

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Avaliação da porosidade e da resistência ao cisalhamento em compósitos de matriz fenólica reforçados com fibras de carbono

Bolsista: Mariana Martins Duque

Orientador(a): Dr. Luiz Claudio Pardini

Período a que se refere o relatório: Janeiro de 2018 a Agosto de 2018

### Resumo

Na primeira parte do trabalho, foram apresentados os resultados de ensaios de cisalhamento interlaminar e a análise de porosidade por ImageJ. Os compósitos foram obtidos com fibras de carbono provenientes de poliacrilonitrila (PAN) e fibras de celulose regeneradas (Rayon), com matriz de resina fenólica. Nesse relatório será mostrado o ensaio de cisalhamento pelo método de Iosipescu. A preparação dos materiais compósitos foi realizada por processo de laminação a vácuo e prensagem, sob ciclo de temperatura controlado. A característica construtiva laminar impõe restrições na aplicação desses materiais onde esforços de cisalhamento são presentes em estruturas. Para a realização do ensaio foi necessário adequação do corpo-de-prova conforme a norma ASTM 5379, para cisalhamento no plano de fibras. Os resultados de resistência obtidos anteriormente por meio do ensaio de cisalhamento interlaminar foram de 21 MPa para o compósito ex-Rayon e 47 MPa para o compósito ex-PAN. Para o método de Iosipescu os resultados foram distintos, o compósito ex-Rayon obteve resistência de 97 MPa enquanto o ex-PAN apresentou 143 MPa. As fraturas ocasionadas pelos ensaios mecânicos foram analisadas através do microscópio Stereo, observando-se o comportamento de cada compósito quando submetido ao cisalhamento até a ruptura. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que os compósitos reforçados com fibra de carbono PAN apresentaram maior resistência mecânica ao cisalhamento.

## 1. Introdução

Com os recorrentes avanços, veio a necessidade de aprimorar os materiais aplicados na indústria moderna, objetivando atender as exigências das novas tecnologias e aplicações. O desenvolvimento de estudos com materiais compósitos permitiu a fabricação de componentes estruturais antes restritos a materiais metálicos. A utilização desses materiais na indústria aeronáutica resultou em avanços de desempenho. A redução do peso estrutural da aeronave resulta no aumento da carga paga, no alcance e na redução do consumo de combustível, afetando significativamente os custos operacionais.

As estruturas das aeronaves estão constantemente sob solicitações mecânicas como tração, flexão, compressão e torção. Muitas das vezes esses esforços são combinados. Por isso é importante uma análise precisa das propriedades do material, avaliando sua confiabilidade.

Apesar dos compósitos estruturais estarem constantemente sob esforços de cisalhamento não há muitos estudos concentrados nesse âmbito. O cisalhamento é ocasionado por tensões cortantes em sentidos opostos gerando um efeito tesoura em elementos estruturais.

Um dos métodos utilizados para determinar a resistência e o módulo do cisalhamento no plano de um material é através do ensaio de Iosipescu. Este ensaio foi proposto inicialmente para metais e é aplicado em materiais compósitos desde os anos 1970. Os danos associados a falhas em cisalhamento são intralaminares, interlaminares e translaminares.

## 2. Materiais e Métodos

Os compósitos avaliados no presente trabalho foram fabricados a partir do processo manual (*hand lay-up*). Para a fase reforço foi selecionada as fibras de carbono obtidas a partir da celulose regenerada, *rayon*, e da poliacrilonitrila (PAN). A fase contínua dos compósitos utilizada foi polimérica com resina fenólica CR-2611.

O processo de cura para a resina termofixa foi com rampa de aquecimento variando de 25 a 180 °C em 45 minutos, obtendo uma variação de aproximadamente 3,5 °C/min. Foi preparada a bolsa de vácuo com auxílio de *peel ply* para absorver o excesso de resina. As 20 camadas de tecido 0/90° de fibra de carbono resultaram em compósitos com espessura de 10 mm para o compósito de *rayon* e 6 mm para o compósito de PAN. As características dos compósitos moldados e curados são mostradas na Tabela 1, por meio das frações em massa e volume e pela massa específica dos mesmos.

