

15th Brazilian Polymer Conference  
October 27-31, 2019

## PROPRIEDADES EM TRAÇÃO DE LAMINADOS HÍBRIDOS DE ARAMIDA/VIDRO-R PRODUZIDOS POR INFUSÃO Á VÁCUO

Amanda A. X. da Silva<sup>1\*</sup>, Bruna O. Koehler<sup>1</sup>, Mariana S. C. dos Santos<sup>1</sup>, Luís G. G. Reichwald<sup>1</sup> e Sandro C. Amico<sup>1</sup>

*1 – Department of Materials Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brazil  
amanda.albertin@ufrgs.br*

**Resumo:** O objetivo deste trabalho é analisar o efeito da sequência de empilhamento e hibridização nas propriedades em tração de compósitos híbridos aramida/vidro-R com matriz de epóxi fabricados por infusão a vácuo. Os laminados híbridos foram fabricados com o mesmo número de camadas, variando a sequência de empilhamento. As propriedades mecânicas em tração foram determinadas para cada laminado pela norma ASTM D3039. Com o aumento do número de camadas de tecido de fibra de vidro, houve aumento na resistência à tração (TS) e no módulo de elasticidade (E) e uma diminuição na deformação máxima ( $\epsilon_{\max}$ ) na direção principal do tecido (urdume). A partir da análise de teor de vazios ( $V_v$ ) e pelas imagens *C-Scan*, foi possível verificar um melhor processamento e qualidade dos compósitos obtidos quando os laminados de tecidos de aramida são hibridizados com vidro-R.

**Palavras-chave:** *Compósitos híbridos. Aramida. Vidro-R. Propriedades em tração. Infusão á vácuo.*

### *Tensile properties of hybrid aramid/R-glass composites manufactured by vacuum infusion*

**Abstract** - The goal of the present work is to analyze the effect of the hybridization and the stacking sequence on the tensile properties of aramid/Glass-R hybrid composites with epoxy matrix, manufactured by vacuum infusion. The hybrid laminates were produced with the same number of layers but varying the stacking sequence. The mechanical tensile properties of each laminate were determined according to ASTM D3039. With the increase in the number of glass-fiber fabric layers there was an increase in tensile strength ( $TS_x$ ) and in elastic modulus ( $E_x$ ), and decrease in maximum strain ( $\epsilon_{\max}$ ) in the main fabric direction (warp). From the analysis of void content ( $V_v$ ) and with the *C-scan* images, it was possible to verify an improvement in processing and composite quality when the aramid fabric laminates are hybridized with R-glass.

**Keywords:** *Hybrid composites. Aramid. R-Glass. Tensile properties. Vacuum infusion.*

### **Introdução**

Compósitos poliméricos reforçados com fibras têm sido utilizados em diversas áreas de aplicação, como automotivo, aeronáutico, náutico, civil, esportivo e defesa [1]. As fibras de vidro são as mais utilizadas para compósitos com matriz polimérica, estando disponíveis em diferentes *grades*, como vidro-E, vidro-AR, vidro-R e vidro-S [2]. A fibra de vidro-R apresenta maior resistência e rigidez do que a fibra de vidro-E comumente utilizada e que apresenta menor custo [3]. A fibra de aramida, com uma estrutura de poliamida aromática, é também uma das mais importantes fibras de reforço em compósitos, com propriedades interessantes como baixa densidade, boa tenacidade e elevada resistência ao impacto [2].

O processo de infusão a vácuo é um método simplificado, ambientalmente responsável e econômico [4], que utiliza moldes leves e de baixo custo e permite a fabricação de peças grandes, complexas e integradas, com bom acabamento superficial e praticamente sem emissão de voláteis. Além disso, permite o uso de matérias-primas de menor custo, que podem ser armazenadas à

temperatura ambiente por um período maior de tempo, em comparação com tecidos pré-impregnados, tornando-se uma opção atraente em diferentes setores [5].

