

AVALIAÇÃO DE LAMINADOS VIDRO/EPÓXI UTILIZANDO O MÉTODO DE CISALHAMENTO NO PLANO *V-NOTCHED RAIL*

José Humberto S. Almeida Júnior¹, Clarissa C. Angrizani¹, Edson C. Botelho², Sandro C. Amico¹

¹LaPol/PPGE3M - UFRGS – RS (jhsajunior@globomail.com)

²Departamento de Materiais e Tecnologia – UNESP - SP

Resumo – Alguns ensaios para estudo das propriedades de cisalhamento no-plano de materiais compósitos são conhecidos e consolidados há mais de 40 anos, como o teste de cisalhamento Iosipescu. Visando aperfeiçoar este ensaio, foi desenvolvido recentemente um novo teste, denominado *V-notched rail shear*, que tem como principal característica aumentar a área de aplicação de tensão de cisalhamento puro no material. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes configurações de laminados vidro/epóxi (de mesmo teor de fibra) na resistência ao cisalhamento no plano obtido por este método. Os resultados mostraram que os compósitos com o reforço em forma de manta apresentaram resistência ao cisalhamento cerca de 100% superior a de compósitos com fibras em direções preferenciais de 0° e 90° apenas, e para o laminado balanceado e simétrico (0/90/0/90/0). Os modos de falha observados foram compatíveis com o esperado para este ensaio, validando o uso dessa norma para as amostras ensaiadas.

Palavras-chave: *Compósitos estruturais, Resistência ao cisalhamento, V-notched rail.*

Introdução

Frente à grande diversidade e crescimento de aplicações de materiais compósitos poliméricos, a necessidade de novos ensaios, mais precisos ou práticos, para determinação de suas propriedades de engenharia vem sendo alvo de estudo contínuo. Existem muitos métodos de ensaio para obtenção das propriedades em cisalhamento no-plano, porém os mais difundidos e consolidados incluem: o teste de tração com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$ (ASTM D3518-07) - (Fig. 1(a)), o Iosipescu (ASTM D5379-05) - (Fig. 1(b)) e o *Two-rail shear test* (ASTM D4255-07) - (Fig. 1(c)).

O cisalhamento Iosipescu, foi desenvolvido no início dos anos 60 por Nicolai Iosipescu [1] para materiais isotrópicos, sendo adaptado para materiais compósitos por Adams e Lewis [2] e outros colaboradores [3] nos anos 70, da University of Wyoming, e normatizado pela ASTM em 1993. Após normatização, este se tornou o método de ensaio de cisalhamento no plano mais utilizado devido a sua versatilidade e precisão na obtenção das propriedades. Algumas dificuldades do ensaio Iosipescu incluem: (a) A pequena área de cisalhamento puro (*gage section*) na região central entre os entalhes não é ideal para compósitos com feixes de fibras muito largos, com células unitárias grandes ou com pequena espessura, que necessitam de uma *gage section* maior para gerar resultados confiáveis; (b) A magnitude da carga que pode ser aplicada através das bordas (superior e inferior) da amostra possibilita a geração de falhas localizadas nos pontos de carregamento (Adams et al. [3]).

Apesar do ensaio de cisalhamento Iosipescu ser largamente utilizado, não havia sido inicialmente desenvolvido para materiais ortotrópicos e/ou anisotrópicos, e, portanto não estava totalmente adaptado às características dos materiais compósitos. Assim, o mesmo grupo da University of Wyoming projetou em 1983 um teste alternativo ao Iosipescu, denominado *Two-rail shear test*. Porém, este ensaio gerou outras críticas da comunidade científica, tais como: (a) Dificuldade de fabricação das amostras, que continham seis furos (Fig. 1(c)); (b) Elevado custo e tempo necessário para a fabricação das amostras (de grandes dimensões); (c) A determinação questionável da resistência ao cisalhamento devido a concentrações de tensão no espécime, quando fixado nos *rails* e a não obtenção de tensão de cisalhamento uniforme ao longo do espécime [4].

