

Vanderlei O. Gonçalves*
Instituto de Aeronáutica e Espaço
São José dos Campos - Brasil
vanderlei@iae.cta.br

Luiz Cláudio Pardini
Instituto de Aeronáutica e Espaço
São José dos Campos - Brasil
pardini@iae.cta.br

Kledermon Garcia
Instituto de Aeronáutica e Espaço
São José dos Campos - Brasil
kleder@iae.cta.br

Antonio Carlos Ancelotti Jr
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
São José dos Campos - Brasil
antonio.ancelotti@embraer.com.br

Eduardo Marcelo Bezerra
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
São José dos Campos - Brasil
edumarcelo@superig.com.br

* autor para correspondência

Resistência ao cisalhamento Iosipescu em compósitos de fibra de carbono e de vidro com resina epóxi

Resumo: O principal objetivo do presente trabalho foi a determinação do módulo de cisalhamento G_{12} e a máxima resistência ao cisalhamento ($\hat{\sigma}_{12}$) utilizando o ensaio de cisalhamento Iosipescu. Os testes foram conduzidos com dois tipos de compósitos, fibra de carbono/epóxi e fibra de vidro/epóxi utilizados na indústria aeroespacial e também uma matriz de resina moldada. Os resultados indicam a efetiva contribuição das fibras de reforço para a resistência ao cisalhamento ($\hat{\sigma}_{12}$) e para o módulo de cisalhamento (G_{12}) comparado com a matriz polimérica sem reforço.

Palavras-chave: Compósitos, Fibra de carbono, Fibra de vidro, Cisalhamento Iosipescu, Resina epóxi.

Iosipescu shear resistance in composites of carbon and glass fiber with epoxy resin

Abstract: The main aim of the present work was the determination of the shear modulus (G_{12}) and the maximum shear strength ($\hat{\sigma}_{12}$) using the Iosipescu Shear Test. Tests were carried out on two types of composites, carbon fiber/epoxy and glass fiber/epoxy, used in the aerospace industry, and also a molded epoxy resin matrix. The results indicate the effective contribution of fiber reinforcements to the shear strength ($\hat{\sigma}_{12}$) and shear modulus (G_{12}) compared to the no reinforcement polymer matrix.

Key Words: Composites, Carbon fiber, Glass fiber, Iosipescu shear, Epoxy resin.

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|--|
| cdp | Corpo de Prova |
| G | Módulo de cisalhamento |
| G_{12} | Módulo de cisalhamento no plano |
| P | Carga aplicada no dispositivo de ensaio |
| τ_{12} | Tensão de cisalhamento no plano |
| ε | Deformação específica longitudinal |
| γ | Deformação específica angular |
| Pa | Pascal = 1 Newton / m ² |
| Gpa | Giga Pascal = 1 Pa x 10 ⁹ |
| Mpa | Mega Pascal = 1 Pa x 10 ⁶ |
| $\mu\text{m/m}$ | Micro-metro por metro = 1 m x 10 ⁻⁶ |

INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos formados de fibra de carbono/epóxi e de fibra de vidro/epóxi têm estabelecido seu uso na indústria aeroespacial. Tipicamente, a manufatura desses materiais é realizada pelo empilhamento de camadas de fibras de reforço. Assim, a resistência mecânica paralela ao plano das fibras atende aplicações de uso aeroespacial que se alia ao fato do material possuir

baixa massa específica. Entretanto, o empilhamento de camadas implica na existência de uma região interlaminar ocupada essencialmente por resina que apresenta uma resistência, no caso de cisalhamento, dez vezes menor que a resistência no plano de reforço.

A medida da resistência ao cisalhamento de compósitos envolve desafios, tendo em vista o fato de que é necessário induzir um estado de tensões cisalhantes no plano. Assim, dentre as propriedades semi-estáticas, como a resistência à tração e à compressão, a resistência ao cisalhamento em compósitos estruturais é provavelmente uma das mais difíceis de serem determinadas com confiabilidade. Há vários métodos para avaliar a resistência ao cisalhamento no plano em compósitos. Exemplos de ensaios utilizados para operacionalizar essas medidas são o cisalhamento Iosipescu, tração 10° fora-de-eixo, tração [+45°/-45°]ns, cisalhamento em 2 trilhos, cisalhamento em 3 trilhos, torção em cilindros sólidos e torção em tubos de parede fina e resistência ao cisalhamento interlaminar (Pindera, 1989, Odegard, 2000, Khashaba, 2004, Hussain, 1999, Lessard, 1995, Ferry, 1999 e El-Assal, 2007). Recentemente, o teste Arcan, oriundo de ensaio de cisalhamento para madeira, também tem sido empregado para avaliação de resistência ao cisalhamento de compósitos (Hung, 1997).