Quando dois ou mais tipos de reforços, como vidro e aramida, são usados simultaneamente em um compósito, obtém-se os chamados compósitos híbridos [6]. Fibras de maior módulo, por exemplo, vidro-R, fornecem rigidez e suportam a maior quantidade de carga, enquanto fibras de maior tenacidade, como a aramida, tornam o compósito mais tolerante a danos [7]. Alguns pesquisadores já avaliaram o efeito da hibridização, da sequência de empilhamento e da orientação das fibras no comportamento mecânico de laminados híbridos vidro-E/Kevlar<sup>®</sup>49 [8,9], a performance em impacto de baixa velocidade de híbridos de aramida/vidro-S [10,11], e o efeito da sequência de empilhamento nas propriedades mecânicas e térmicas de híbridos Kevlar<sup>®</sup>49/vidro-S para verificar [12].

Assim, o objetivo principal do presente trabalho é verificar o efeito da hibridização nas propriedades mecânicas em tração dos laminados de aramida (Kevlar)/vidro-R focando na qualidade do processo de fabricação.

## Experimental

Para a fabricação dos laminados híbridos aramida/vidro, foram utilizados como reforço tecidos planos de Kevlar, cedido pela DuPont (gramatura de 440 g/m<sup>2</sup>), e de vidro-R (800 g/m<sup>2</sup>) fornecido pela Owens Corning. Anteriormente ao processo, o tecido de Kevlar é seco em estufa com circulação de ar por 2 h a 100°C para remover a umidade dos tecidos.

Empregou-se a resina epóxi AR260 com endurecedor AH260 (AR/AH260) na proporção 100/26 g, adquirida da Barracuda. Esta resina foi selecionada por ser de baixa viscosidade e elevado tempo de gel, de ≈110 min, parâmetros essenciais para processamento por moldagem líquida.

### *Produção dos laminados*

O processo de infusão a vácuo foi selecionado para a produção dos compósitos, e consiste em uma cavidade de molde selada, contendo uma pré-forma, que é criada entre um molde único e um *vaccum bag*. Para tal, cinco camadas de tecidos são empilhadas em cima do molde rígido, e é adicionada uma camada de *peel ply* e uma malha de fluxo cobrindo uma pequena área do reforço para auxiliar na distribuição da resina. A entrada e a saída de resina são feitos através de canais de distribuição de resina, utilizando tubos espirais posicionados no molde. O molde é selado com *tacky tape*, colada na periferia da área de moldagem, e com o *vaccum bag*. A cavidade é evacuada (100 kPa = 1 bar), removendo ar e compactando o reforço. Em seguida, também pela ação do vácuo, a resina é introduzida pela porta de entrada para impregnar o tecido.

Após a infiltração completa, as placas (420 × 310 mm<sup>2</sup>) foram curadas por 24 h sob vácuo à temperatura ambiente, desmoldadas e depois pós-curadas em estufa por 16 h a 65 °C. A Fig.1 ilustra os cinco tipos de configurações de reforço estudados, três deles híbridos, e a nomenclatura adotada, onde K representa o tecido de aramida (Kevlar) e o G o tecido de vidro-R.



Figure 1 – Sequências de empilhamento e nomenclaturas usadas para cada compósito.

### *Caracterização Física e Mecânica*

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 ( $V_F$ ), aramida ( $V_K$ ), vidro-R ( $V_G$ ), matriz ( $V_M$ ), e vazios ( $V_V$ )) foram determinadas de acordo com a norma ASTM D3171.

Amostras foram obtidas por corte das placas para os ensaios mecânicos. Ensaios de tração foram realizados em equipamento Instron (modelo 3382) de acordo com a norma ASTM D3039 e cinco amostras (formato retangular de  $25 \times 250 \text{ mm}^2$ ) de cada material foram ensaiadas a uma velocidade de 2 mm/min até sua ruptura. As deformações longitudinais e transversais foram obtidas utilizando vídeo-extensômetro.