**Tabela 1.** Dados dos compósitos laminados de fibra de carbono com matriz fenólica.

	Unidade	Rayon	PAN
Massa Compósito	g	858,20	795,30
Volume Compósito	cm <sup>3</sup>	517,50	550,85
Massa Específica Compósito	g	1,31	1,37
Massa Carbono	%	56%	50%
Massa Matriz	%	44%	50%
Volume Carbono	%	46%	38%
Volume Matriz	%	47%	56%
Volume Poros	%	7%	6%

A avaliação da resistência ao cisalhamento no plano dos compósitos foi realizada a partir da norma ASTM 5379 “*Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*”. Esta norma é mais adequada na determinação da resistência e do módulo de cisalhamento por proporcionar o cisalhamento puro na região central do corpo de prova. O corpo-de-prova tem geometria simples. Para a realização do ensaio, o mesmo é fixado em um dispositivo de forma que sua movimentação fique restrita. Durante o ensaio é aplicada uma carga em um dos lados do dispositivo gerando um efeito tesoura no corpo-de-prova. A tensão é concentrada na região do entalhe.

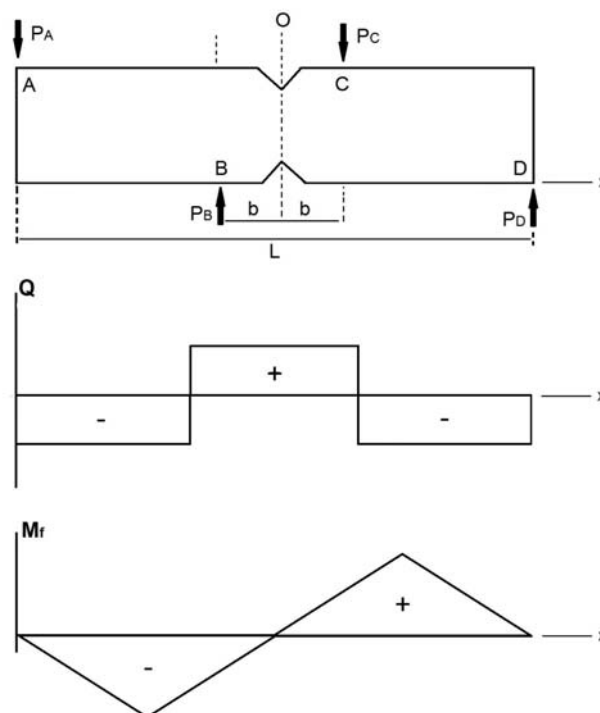


Figura 1 – Diagrama de esforço cortante e momento fletor em ensaio de Iosipescu.

Por meio do diagrama de esforço cortante e momento fletor (Figura 1) é possível determinar as cargas exercidas no corpo. Considerando que a força  $P$  e o momento fletor  $M_f$  resultantes no centro  $O$  do corpo-de-prova são nulos, temos:

$$\sum P_y = 0 \quad [1]$$

$$\sum M_f = 0 \quad [2]$$

A força cortante  $Q$  e o momento fletor  $M_f$  é estabelecido pela equação:

$$Q = \frac{P \cdot b}{L - b} \quad [3]$$

$$M_f = \frac{P \cdot b}{2} \quad [4]$$

Substituindo:

$$P_A \cdot \frac{L}{2} - P_B \cdot b = -P_D \cdot \frac{L}{2} + P_C \cdot b \quad [5]$$

$$P_A = -P_D = P_1 \quad [4]$$

$$-P_B = P_C = P_2 \quad [6]$$

$$P_1 \cdot \frac{L}{2} - P_2 \cdot b = 0 \quad [7]$$

O Círculo de Mohr é uma representação gráfica do plano de tensões que agem sobre um determinado corpo. Este método constitui-se de um círculo cujas coordenadas representam as tensões normais  $\sigma$ , eixo horizontal, e tangenciais  $\tau$ , eixo vertical, em um plano e a posição angular do raio no ponto fornece a orientação do plano (Figura 2). A abordagem permite visualizar as variações os componentes das tensões normais e de cisalhamento conforme orientadas em direções diferentes.

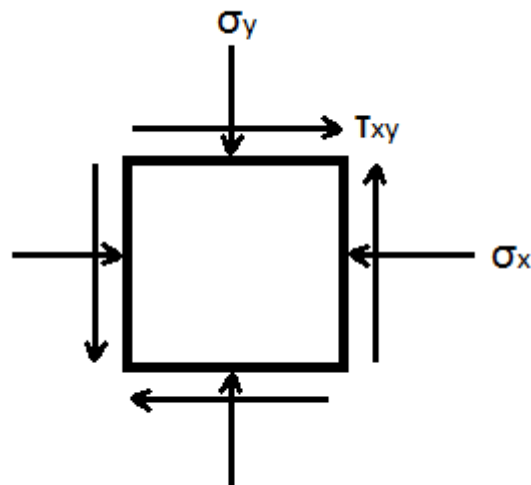


Figura 1 – Representação do plano de tensões normais e de cisalhamento.

