

## DEPENDÊNCIA DA TENACIDADE À FRATURA COM A ACUIDADE DO CONCENTRADOR DE TENSÕES EM COMPÓSITOS DE FIBRA DE VIDRO PULTRUDADOS.

**Márcio L. Tinoco Marques**

**Enrique M. Castrodeza**

**Fernando L. Bastian**

PEMM - COPPE - UFRJ, Laboratório de Materiais Compósitos  
Centro de Tecnologia, CP 68505, 21945-970, Rio de Janeiro, RJ.

***Resumo.** É amplamente conhecido que, nos materiais metálicos tradicionais, a tenacidade diminui com o aumento da acuidade do concentrador de tensões. Conhecer esta dependência é muito útil do ponto de vista prático, já que permite avaliar corretamente a resistência residual de um componente que contém um defeito em forma furo, entalhe ou trinca. Os materiais compósitos são materiais que apresentam uma microestrutura mais complexa que a dos metais. Muitas vezes a determinação de suas propriedades mecânicas é complexa, assim como a utilização de ferramentas de análises de integridade estrutural, em geral bem estabelecidas para metais. O comportamento em fratura de compósitos de fibras de vidro em matriz polimérica obtidos pelo processo de pultrusão, na presença de defeitos de diferentes acuidades, não está suficientemente difundido na literatura. Este fato foi o motivo desta pesquisa. Neste trabalho é avaliada a tenacidade em função da acuidade do concentrador de tensões, utilizando as ferramentas da mecânica da fratura linear-elástica, de um compósito de fibras de vidro pultrudado de fabricação nacional. Os resultados mostram que o comportamento do material é diferente daquele apresentado pelos materiais metálicos comumente empregados na engenharia.*

***Palavras-chave:** Compósitos pultrudados, Tenacidade à fratura, Acuidade do entalhe.*

### 1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras de vidro obtidos por processos de pultrusão são produzidos para competir com os materiais metálicos tradicionais para aplicações estruturais. As principais vantagens da sua utilização em estruturas são a sua elevada resistência específica e boa resistência à corrosão. São materiais não condutores, por este motivo cresce sua utilização no sistema de geração e distribuição de energia elétrica. Na indústria química e em atividades *off-shore* eles estão substituindo estruturas metálicas que sofrem grande ataque por corrosão (Smith, 1990).

Devido à sua crescente aplicação em estruturas, há necessidade de se conhecer com maior profundidade o comportamento em fratura dos materiais pultrudados em presença de defeitos

de diferentes acuidades, como furos, trincas ou entalhes. Este trabalho tem como objetivo determinar o comportamento em fratura, em função da variação da acuidade do entalhe, de um material compósito pultrudado de resina poliéster ortoftálica, reforçado por fibras de vidro do tipo E.

A pultrusão é um processo contínuo de produção de plástico reforçado a partir dos seus elementos constituintes (fibras e resina). É semelhante à extrusão, muito usada em alumínio e termoplásticos. A fibra a ser usada como reforço é impregnada com uma resina termofixa e puxada através de um molde aquecido. A temperatura do molde promove a cura da resina de forma contínua e o produto final apresenta comprimento teoricamente infinito. O tamanho das peças finais depende apenas dos requisitos de utilização e transporte do material (Chawla, 1987). A pultrusão provavelmente foi o primeiro processo automatizado de fabricação de compósitos (Callister, 1994), e também é considerado hoje um dos processos de maior crescimento, devido às inúmeras possibilidades de fabricação de produtos acabados feitos por esta tecnologia.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

O material utilizado nos ensaios foi fornecido pela Cogumelo, empresa situada em Campo Grande, Rio de Janeiro, fabricado no empilhamento 4/3. A denominação 4/3 significa que o material é constituído de 4 camadas de mantas e 3 camadas de fibras unidirecionais, como mostrado na Figura 1. O reforço em forma de manta tem o intuito de diminuir o grau de anisotropia e propiciar ao produto um melhor acabamento superficial.

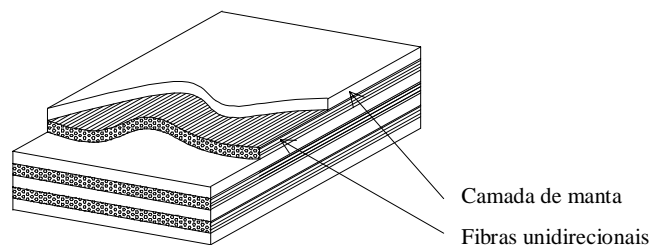


Figura 1 – Desenho esquemático do material pultrudado.