Recebido: 30/04/09

Aceito: 13/05/09

Em alguns desses testes de cisalhamento os resultados apresentam inconsistências devido ao fato do estado de tensão de cisalhamento na seção dos corpos de prova não serem puros e, na maioria dos casos, também não serem uniformes. Por sua vez, o ensaio de cisalhamento Iosipescu tem sido o mais utilizado atualmente para determinar as propriedades de cisalhamento em compósitos. O ensaio de cisalhamento Iosipescu, representado na Fig. 1, foi proposto originalmente no início dos anos 60 para materiais isotrópicos, e posteriormente adaptado para uso em compósitos desde o início da década de 1970 (Walrath, 1983).

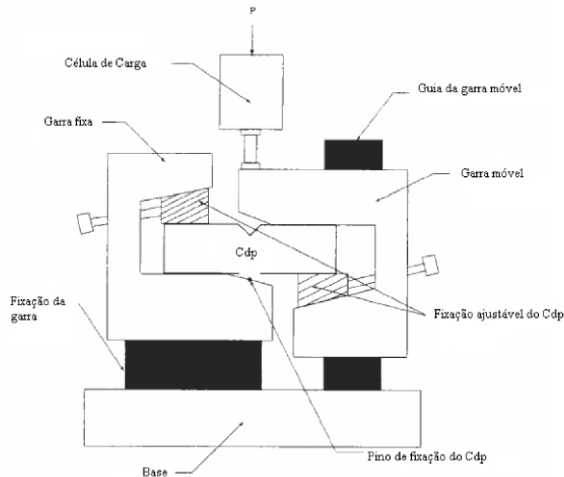


Figura 1: Esquema do dispositivo de ensaio (ASTM Designation: D 5379/D 5379M 05).

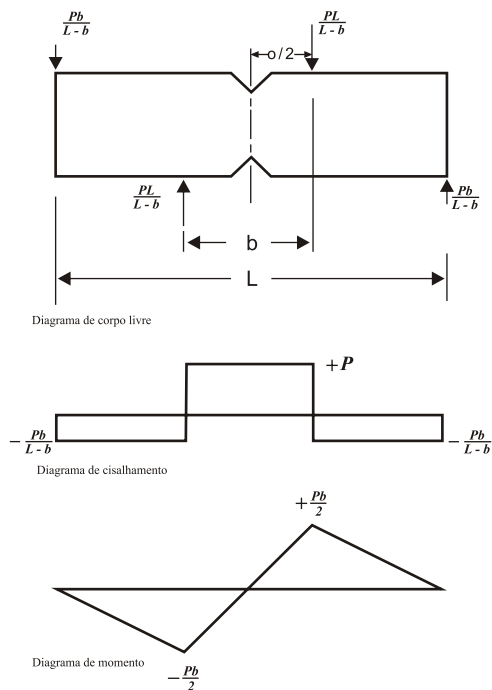


Figura 2: Diagrama de corpo livre com os diagramas de cisalhamento e de momento fletor. (ASTM D 5379M/05).

No ensaio de cisalhamento Iosipescu, a presença do entalhe em V, como mostra a Fig. 2, resulta em um estado de tensão na seção do entalhe que pode ser considerado puro mesmo que ainda não uniforme (Pindera, 1989, Tew, 2001).

Existem seis possibilidades possíveis de medidas de resistência ao cisalhamento em função da orientação das fibras no plano, conforme mostrado na Fig. 3.

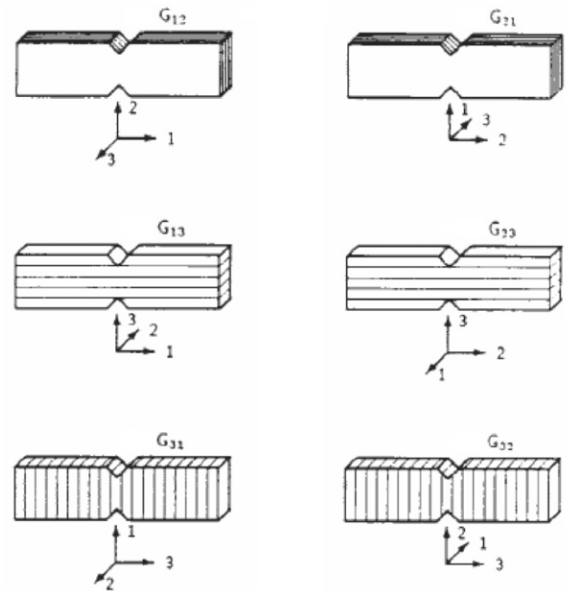


Figura 3: Seis orientações possíveis para as tensões e módulo. ASTM D 5379M/05).