Bem mais recentemente, em 2005, um último ensaio desenvolvido por Adams et al. [5] foi padronizado pela ASTM, o *V-notched rail shear* (ASTM D7078-12) (Fig. 1(d-e)), incorporando as características mais determinantes do Iosipescu e do *Two-rail shear*. Este teste é esperado gerar resultados confiáveis para compósitos multidirecionais, unidirecionais e para lâminas simples, ou seja, compósitos pouco espessos. O suporte foi projetado visando a produção de um estado de tensão de cisalhamento uniforme ao longo da *gage section* do espécime, permitindo precisão na determinação das propriedades de cisalhamento e produzindo falhas aceitáveis na *gage section*, distante da área de fixação dos *rails*. Entretanto, como este ensaio é bastante recente, seu uso ainda não está disseminado.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é estudar a resistência ao cisalhamento no plano de laminados vidro/epóxi com diferentes configurações, direcionais ou aleatória, através deste novo e ainda pouco utilizado método de ensaio, o *V-notched rail shear*.

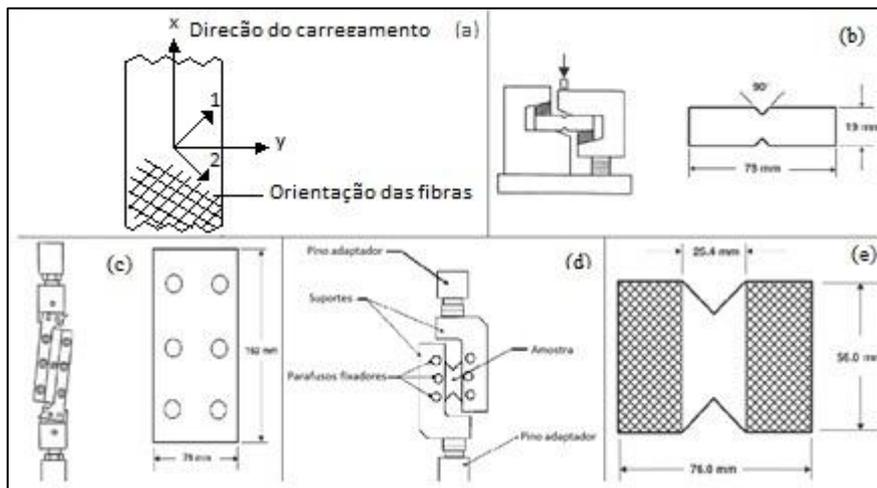


Figura 1 - Amostra de ensaio $\pm 45^\circ$ (a); aparatos e amostras de Iosipescu (b) e *two-rail shear* (c); aparato (d) e amostra do ensaio *V-notched rail shear* (e) [2,5].

Parte Experimental

Foram utilizados neste trabalho resina epóxi Araldite LY 1316 e endurecedor Aradur 2969, da Aralsul, além de reforços de fibra de vidro-E, unidirecional (gramatura de 300 g/m^2) e manta (gramatura de 350 g/m^2).

Os reforços foram cortados nas dimensões de $300 \times 300 \text{ mm}$ (iguais às da cavidade do molde), e colocados no molde para processamento por VARTM (moldagem por transferência de resina). O VARTM (moldagem por transferência de resina assistido a vácuo) difere do RTM pelo uso de vácuo. Neste caso, a resina foi injetada em um ponto central e o vácuo foi aplicado nas extremidades do molde para facilitar o preenchimento.

Em paralelo, o conjunto da resina (resina: endurecedor na proporção de 1:0,57) foi preparado utilizando um agitador mecânico com hélice tipo âncora por 3 min a 80 rpm, seguido de 5 min em estufa à vácuo, à temperatura ambiente, para degasagem. Em seguida, a resina foi depois injetada no molde à temperatura ambiente, a uma pressão positiva entre 1-2 bar e com pressão negativa entre 0,1–0,6 bar. Após a injeção, o material foi curado à temperatura ambiente por 24 h, seguido de pós-cura por 10 h a 80°C em estufa com circulação de ar.

