



# Comportamento Mecânico de Estruturas Fabricadas em Compósito Termoplástico (Fibra de Vidro/PPS) sob Carregamento de Tração, Compressão e Cisalhamento

Lucas Calefe, EESC/USP, [calefelucas1@gmail.com](mailto:calefelucas1@gmail.com)

Carlos Eduardo Gomes Castro, IFSP, [carlos.castro@ifsp.edu.br](mailto:carlos.castro@ifsp.edu.br)

Volnei Tita, EESC/USP, [voltita@usp.br](mailto:voltita@usp.br)

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria aeronáutica demanda materiais de alto desempenho para reduzir peso e aumentar a eficiência. Compósitos de fibra de vidro apresentam boa relação custo-benefício, resistência à corrosão e propriedades dielétricas (MALLICK, 2007). O PPS, matriz termoplástica semicristalina, combina rigidez, estabilidade dimensional e resistência química, além de boa tolerância ao dano (KON; CINTRA, 2019). Impactos de baixa velocidade podem gerar danos internos (BVID) que comprometem a resistência residual à compressão (ABRATE, 1998; GUIMARÃES, 2010). No Grupo de Estruturas Aeronáuticas/GEA da EESC-USP, diversos estudos já exploraram compósitos (FERREIRA, 2015; MEDEIROS, 2016; SOUZA, 2021). Este trabalho busca caracterizar as propriedades e os mecanismos de falha de laminados de PPS reforçados com fibra de vidro sob carregamentos de tração, compressão e cisalhamento.

## 2. METODOLOGIA

O compósito estudado é um laminado de PPS com tecido bidirecional de fibra de vidro satin 5HS  $[(0/90)_7]$  fabricado pela TenCate. A caracterização mecânica incluiu ensaios de tração (ASTM D3039), compressão (ASTM D6641) e cisalhamento em V-notch (ASTM D7078), conduzidos em máquina INSTRON 5985 (250 kN) com monitoramento por Digital Image Correlation/DIC, visando determinar módulo de elasticidade, valores de resistência e de deformações limites nas direções do urdume/warp e da trama/fill.

## 3. RESULTADOS

Os ensaios quase-estáticos confirmaram o comportamento ortotrópico do laminado PPS/FV, com diferenças claras entre as direções warp (1) e fill (2). Em tração, as curvas tensão-deformação (Figs. 1a–b) foram lineares até a fratura. A direção 1 apresentou módulo  $E_{11} = 22,49 \text{ GPa}$  e resistência  $X_T = 300,34 \text{ MPa}$ , enquanto a direção 2 resultou em  $E_{22} = 19,29 \text{ GPa}$  e  $Y_T = 223,65 \text{ MPa}$ , evidenciando um valor de resistência 34% superior na direção 1.

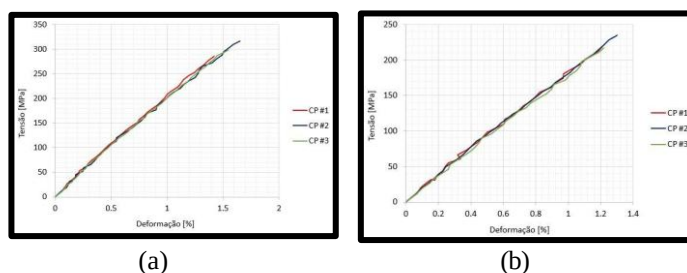


Figura 1. Tensão vs. deformação para tração na (a) direção 1 (*warp*) e (b) direção 2 (*fill*) (Autoria Própria, 2025).

Sob compressão, as curvas tensão vs. deformação exibiram leve não-linearidade. A resistência à compressão na direção 1 ( $X_C = 339,16 \text{ MPa}$ ) Fig. (2.a) foi 13% superior à resistência à tração nessa direção, e na direção 2, a resistência à compressão ( $Y_C = 306,03 \text{ MPa}$ ) Fig. (2.b) foi 37% superior à de tração.

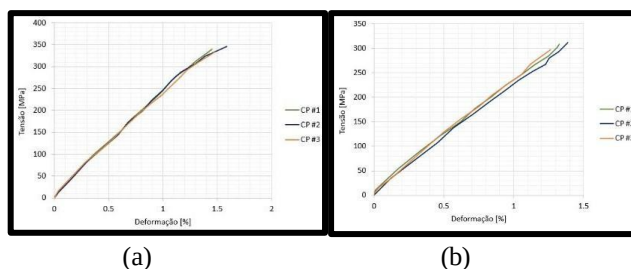


Figura 2. (a) Tensão vs. deformação para compressão na (a) direção 1 (*warp*) e (b) direção 2 (*fill*) (Autoria Própria, 2025).