Os módulos de cisalhamento G e as tensões de cisalhamento τ obtidos neste trabalho são relativos à direção no plano, ou seja, G_{12} e τ_{12} .

O módulo de cisalhamento no plano G_{12} é obtido através do gráfico τ versus γ , tensão de cisalhamento pela deformação angular e o coeficiente angular da reta na zona elástica deste gráfico será o G_{12} , conforme mostrado na Fig. 4.

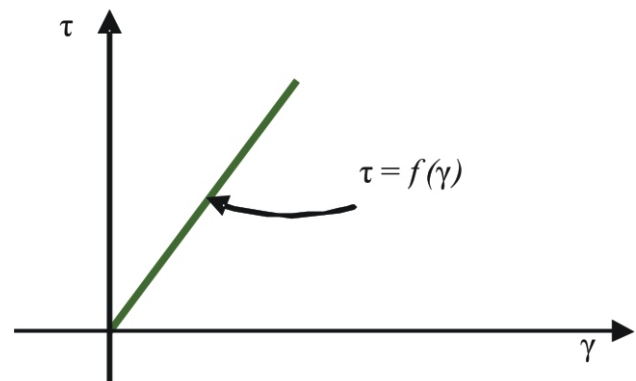


Figura 4: Esquema do gráfico τ x γ para obtenção do módulo G_{12} .

Para a região linear mostrada na Fig. 4 é válida a lei de Hooke obtendo-se assim o módulo G_{12} conforme Eq. (1).

$$\tau = G\gamma \quad (1)$$

A Figura 5 mostra que quando a carga P_1 é aplicada existe a tendência de ocorrer uma rotação em uma região parcial da amostra, mas devido à configuração do dispositivo ocorre uma reação P_2 evitando a rotação da mesma. Portanto, neste ensaio, dois pares de força são aplicados através da seção entre as raízes dos entalhes em V gerando dois momentos contrários produzindo um estado puro e uniforme de tensão de cisalhamento na seção A-B, (Dias, 2004).

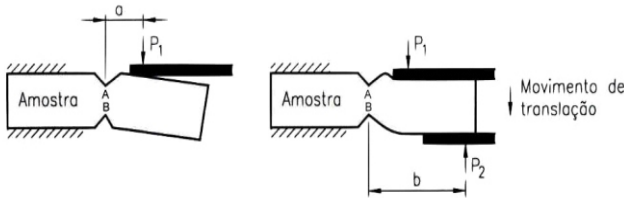


Figura 5: Esquema de aplicação de carga do ensaio Iosipescu.

EXPERIMENTAL

O cisalhamento na seção entre os entalhes é igual à carga P aplicada no dispositivo de ensaio e não existe flexão nesta região entre os entalhes. Por definição a média da tensão de cisalhamento na seção dos entalhes é demonstrada na Eq.(2).

$$\tau = P/(t.w) \quad (2)$$

Onde P é a força aplicada em Newton, t é a espessura do corpo de prova e w é a distância entre a origem dos entalhes. A deformação angular ou de cisalhamento é calculada através de dois extensômetros elétricos colados a $\pm 45^\circ$ próximos a origem dos entalhes conforme mostra a Fig. 6.

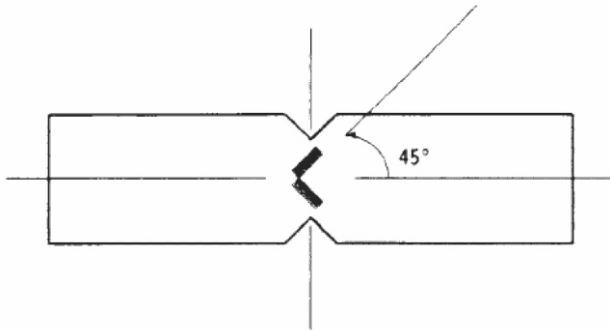


Figura 6: Esquema de colagem dos extensômetros elétricos a $\pm 45^\circ$. (ASTMD 5379M/05).