Quatro tipos de compósitos foram fabricados: Unidirecional orientado a 0° (5 camadas), unidirecional a 90° (5 camadas), laminado balanceado e simétrico [0/90/0/90/0] e aleatório (5 camadas de manta), nomeados neste trabalho por [0]₅, [90]₅, [0/90/0/90/0] e manta, respectivamente. Em todas as placas, o teor volumétrico de fibra foi mantido constante, entre 34-38%.

As amostras foram desenhadas no software SolidWorks 2012 e exportadas para o software EdgeCam 2010, para geração da estratégia de corte das amostras, realizada em uma máquina CNC (controle numérico computacional). Após o corte, as amostras (5 para cada família) foram submetidas ao ensaio de cisalhamento no plano *V-notched rail*, com uma velocidade de 2 mm/min, de acordo com a norma ASTM D7078, em uma máquina Universal INSTRON 3382, com célula de carga de 100 kN. A Fig. 2 mostra a geometria detalhada da amostra e a montagem do ensaio.

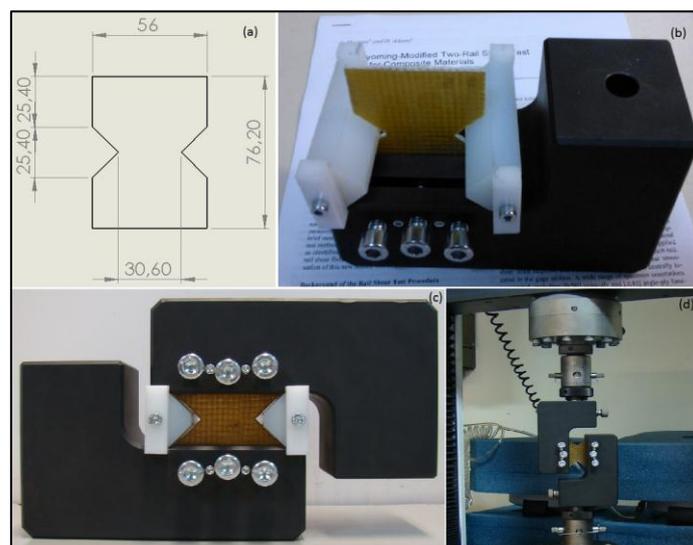


Figura 2 – Geometria da amostra (a), montagem do aparato (b-c) e aparato montado para o ensaio (d).

A tensão de cisalhamento no plano (τ) foi calculada pela razão entre a carga aplicada (P) e a área (A) da seção transversal da amostra entre as extremidades dos entalhes do espécime. Para determinação da resistência ao cisalhamento foi utilizada uma metodologia adaptada desta norma, baseada na utilização de uma *offset* de deslocamento, neste caso, foi adotado 0,4 mm. Não foi possível obter o módulo por não se dispor de *strain gauges* para a medida acurada de deformação cisalhante.

Resultados e Discussão

A Fig. 3 apresenta curvas carga \times deslocamento típicas (medianas) de cada família de amostra. Os compósitos com manta foram os únicos a mostrar um pico claro no gráfico carga \times deslocamento, e nas outras 3 famílias a tensão aumentou continuamente, sem um ponto de máximo facilmente distinguível, justificando o uso de um *offset* de deformação para possibilitar a comparação entre as diferentes famílias. Menção deve ser dada à curva do laminado [0/90/0/90/0], que mostrou um ombro próximo a 1250 N, que pode estar associado à delaminação deste laminado em particular.

Observa-se claramente que a amostra manta, considerada isotrópica no plano, suportou uma carga cerca de duas vezes a das outras amostras, que praticamente empataram entre si. Este comportamento pode ser atribuído a feixes de fibras orientadas em ângulos intermediários (entre 0° e 90°), inclusive com algumas fibras em $+45^\circ$ e -45° , ângulo de orientação considerado ótimo em relação à performance em cisalhamento. De fato, este comportamento seria diferente do obtido em ensaios mecânicos como tração ou compressão, nos quais a resistência seria muito maior para a amostra [0]₅, pois a resistência é muito alta quando as fibras são orientadas na direção do carregamento, e pelo mesmo motivo a amostra [90]₅, com fibras orientadas transversalmente ao carregamento, a resistência seria muito baixa.