## Resultados e Discussão

A Tab. 1 mostra as características físicas de cada laminado fabricado. Em relação às frações volumétricas dos constituintes, os laminados híbridos,  $K_2GK_2$ ,  $KGKGK$ ,  $KG_3K$ , apresentaram uma maior  $V_F$  total que os laminados com um único tipo de fibra,  $K_5$  e  $G_5$ , sendo  $G_5$  o menor  $V_F$ . O compósito  $G_5$  exibiu uma menor quantidade de vazios, de 7,4%, enquanto os híbridos mostraram valores intermediários. A densidade ( $\rho$ ) e a espessura ( $t$ ) dos laminados aumentaram conforme a fração volumétrica de fibras de vidro ( $V_G$ ) foi crescendo.

Tabela 1 – Características e frações volumétricas dos compósitos Kevlar/vidro.

Laminado	Empilhamento	Teor volumétrico dos constituintes						$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
		t (mm)	$V_F$	$V_G$	$V_K$ (%)	$V_M$	$V_V$	
$K_5$	$[(0_f^K)_5]$	2,80	55,6	--	55,6	28,6	15,8	1,20
$K_2GK_2$	$[(0_f^K)_2/0_f^G/(0_f^K)_2]$	2,83	58,1	12,0	46,1	29,6	12,3	1,37
$KGKGK$	$[0_f^K/0_f^G/0_f^K/0_f^G/0_f^K]$	2,86	58,3	23,4	34,9	28,0	13,7	1,46
$KG_3K$	$[0_f^K/(0_f^G)_3/0_f^K]$	2,91	56,1	32,6	23,5	31,6	12,3	1,63
$G_5$	$[(0_f^G)_5]$	3,07	50,9	50,9	--	41,6	7,4	1,92

Imagens *C-Scan* foram usadas para verificar a qualidade de processamento dos compósitos, verificando a homogeneidade obtida, apresentadas na Fig. 2. Pode ser identificado um acúmulo de resina na extremidade de entrada de resina, indicado pela coloração mais clara (azul claro). A resina acumulada na extremidade de entrada pode ter ocorrido devido o aumento da viscosidade da resina com o tempo (processo de cura), que conseqüentemente dificulta o avanço do fluxo de resina dentro do meio poroso (reforço). Comparando os laminados híbridos, com uma maior quantidade de fibras de camadas de fibras de vidro-R há uma maior homogeneidade das placas, apresentando um menor acúmulo de resina ( $KG_3K$ ), portando uma melhora na qualidade de processamento.

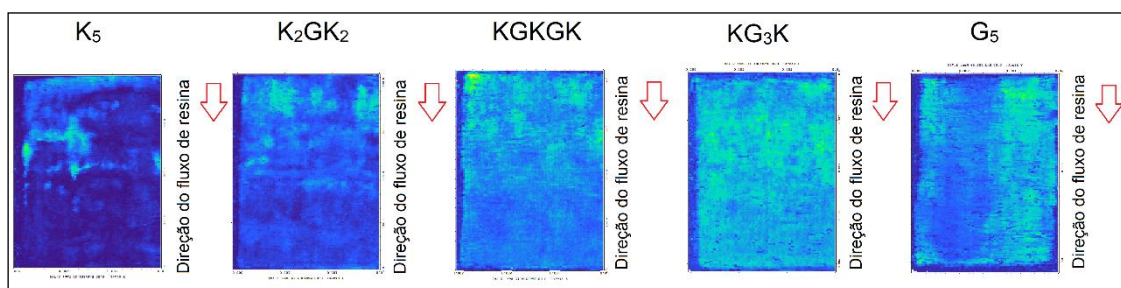


Figure 2 – Imagens *C-Scan* dos compósitos.

