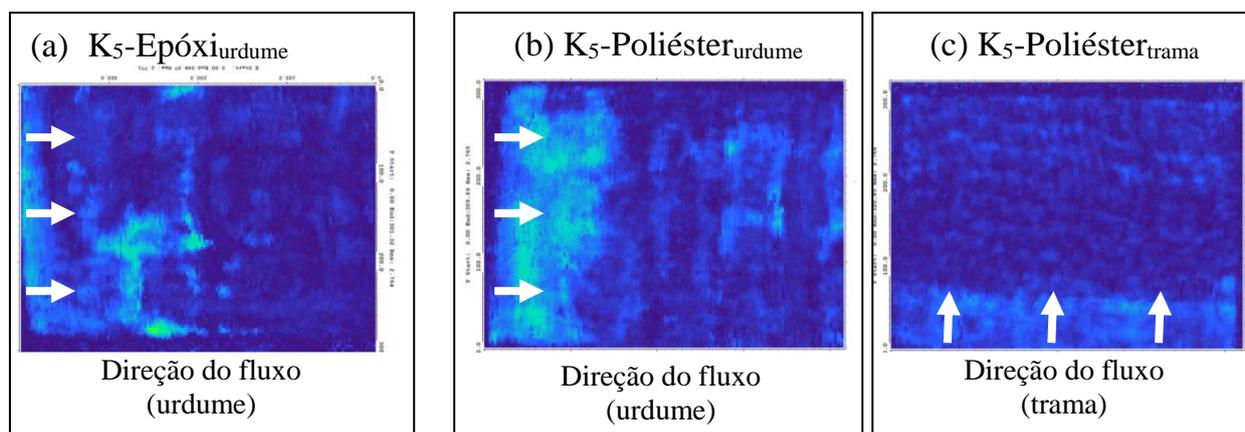


Figura 1 – Imagens C-Scan obtidas para os compósitos fabricados.

As propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração, compressão, flexão e short beam estão compiladas na Tab. 1. Em tração, o comportamento das curvas e a deformação na ruptura ( $\epsilon$ ) foram similares, e a resistência (TS) e o módulo de elasticidade ( $E_t$ ) exibidos pelo compósito K<sub>5</sub>-Epóxi foram de  $387,68 \text{ MPa}$  e  $15,559 \text{ GPa}$ , respectivamente, e para o K<sub>5</sub>-Poliéster foram de  $436,42 \text{ MPa}$  e  $15,989 \text{ GPa}$ , respectivamente. Ou seja, os módulos foram similares e a resistência à tração foi levemente superior para o compósito com matriz poliéster. Os compósitos exibiram falhas *DGM* (*Delamination Gage Middle*) com ruptura das fibras e delaminação.

Ainda na Tab. 1, a resistência à compressão (CS) para o compósito K<sub>5</sub>-Poliéster foi  $\approx 66\%$  menor que a apresentada pelo K<sub>5</sub>-Epóxi. Os valores para a resistência à flexão (FS) também foi menor para o compósito com matriz poliéster, apresentando uma redução de  $60\%$  quando comparado com o de matriz epóxi. O módulo em flexão ( $E_f$ ) dos compósitos K<sub>5</sub>-Epóxi e K<sub>5</sub>-Poliéster foram próximos, de  $11,698 \text{ GPa}$  e  $10,172 \text{ GPa}$ , respectivamente.

A resistência ao cisalhamento interlaminar, também conhecida como resistência *short beam* (SBS), apresentou diferenças significativas para as diferentes matrizes. O valor apresentado pelo compósito K<sub>5</sub>-Poliéster ( $12,02 \text{ MPa}$ ) foi aproximadamente  $37\%$  menor que o apresentado pelo compósito K<sub>5</sub>-Epóxi ( $18,50 \text{ MPa}$ ). Isso era esperado, pois a resina epóxi apresenta alta adesividade.

Analisando os desvios das propriedades obtidas para os dois compósitos com matriz poliéster, K<sub>5</sub>-Poliéster<sub>urdume</sub> e K<sub>5</sub>-Poliéster<sub>trama</sub>, vê-se que o último, que apresentou maior homogeneidade por C-Scan (Fig.1(c)), foi também o que apresentou menores desvios nas propriedades em geral, confirmando uma melhora no processamento.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas obtidas para os compósitos aramida/epóxi e aramida/poliéster.

Propriedades mecânicas		K <sub>5</sub> -Epóxi <sub>urdume</sub>	K <sub>5</sub> -Poliéster <sub>urdume</sub>	K <sub>5</sub> -Poliéster <sub>trama</sub>
Tração	TS [MPa]	387,68 ± 16,23	436,42 ± 19,78	487,62 ± 9,64
	E <sub>t</sub> [GPa]	15,559 ± 0,698	15,989 ± 1,015	15,250 ± 0,607
	ε [MPa]	4,75 ± 0,09 %	4,62 ± 0,11 %	4,86 ± 0,10 %
Compressão	CS [MPa]	95,58 ± 9,10	37,76 ± 1,99	26,83 ± 1,02
Flexão	FS [MPa]	199,58 ± 11,22	85,61 ± 8,52	78,09 ± 4,30
	E <sub>f</sub> [GPa]	11,698 ± 1,047	10,172 ± 0,353	8,993 ± 0,522
Short beam	SBS [MPa]	18,50 ± 3,13	12,02 ± 1,83	11,32 ± 1,25

## Conclusões

Com base nos resultados obtidos, foi possível obter uma melhora significativa na homogeneidade do laminado fabricado com a mudança de um único parâmetro de processamento, direção do fluxo da resina, como se notou pelas análises por C-Scan. E houve uma grande redução no tempo de processamento, de 75 min para 22 min, quando foi utilizada a resina poliéster, de menor viscosidade, ao invés da epóxi.

O compósito com poliéster apresentou resistência à tração (TS) superior e módulo de elasticidade (E<sub>t</sub>) próximo ao apresentado por aquele com matriz epóxi. Porém as resistências à compressão (CS), à flexão (FS) e *short beam* (SBS) para o compósito com epóxi chegou a ser três vezes superior. Para aplicações onde são solicitadas principalmente cargas de tração, a utilização da matriz poliéster seria mais interessante e indicada, devido à redução do custo obtendo propriedades similares e um custo quatro vezes menor que da resina epóxi, além da redução do tempo de processamento. Porém, para os outros carregamentos verificados, as propriedades do compósito com matriz poliéster foram bem inferiores em termos de resistência.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a DuPont pelo fornecimento do tecido de aramida e a CAPES pelo apoio financeiro.

## Referências

1. A. K. Banduru; L. Vetiyatil; S. Ahmad. *Composites Part B*, 2015, 76, 300-319.
2. Y. M. Kanitkar; A. P. Kulkarni; K. S. Wangikar. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4, 9627-9630.
3. B. Tepeduzu; R. Karakuzu. *Ceramics International*, 2019, 45, 1651–1660.
4. F. Levy Neto; L. C. Pardini. *Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia*, Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 2016, 31.
5. M. Sheinbaum; L. Sheinbaum; O. Weizman; H. Dodiuk; S. Kenig. *Composites Part B*, 2019, 165, 604–612.
6. M. Puttegowda; S. M. Rangappa; M. Jawaid; P. Shivanna; Y. Basavegowda; N. Saba. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 2018, 315-351.
7. M. V. Hosur; U. K. Vaidya; C. Ulven; S. Jeelani. *Composites Structures*, 2004, 64, 455-466.