O Círculo de Mohr pode ser desenhado a partir do centro C correspondente a tensão normal média e o raio R do círculo pode ser determinado a partir da equação da circunferência.

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{mín}}{2} \quad [8]$$

$$R = \sqrt{(\sigma_{xt} - \sigma_{med})^2 + (\tau_{xtyt})^2} \quad [9]$$

Nota-se que a tensão de cisalhamento é máxima quando a tensão normal é nula.

$$\tau_{máx} \rightarrow 2\theta = 90^\circ \quad [10]$$

$$\theta = 45^\circ \quad [11]$$

O Círculo de Mohr (Figura 3) demonstra que a tensão é exercida a um ângulo de 45° no plano. A melhor posição para o extensômetro no corpo-de-prova é em  $\theta$ , ou seja, a 45° em relação a horizontal.

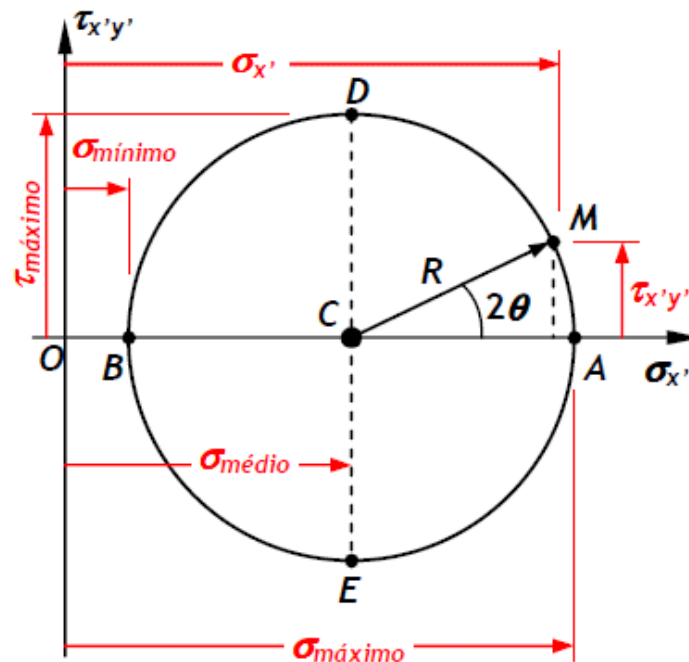


Figura 2. Representação do Círculo de Mohr

De acordo com a norma ASTM 5379 “*Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*”, a tensão de cisalhamento máxima  $\tau$  é estabelecida pela equação:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad [13]$$

Os corpos-de-prova fraturados foram submetidos a análise de falha por microscopia. Após quantificar a porosidade dos compósitos a análise de microscopia possibilitou observar as falhas ocasionadas pelo ensaio e o comportamento da interface fibra/matriz nos compósitos. Para esta análise foi utilizado o stereocópio.

### 3. Resultados

Conforme mencionado no relatório anterior, as fraturas ocasionadas pelo ensaio de cisalhamento interlaminar nos corpos-de-prova foram analisadas por microscopia (Figura 4). De acordo com Garcia, 2000, quando uma carga é aplicada no centro a força provoca no corpo deslocamento em planos opostos. O deslocamento é proporcional à distância da linha neutra sendo nulo no centro.