### Propriedades Mecânicas de Tração

Na Fig. 3 pode-se ver curvas medianas de tensão de tração vs deformação e a Tab. 2 apresenta os valores de resistência à tração ( $TS_x$ ), módulo de elasticidade ( $E_x$ ), máxima deformação ( $\epsilon_{max}$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu_{xy}$ ) para os cinco laminados estudados. A amostra  $K_5$  (curva vermelha) um

$TS_x = 391 \text{ MPa}$ ,  $E_x = 16,386 \text{ GPa}$ ,  $\epsilon_{\max} = 4,75\%$  e  $\nu_{xy} = 0,29$ . A falha apresentada foi do tipo *DGM* (*Delamination gage middle*), com ruptura das fibras e delaminação.

Para o compósito  $G_5$  (curva preta),  $E_x = 28,583 \text{ GPa}$  e  $\nu_{xy} = 0,20$ . O comportamento das curvas das 5 amostras do laminado  $G_5$  foram similares, mas a falha foi prematura, do tipo *LAT* (*Lateral at grip top*), ocorrida próximo à garra, inviabilizando os resultados de  $TS_x$  e  $\epsilon_{\max}$ . Para comparação, Ma *et al.* [13] relatou módulo e resistência à tração de  $27,093 \text{ GPa}$  e  $490 \text{ MPa}$ , respectivamente, para um compósito similar de vidro-R/epóxi.

No compósito  $K_2GK_2$  (curva azul), houve primeiro a ruptura da camada central de fibra de vidro devido a sua menor capacidade de deformação, a uma tensão média de  $316 \text{ MPa}$ , e posteriormente acontece a falha das camadas de aramida (tensão média de  $288 \text{ MPa}$ ). O modo de falha exibido pelo laminado  $K_2GK_2$  foi similar ao dos laminados  $K_5$  e  $G_5$ , com ruptura de fibras e delaminação. O híbrido  $KGKGK$  (curva magenta) também apresentou uma queda inicial de tensão pela falha das duas camadas de vidro-R (em  $384 \text{ MPa}$ ), seguido da ruptura das 3 camadas de Kevlar (em  $217 \text{ MPa}$ ). Entretanto, o comportamento do híbrido  $KG_3G$  (curva verde) foi mais próximo do apresentado pelo compósito  $G_5$ , pois houve falha total do laminado quando as camadas de vidro-R romperam. Ocorreu delaminação nas camadas externas de Kevlar e ruptura das fibras com pouca delaminação entre as 3 camadas centrais de vidro-R.

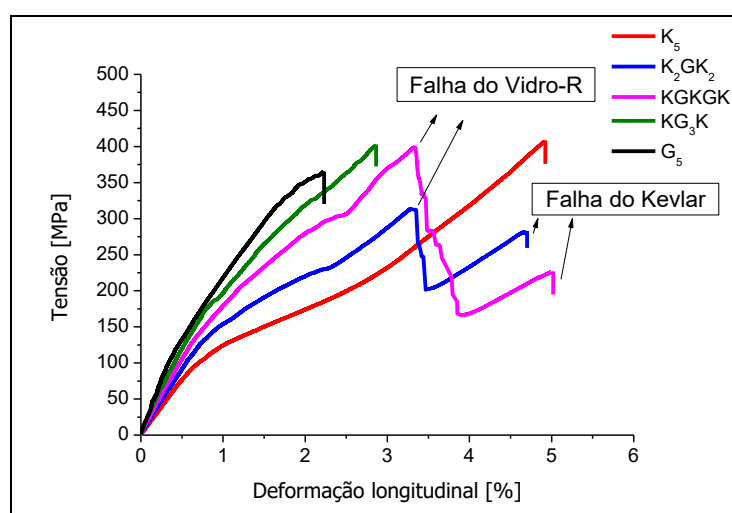


Figura 3 – Curva mediana de tensão-deformação dos compósitos.