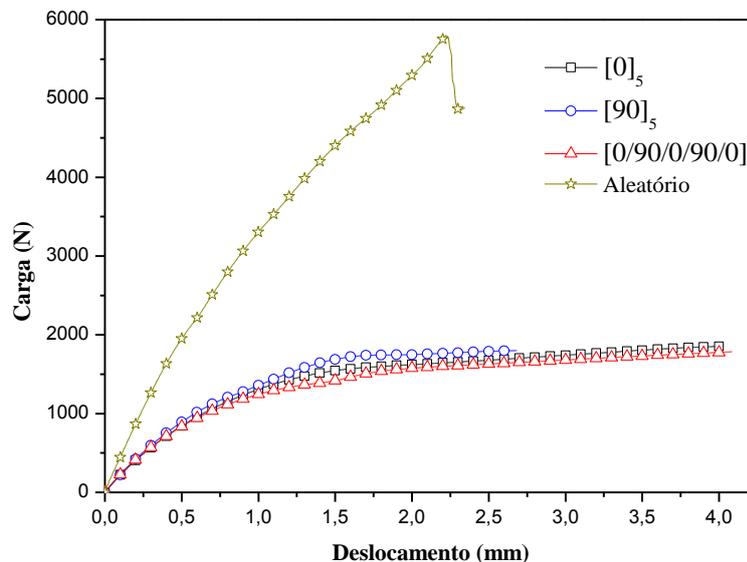


Figura 3 – Curvas típicas carga \times deslocamento de cada família de compósito.

A Fig. 4 apresenta uma média da resistência ao cisalhamento no plano de cinco amostras testadas para cada família de compósitos estudada. A amostra manta apresentou uma resistência ao cisalhamento de 41,6 MPa, cerca de 100% maior que os compósitos [0]₅ e [90]₅, que foram um pouco superiores ao laminado balanceado e simétrico [0/90/0/90/0]. Os valores de resistência apresentados são essencialmente influenciados pela carga suportada pelos compósitos, e não pela área de cada amostra, que foi praticamente a mesma devido à alta precisão do corte dos compósitos na máquina CNC.

De acordo com a Teoria dos Laminados, as amostras [0/90/0/90/0], [0]₅ e [90]₅ deveriam apresentar resistência ao cisalhamento similares, quando submetidos a um estado de tensão de cisalhamento puro. Os resultados experimentais obtidos neste trabalho corroboraram parcialmente esta teoria, pois os laminados [0]₅ e [90]₅ obtiveram a mesma resistência, porém o laminado [0/90/0/90/0] foi inferior. Embora esta construção ainda seja balanceada e simétrica, apresenta um número não coincidente de camadas 0° e 90° , que pode levar a alguma falha interlaminar prematura, como mostra o ombro da Fig. 3 para esta família, inclusive podendo indicar alguma rotação de fibras durante o ensaio.

A Fig. 5 apresenta imagens de uma amostra de cada família estudada após o ensaio. Vê-se que todos os modos de falha, embora diferentes, apresentam características aceitáveis para este ensaio. A amostra de manta apresenta modo de falha distinto, com duas grandes trincas, a $+45^\circ$ e -45° , próximas aos entalhes que surgiram próximo do ponto de carga máxima suportada pelos compósitos, enquanto as outras apresentam um maior número de trincas de dimensões menores e alinhadas preferencialmente na direção 0° e 90° .