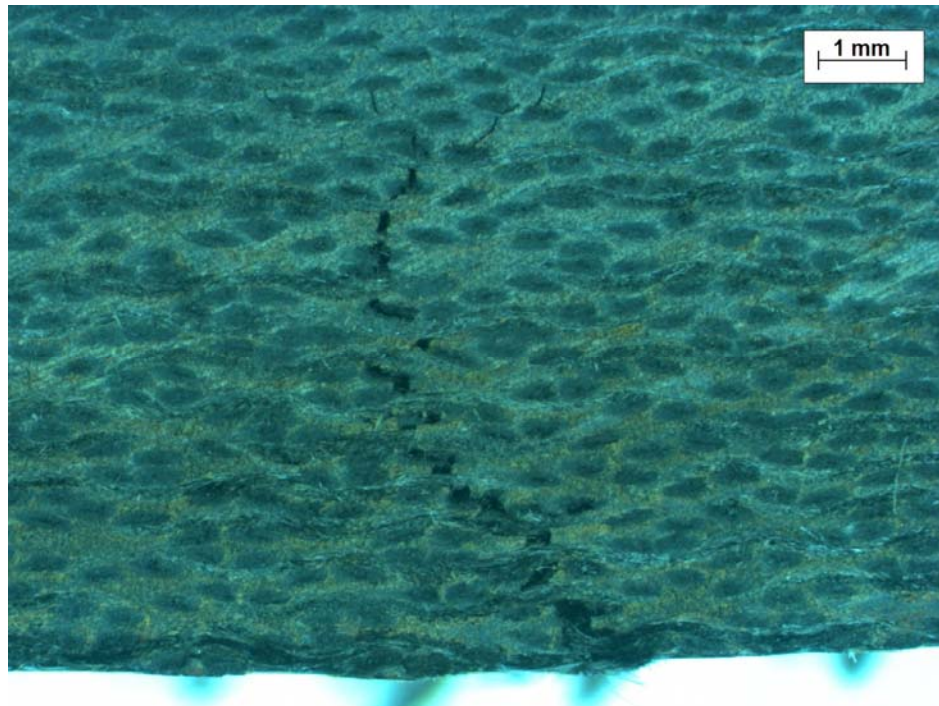


Figura 4. Fractografia do ensaio de cisalhamento interlaminar no compósito de *Rayon* com aumento de 12,5x.

O ensaio pelo método de Iosipescu permitiu avaliar a resistência ao cisalhamento e comparar o desempenho dos compósitos laminados. O compósito com fibra de carbono ex-PAN obteve resistência superior com a falha estrutural a uma tensão de aproximadamente 69,3MPa (Figura 5), desvio padrão de 1,2, enquanto o compósito com fibra de carbono ex-rayon obteve aproximadamente 47,8MPa (Figura 6), desvio padrão de 0,7.

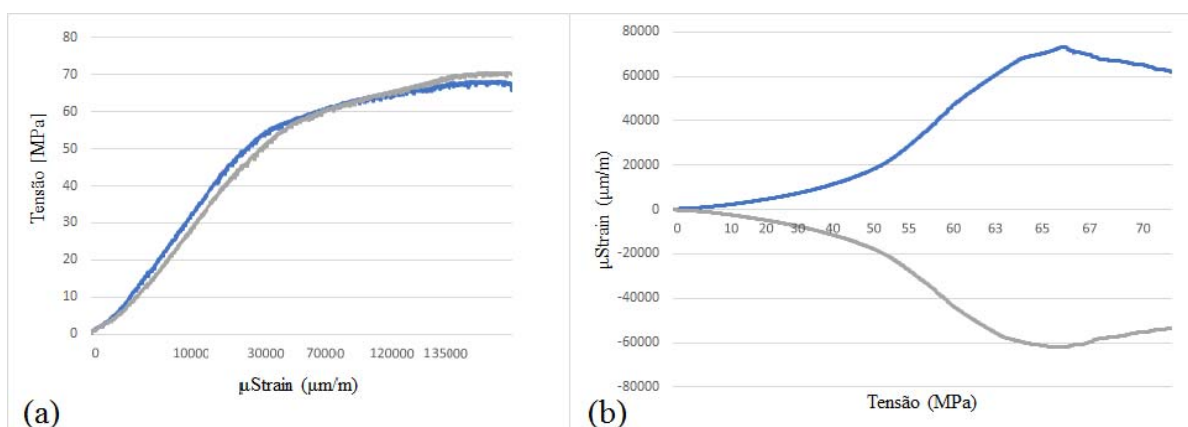


Figura 5. (a) Variação da tensão pelo deslocamento do compósito PAN. (b) Deslocamento em z do compósito de PAN de acordo com a tensão aplicada.



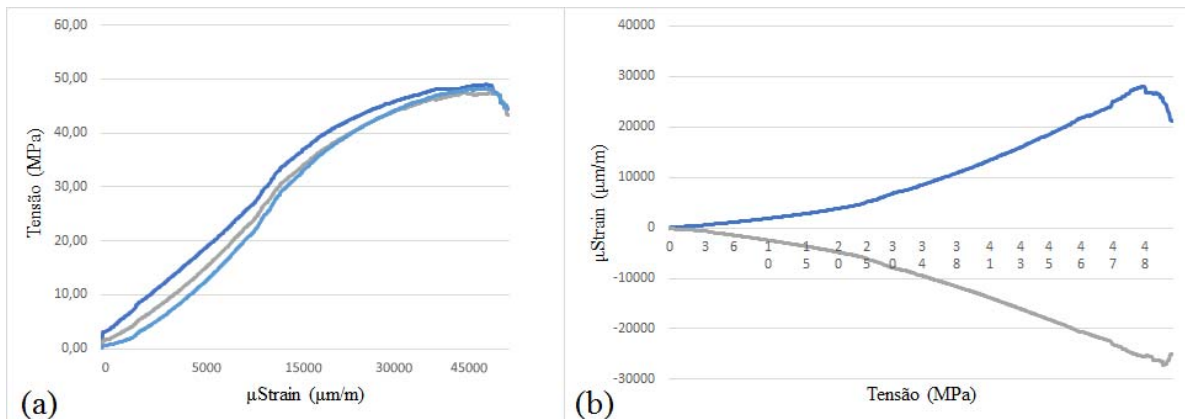


Figura 6. (a) Variação da tensão pelo deslocamento do compósito *Rayon*. (b) Deslocamento em z do compósito de *Rayon* de acordo com a tensão aplicada.