Baseado nos dados da Tab. 2, vê-se que com o aumento da quantidade de camadas de vidro-R houve um aumento na resistência e na rigidez e diminuição da deformação máxima. O híbrido  $KG_3G$  ( $398 \text{ MPa}$ ) apresentou o maior  $TS$ , que provavelmente seria menor que o  $G_5$  que exibiu falha prematura (próxima à garra) na tensão de  $349 \text{ MPa}$ . E o compósito de vidro puro obteve maior módulo e menor coeficiente de Poisson.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas de tração dos compósitos laminados.

COMPÓSITOS	$E_x$ [GPa]	$TS_x$ [MPa]	$\epsilon_{\max}$ [%]	$\nu_{xy}$
<b><math>K_5</math></b>	$15,559 \pm 0,698$	$387,68 \pm 16,23$	$4,75 \pm 0,09$	$0,29 \pm 0,03$
<b><math>K_2GK_2</math></b>	$18,588 \pm 0,610$	$316,59 \pm 17,12$	$3,58 \pm 0,53$	$0,28 \pm 0,09$
<b><math>KGKGK</math></b>	$21,800 \pm 1,744$	$384,83 \pm 15,56$	$3,33 \pm 0,09$	$0,24 \pm 0,15$
<b><math>KG_3K</math></b>	$23,933 \pm 1,198$	$398,83 \pm 21,23$	$2,73 \pm 0,27$	$0,26 \pm 0,05$
<b><math>G_5</math></b>	$28,583 \pm 2,953$	*	*	$0,20 \pm 0,05$

\*Falha prematura

## Conclusões

Imagens *C-Scan* mostraram uma maior homogeneidade nas placas dos laminados com mais camadas de fibra de vidro, apresentando áreas com menor acúmulo de resina. A quantidade de vazios também foi reduzida ao usar camadas de vidro-R, outro parâmetro que indica uma melhora no processamento. Em relação aos resultados de tração, com o aumento do número de camadas de fibra de vidro houve aumento na resistência à tração e no módulo de elasticidade e redução da deformação máxima e do coeficiente de Poisson.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a DuPont pelo fornecimento da fibra de aramida (Kevlar) e à CAPES pelo apoio financeiro.

## Referências

1. A. K. Banduru; L. Vetiyatil; S. Ahmad. *Composites Part B*, 2015, 76, 300-319.
2. M. Puttegowda; S. M. Rangappa; M. Jawaid; P. Shivanna; Y. Basavegowda; N. Saba. *Composites Science and Engineering*, 2018, 315-351.
3. A. González-Jiménez; L. E. Caldeira; R. Scazzosi; A. Manes; S. C. Amico; M. Giglio. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 2018.
4. M. V. Hosur; U. K. Vaidya; C. Ulven; S. Jeelani. *Composites Structures*, 2004, 64, 455-466.
5. S. Nunes. Processamento por Infusão a Vácuo de Compósitos Espessos Aramida/Epóxi e Análise do Desempenho sob Impacto. 2018. *Tese (Doutorado em Engenharia)* – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
6. Y. M. Kanitkar; A. P. Kulkarni; K. S. Wangikar. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4, 9627-9630.
7. D. K. Jesthi; P. Mandal; A. K. Rout; R. K. Nayak. *Procedia Manufacturing*, 2018, 20, 530–535.
8. A. Srivathsan; B. Vijayaram; Dr. R. Ramesh; Gokuldass. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4, 8928–8937.
9. M. T. Isa, A. S. Ahmed; B. O. Aderemi; R. M. Taib; I. A. Mohammed-Dabo. *Composites: Part B*, 2013, 52, 217-223.
10. M. Bulut; A. Erkli. *Mechanics of Materials*, 2018, 117, 225-234.
11. M. Bulut; A. Erkli; E. Yeter. *Composites: Part B*, 2016, 98, 9-22.
12. R. Potluri; R. S. Dheeraj; G. V. V. N. G. Vital. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5, 5876-5885.
13. D. Ma; A. Manes; S. C. Amico; M. Giglio. *Composite Structures*, 2019, 216, 187–200.