Os extensômetros elétricos medem as deformações longitudinais a $\pm 45^\circ$ com relação ao eixo horizontal do

corpo de prova, ε_1 e ε_2 e por meio da Eq. (3) é calculada a deformação angular ou de cisalhamento γ .

$$\gamma = |\varepsilon_1| + |\varepsilon_2| \quad (3)$$

Os materiais utilizados neste trabalho foram:

Material #1: Resina epóxi Epon 826 com endurecedor Epicure 527 (26% em massa sobre a resina) e acelerador Epicure W (1% em massa sobre a resina). O ciclo de cura utilizado foi de 1 hora a 80°C , 2 horas a 120°C e 2 horas a 180°C .

Material #2: Compósito de fibra de vidro/resina epóxi, com orientação das fibras de vidro de $0/90^\circ$ com relação ao eixo horizontal, obtido com 8 camadas e com teor de fibra de vidro de $64\pm 1\%$ massa. Foram manufacturados em autoclave, utilizando pré-impregnados de tecido 5HS 7781, da Hexcel Co. Estes compósitos apresentam 55% em volume de fibras.

Material #3: Compósito de fibra de carbono/resina epóxi com orientação das fibras de carbono de $\pm 45^\circ$ com relação ao eixo horizontal, obtido com 8 camadas e com nível de porosidade menor que 1,5 %. Foram manufacturados em autoclave utilizando pré-impregnados de tecido plano F155, da Hexcel Co. Estes compósitos apresentam 58% em volume de fibras.

As resinas utilizadas nos pré-impregnados, material #2 e #3, são de formulação proprietária. Embora a formulação da resina utilizada no material #1 não seja a mesma do sistema de resina utilizado nos pré-impregnados, os ensaios foram realizados de forma comparativa para demonstrar tendências no comportamento em fadiga para os diversos materiais testados. Além disso, as resinas epóxi utilizadas em compósitos estruturais, de forma geral, apresentam modo de fratura frágil na ruptura quando submetidas a quaisquer tipos de carregamentos mecânicos (Kinloch, 1995). Foi ensaiado um total de dezesseis corpos de prova, sendo seis de compósito com fibra de carbono, cinco de compósito com fibra de vidro e cinco de resina epóxi.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Estruturais - ASA-E/IAE. Foi utilizado um equipamento de ensaios marca MTS modelo 810.25 com célula de carga de 25 kN. A aquisição de dados foi realizada em equipamento marca "National Instruments" modelo SCXI e aplicativo computacional "Labview", para a coleta dos dados de deformação dos extensômetros e da carga aplicada.

Os ensaios foram executados de acordo com a norma ASTM 5379M/05 e utilizado um dispositivo padrão conforme mostrado nas Fig. 1 e 7.

Cada corpo de prova foi montado no dispositivo de ensaio e cada ensaio foi executado aplicando-se a carga P em um carregamento monotônico com uma taxa constante de 0,5 mm/min. até que o corpo de prova se rompesse. Para cada ensaio, foram coletados os dados de dois canais de extensômetros, ε_1 e ε_2 e um canal da carga aplicada, P .

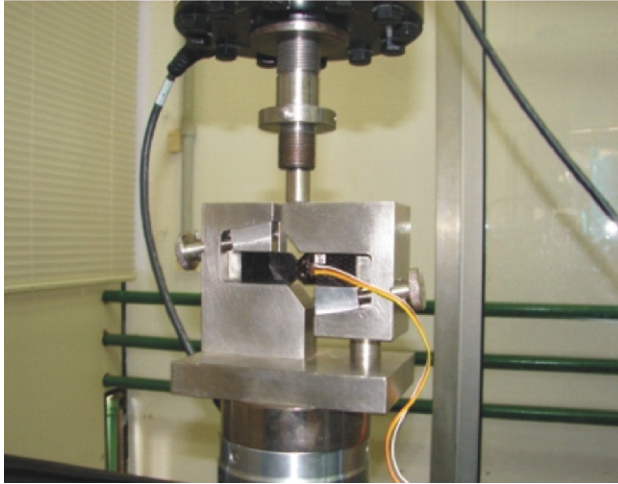


Figura 7: Corpo de prova de fibra de carbono montado no dispositivo de ensaio.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para tensão de cisalhamento no plano máxima τ_{12} máx. e módulo de cisalhamento no plano G_{12} , obtidos para cada tipo de material estudado neste trabalho.

As Fig. 8, 9 e 10 mostram os valores de tensão máxima de cisalhamento obtidos para cada tipo de material.