De acordo com o trabalho desenvolvido por Gonçalves (2010), a resistência ao cisalhamento de compósitos de fibra de carbono  $0/90^\circ$  com epóxi é 67,5MPa. Portanto, os resultados obtidos no presente trabalho com a resina fenólica foram similares.

A fractografia permitiu detectar o sentido da tensão máxima exercida no corpo que ocasionou a falha do material através do deslocamento e da fratura do corpo-de-prova nas figuras 7 e 8.



Figura 7. Deslocamento e fratura do compósito de PAN.



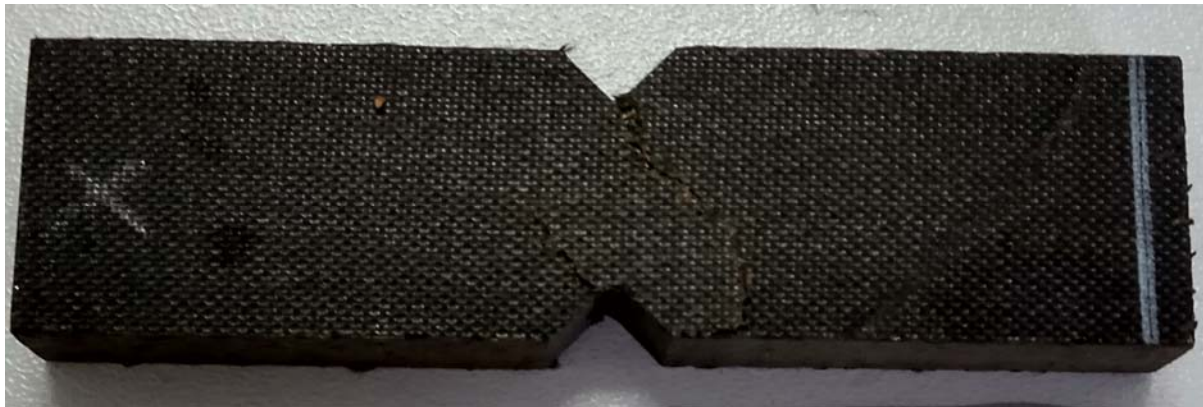


Figura 8. Fratura do compósito de Rayon em 45°.

As fraturas dos compósitos formam usualmente um ângulo de em 45° em relação o eixo horizontal, demonstrando que a tensão máxima foi concentrada nesse sentido, conforme indicado no Círculo de Mohr.

#### 4. Conclusões

Nos ensaios anteriores pelo método de cisalhamento interlaminar o reforço de fibra de carbono *ex-rayon* apresentou resultado inferior a fibra de carbono *ex-PAN*. Pelo método de Iosipescu os resultados foram semelhantes. Os compósitos reforçados com a fibra de carbono obtida a partir da poliacrilonitrila apresenta resultados superiores aos compósitos *ex-rayon*.

Não somente a resistência ao cisalhamento é superior, mas também é possível obter compósitos através de laminação manual com menor porosidade por volume.

#### 6. Divulgação dos Resultados

A pesquisa desenvolvida para o programa do PIBIC/IAE junto ao CNPq está sendo utilizada como parte experimental do trabalho de conclusão de curso para graduação em Engenharia Aeronáutica na Universidade de Taubaté.

Foi submetido um trabalho para o 23° CBECIMAT (Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais) com base nos resultados obtidos da pesquisa.

#### Referências

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.



GARCIA; A; SPIM; J. A.; SANTOS; C. A. dos. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

GONÇALVES, V. O., **Avaliação da resistência estática e em fadiga de compósitos de fibra de carbono/epóxi e fibra de vidro/epóxi sob cisalhamento modo Iosipescu**. 2010. 161f. Tese de Mestrado na Área de Física e Química dos Materiais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

HIBBELER, R. C., **Resistência dos Materiais**. 7. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

MARINUCCI, G., **Materiais Compósitos Poliméricos: fundamentos e tecnologias**. São Paulo. Artliber. 2011.