Em cisalhamento no plano, o comportamento foi não-linear. O módulo de elasticidade e a resistência medidas na direção 1 ( $G_{12}$  e  $S_{12}$ , Fig. 3a) foram 7% e 8% superiores, respectivamente, aos valores medidos na direção 2 (Fig. 3b). Os ensaios foram interrompidos em 5% de deformação, conforme norma, sem apresentar a fratura final do material.

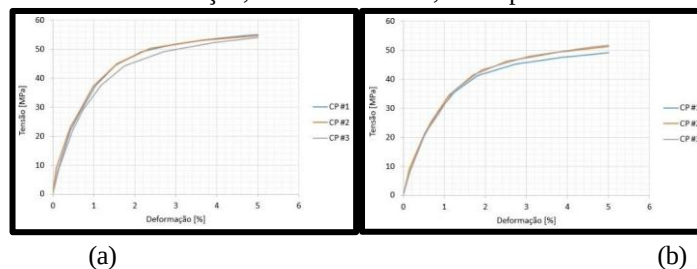


Figura 3. (a) Tensão vs. deformação de cisalhamento medidos na direção 1 (*warp*) e (b) na direção 2 (*fill*) (Autoria Própria, 2025).

A Tabela 1 apresenta os valores médios obtidos. O compósito exibiu comportamento ortotrópico, com variação nos valores de módulo de elasticidade e de resistência mecânica em função das direções do urdume/warp e da trama/fill. A resistência à compressão superou a de tração, efeito associado à arquitetura do tecido. Já a resposta ao cisalhamento foi acentuadamente não-linear.

**Tabela 1 – Valores médios das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios quase-estáticos**

| Propriedade                                | Direção 1<br>(Urdume) | Direção 2<br>(Trama) |
|--------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Módulo de elasticidade em tração (GPa)     | $E_{11} = 22,49$      | $E_{22} = 19,29$     |
| Resistência à Tração (MPa)                 | $X_T = 300,34$        | $Y_T = 223,65$       |
| Deformação de Ruptura em Tração (%)        | $X'_T = 1,54$         | $Y'_T = 1,24$        |
| Coefficiente de Poisson                    | $\nu_{12} = 0,113$    | -                    |
| Resistência à Compressão (MPa)             | $X_C = 339,16$        | $Y_C = 306,03$       |
| Deformação de Falha em Compressão (%)      | $X'_C = 1,50$         | $Y'_C = 1,32$        |
| Módulo de Cisalhamento no Plano (GPa)      | $G_{12} = 3,76$       | $G_{12} = 3,51$      |
| Resistência de Cisalhamento no Plano (MPa) | $S_{12} = 54,62$      | $S_{12} = 50,60$     |

#### 4. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Os resultados experimentais caracterizaram o comportamento ortotrópico do compósito PPS/FV, destacando as curvas de tração, compressão e cisalhamento, bem como o maior valor de resistência à compressão em relação à tração. O estudo fornece base de dados útil para o projeto de componentes e para a calibração de modelos constitutivos do material.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ABRATE, S. ABRATE, S. Impact on Composite Structures. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.  
KON, T. E.; CINTRA, J. S. Polissulfeto de Fenileno (PPS). In: Polímeros de Engenharia. São Paulo: Artliber, 2019.  
MALLICK, P. K. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. 3.ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.  
FERREIRA, G. F. O. Estruturas de material compósito sob tração e impacto. Dissertação (Mestrado) – EESC-USP, 2015.  
MEDEIROS, R. Critério para previsão da resistência residual de compósitos danificados por impacto. EESCUSP, 2016.  
SOUZA, G. Comportamento de placas laminadas sob cisalhamento após impacto. Dissertação (Mestrado) EESCUSP, 2021.  
GUIMARÃES, T. C. Tolerância ao dano de impacto em compósitos aeronáuticos. Dissertação (Mestrado) – ITA, 2010.

#### 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da EESC-USP e ao Grupo de Estruturas Aeronáuticas da EESC/USP pelo suporte institucional e infraestrutura disponibilizada, bem como à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

#### 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.