Para efeito de comparação, a resistência ao cisalhamento de compósitos de fibra de carbono/epóxi com orientação $0/90^\circ$ mostra valores de 69 MPa e módulo de 4,2 GPa (Bezerra, 2007). Para compósitos de fibra de vidro/epóxi obtidos com orientação $\pm 45^\circ$ a resistência ao cisalhamento reportada em literatura é de 85 MPa, e módulo em cisalhamento de 19,7 GPa (Souza, 2006).

Tabela 1: Média das tensões de cisalhamento máximas e dos módulos de cisalhamento.

| | τ_{12} (MPa) | G_{12} (GPa) |
|---|-------------------|----------------|
| Resina Epóxi | $41,6 \pm 6$ | $1,4 \pm 0,3$ |
| Fibra de vidro $0/90^\circ$ | $96,3 \pm 26$ | $7,7 \pm 2,8$ |
| Fibra de carbono $\pm 45^\circ$ | $136,7 \pm 19$ | $35,7 \pm 8$ |

Os resultados mostram que os reforços com fibras de carbono ou fibras de vidro aumentam tanto a resistência como o módulo em cisalhamento de compósitos, em qualquer das configurações de reforço de $0/90^\circ$ e $\pm 45^\circ$. O módulo em cisalhamento de compósitos é no mínimo cinco vezes maior que o módulo em cisalhamento de uma resina

epóxi. O módulo em cisalhamento de compósitos com orientação $\pm 45^\circ$ é maior que os compósitos com orientação $0/90^\circ$, independentemente do tipo de reforço.

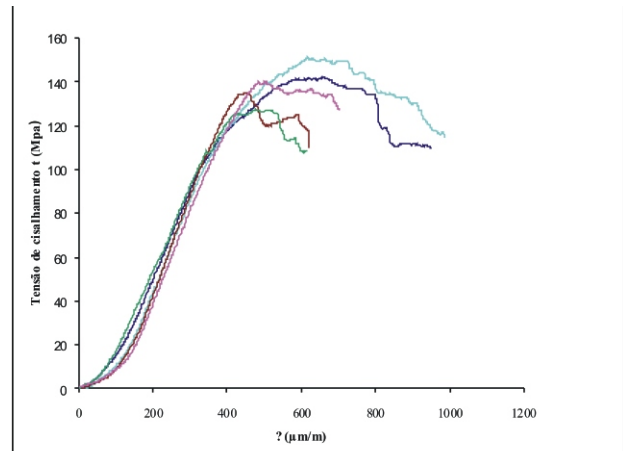


Figura 8: Tensão de cisalhamento em função da deformação para compósitos de fibra de carbono/resina epóxi $\pm 45^\circ$.

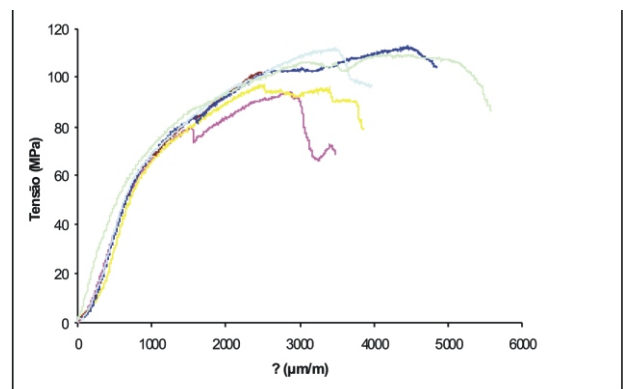


Figura 9: Gráfico tensão em função da deformação para os cinco cdps de compósito de fibra de vidro/resina epóxi $0/90^\circ$.

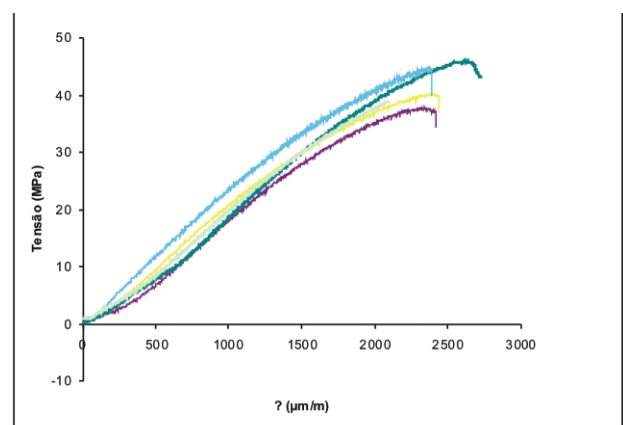


Figura 10: Tensão de cisalhamento em função da de formação para resina epóxi.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, G_{12} e τ_{12} , para os dois compósitos estudados e para a resina epóxi sem reforço, mostram a influência dos reforços de fibra de carbono e de vidro no aumento da resistência ao cisalhamento e do módulo de cisalhamento. A resistência ao cisalhamento dos compósitos reforçados com fibras de carbono é da mesma grandeza da resistência ao cisalhamento da resina epóxi. Isso denota que a resistência ao cisalhamento de compósitos é dominada pelas propriedades da matriz.