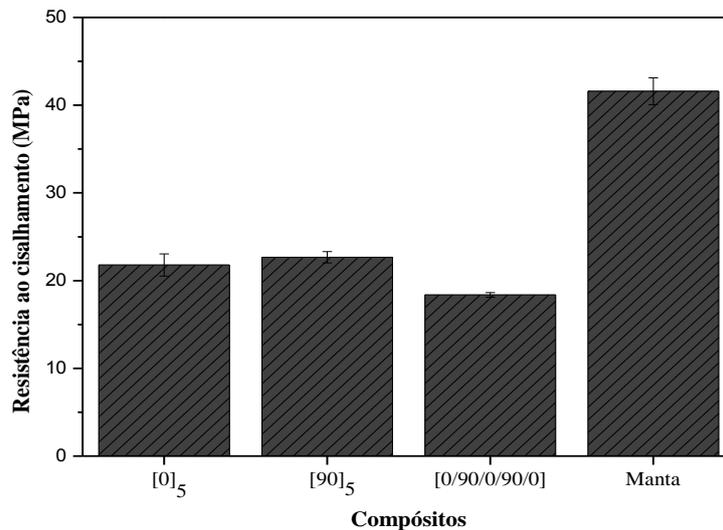


Figura 4 - Resistência ao cisalhamento média dos diferentes compósitos estudados.

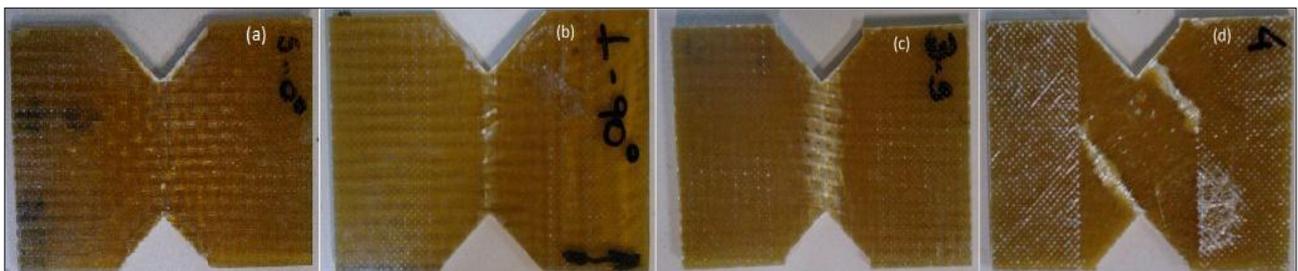


Figura 5 – Fotografias das amostras [0]₅ (a), [90]₅ (b), [0/90/0/90/0] (c) e manta (d) após o ensaio.

Conclusão

No presente trabalho, estudou-se a influência de diferentes configurações de laminados de vidro/epóxi na determinação das propriedades de cisalhamento no plano utilizando um novo teste, denominado *V-notched rail shear*. Este ensaio mostrou-se adequado para compósitos isotrópicos (aleatórios), unidirecionais (0° ou 90°) e laminados bidirecionais (0/90). Este ensaio foi desenvolvido visando aperfeiçoar o de cisalhamento Iosipescu, com o aumento da área de atuação de cisalhamento puro, criando tensões uniformes em toda *gage section* em compósitos multidirecionais. Estas razões foram suportadas, principalmente, pelas curvas carga \times deslocamento e pelas fotografias das amostras fraturadas, que corroboraram sua aplicação através do modo de falha, peculiar para cada configuração de laminado mas todas sugerindo cargas de cisalhamento predominantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq e FAPERGS pelo suporte financeiro.

Referências

1. N. Iosipescu *J. Mater.* 1967, 2(3), 537-566.
2. D.F. Adams; E.Q. Lewis *SAMPE Journal*. 1994, 31(6), 32-41.
3. D.O. Adams; M.G. Adam; J.M. Moriarty; D.F. Adams em Anais do SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Los Angeles, 2002, vol. 6, 1-4.
4. A. Hussain; D. Adams *J. Compos. Technol. Res.* 1999, 21(4), 215-223.
5. D.O. Adams; J.M. Moriarty; A.M. Gallegos; D.F. Adams *J. Compos. Mater.* 2007, 41(3), 281-297.