As aplicações para este tipo de material são inúmeras, dentre elas espaçadores e núcleos de transformadores, chaves a óleo, escadas isoladas eletricamente, eletrocalhas e leitos para cabos elétricos, varas isoladoras para operar linhas energizadas, grades para pisos, parafusos e porcas resistentes à corrosão, suportes de tanques e tubulações, painéis e cantoneiras para caminhões refrigerados, componentes estruturais para caminhões, estruturas para barcos e navios, longarinas, talas para velas de veleiros, etc.

A composição relativa em peso do material testado é 54% de fibras de vidro tipo E atuando como reforço, 40% de resina poliéster ortoftálica auto-extinguível como matriz e 6% de hidróxido de alumínio tri-hidratado como carga mineral.

### 2.2 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados no experimento foram do tipo compacto de tração (CT) com relações entre as dimensões principais (relação entre a altura, comprimento e

profundidade do entalhe) segundo o sugerido pela norma ASTM E399-90 (ASTM, 1998), que regulamenta o método de ensaio para medir tenacidade à fratura em materiais metálicos. A espessura ( $B$ ) dos corpos de prova foi 6,1 mm, enquanto que a altura ( $W$ ) foi de 80,0 mm.

### 2.3 Concentradores de tensão

Para avaliar a variação da tenacidade à fratura com o raio de curvatura (ou diâmetro) do extremo do concentrador de tensões, foram feitos entalhes de diferentes geometrias. Os diâmetros da ponta do entalhe avaliados estiveram na faixa de 0,10 mm até 1,00 mm. Na Tabela 1 são apresentadas as diferentes geometrias ensaiadas. Em todos os corpos de prova foi efetuado inicialmente um entalhe empregando serra de fita e depois foi realizado o acabamento mediante um dos métodos apontados na Tabela 1. Na Fig. 2 pode-se visualizar o entalhe acabado em furo de broca de 1,00 mm.

Tabela 1. Geometria e método de obtenção dos entalhes utilizados.

Diâmetro da ponta [mm]	Método de obtenção
0,10	Corte com estilete
0,30	Corte com serra de joalheiro
0,60	Furo com broca
1,00	Furo com broca

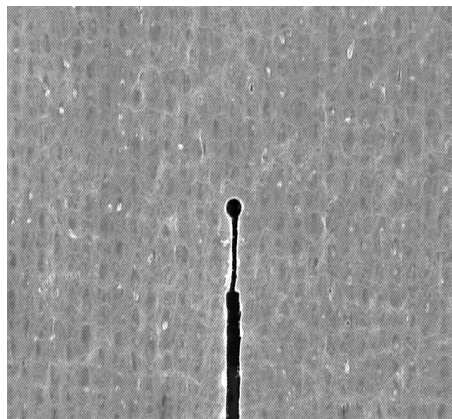


Figura 2 - Detalhe da ponta do entalhe acabado em furo de broca de 1,00 mm de diâmetro.

O pré-trincamento por fadiga foi desconsiderado, já que é conhecido (Castrodeza, 1998; Ritchie *et al*, 1989) que existe um aumento da tenacidade de corpos de prova pré-trincados, devido à restrição da abertura das faces da trinca causada pelas fibras que ficam intactas (Hine *et al*, 1993; Marissen, 1984). Assim sendo, espera-se que estes materiais apresentem uma menor tenacidade em presença de entalhes agudos, que cortem as fibras até a extremidade do concentrador de tensões.

### 2.4 Experimento

Os ensaios foram realizados em ordem aleatória em uma máquina de parafuso Instron modelo TL 1125, sob condição de controle de deslocamento. A velocidade do travessão foi de 1,00 mm/min. Obteve-se em todos os casos registros da carga versus abertura da “boca” do entalhe. Todo o trabalho experimental, efetuado à temperatura ambiente, foi realizado em

duas direções do material, com as fibras orientadas no sentido longitudinal (L) e transversal (T) com respeito ao entalhe. Com o intuito de avaliar a dispersão dos resultados todo o experimento foi duplicado.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 3 pode-se observar uma curva típica obtida durante um ensaio, neste caso corresponde a um corpo de prova com diâmetro da ponta do entalhe de 0,60 mm. Na figura se indica o ponto de obtenção da carga crítica, coincidente em todos os casos com a primeira queda significativa no carregamento do corpo de prova.