Comparando com a resina epóxi sem reforço, os compósitos com fibra de carbono $\pm 45^\circ$ e $0/90^\circ$ apresentaram um aumento na resistência ao cisalhamento de aproximadamente 330% e 170% e no módulo de cisalhamento de 2550% e de 300%, respectivamente.

Ainda, comparando com a resina epóxi sem reforço, os compósitos com fibra de vidro $\pm 45^\circ$ e $0/90^\circ$ apresentaram um aumento na resistência ao cisalhamento de aproximadamente 200 e 230% e no módulo de cisalhamento de 1400 e de 550% respectivamente.

REFERÊNCIAS

ASTM D 5379M/05. "Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method".

Bezerra, E. M., Ancellotti, A. C., Pardini, L. C., Rocco, J. A. F. F., Ilha, K., Ribeiro, C. H. C., 2007, "Artificial Neural Networks Applied to Epoxy Composites Reinforced with Carbon and E-Glass Fibers: Analysis of the Shear Mechanical Properties", *Material Science and Engineering A* 464, pp. 177-185.

Dias, J. C., 2004, "Resistência ao Cisalhamento de Compósito Carbono Reforçado com Fibras de Carbono/Tecido tipo Twill", *Revista Matéria*, Vol. 9, No. 4, pp. 263-270.

El-Assal, A.M., Khashaba, U.A., 2007, "Fatigue Analysis of Unidirectional GFRP Composites Under Combined Bending and Torsional Loads", *Compos. Struct.*, Vol. 79, No. 4, pp 599-605.

Ferry, L., Perreux, D., Varchon, D., Sicot, N., 1999, "Fatigue Behavior of Composite Bars Subjected to Bending and Torsion", *Compos. Sci. Technol.* Vol.59, No.4, pp. 575-582.

Hung, S. C., Liechti, K. M., 1997, "An Evaluation of the Arcan Specimen for Determining the Shear Moduli of Fiber-reinforced Composites", *Experimental Mechanics*, Vol. 37, No. 4, pp. 460-468.

Hussain, A.K., Adams, D.F., 1999, "The Wyoming-Modified Tworail Shear Test Fixture for Composite

Materials", *J. Compos. Technol. Res.*, Vol. 21, No. 4, pp. 215-223.

Khashaba, U.A., 2004, "In-Plane Shear Properties of Cross-Ply Composite Laminates With Different off-Axis Angles", *Compos. Struct.*, Vol. 65, No. 2, pp.167-177.

Kinloch, A.J.; Young, R.J. 1995, "Fracture Behavior of Polymers", Chapman & Hall, UK, pp. 315-317.

Lessard, L.B., Eilers, O.P., Shokrieh, M.M., 1995, "Testing of in Plane Shear Properties Under Fatigue Loading", *J. Reinf. Plast. Compos.* Vol. 14, No. 9, pp. 965-987.

Odegard, G., Kumosa, M., 2000, "Determination of Shear Strength of Unidirectional Composite Materials with the Iosipescu and 101 Off-Axis Shear Tests", *Compos. Sci. Technol.* Vol. 60, pp. 2917-2943.

Pindera, M. J., Ifju, P., Post, D., 1989, "Iosipescu Shear Characterization of Polymeric and Metal Matrix Composites", *Experimental Mechanics*, vol. 30, No. 1, pp. 101-108.

Souza, E. B., 2006, "Resistência ao cisalhamento Iosipescu do compósito laminado reforçado com tecido de fibras de vidro/epóxi", Tese de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, pp. 13-33.

Tew, B.W., Odom, E. M., Teel J. D., 2001, "Composite Specimen Bearing Failure Reduction in Iosipescu Shear Tests", *Experimental Mechanics*, Vol. 41, No. 3, pp. 218-224.

Walrath, D.E., Adans, D.F., 1983, "The Iosipescu Shear Test as Applied to Composite Materials", *Experimental Mechanics*, pp. 105-110.