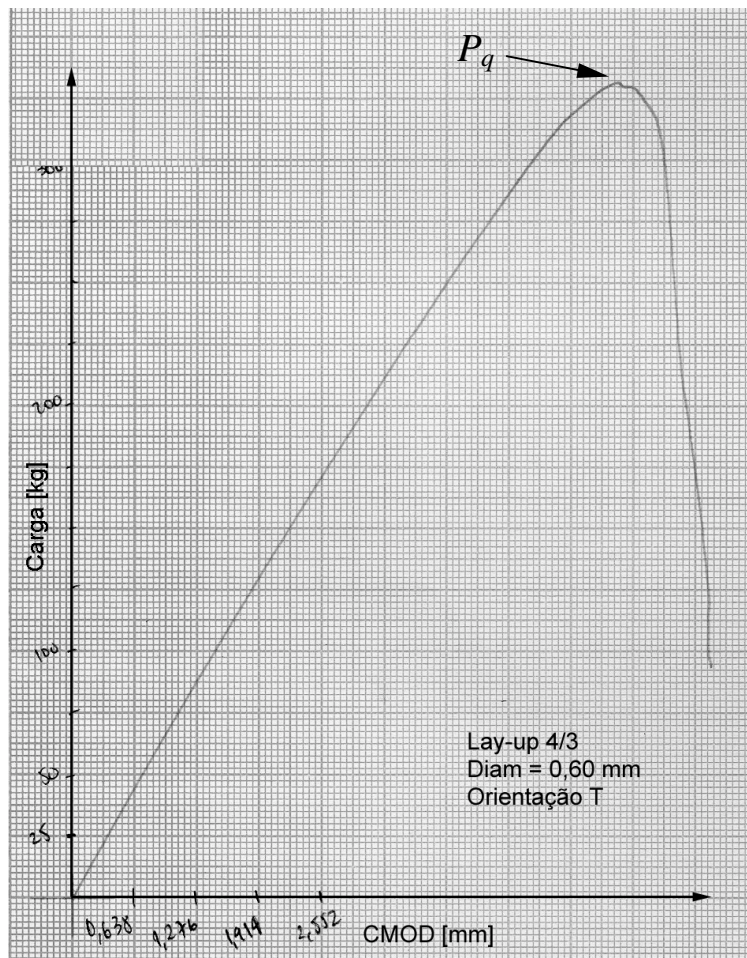


Figura 3 – Curva carregamento vs. abertura da “boca” do entalhe (CMOD). Orientação T.

Para a obtenção dos valores de tenacidade, os dados obtidos foram tratados mediante a metodologia da mecânica da fratura linear-elástica, seguindo as equações da norma ASTM E399 (ASTM, 1998). A utilização de equações de  $K_I$  desenvolvidas para materiais isotrópicos é justificada, já que diversos autores têm demonstrado que sua utilização em materiais ortotrópicos é plenamente aceitável (Irwin, 1957; Paris e Sih, 1965). Como é conhecido, a equação para se determinar o fator de intensidade de tensões crítico  $K_{IC}$  é:

$$K_{IC} = \frac{Y P_q}{B \sqrt{W}} \quad (1)$$

com  $Y$  (fator geométrico) definido segundo a expressão

$$Y = \frac{(2 + a/W)(0,886 + 4,64a/W - 13,32a^2/W^2 + 14,762a^3/W^3 - 5,6a^4/W^4)}{(1 - a/W)^{3/2}} \quad (2)$$

Nas equações anteriores  $Pq$  é o valor crítico do carregamento,  $a$  é o comprimento da trinca,  $B$  a espessura do corpo de prova e  $W$  a altura do corpo de prova. Embora o fator de intensidade de tensões seja o mesmo tanto para materiais isotrópicos quanto para materiais ortotrópicos, as equações que definem as tensões em função de  $K$  são diferentes para cada tipo de material (Paris e Sih, 1965).

Os resultados são mostrados nas Tabelas 2 e 3. A Tabela 2 exibe o fator de intensidade de tensões ( $K_q$ ) do material quando as fibras estão paralelas ao entalhe, enquanto que a Tabela 3 apresenta valores obtidos em corpos de prova com fibras transversais ao entalhe. Como esperado, existe uma grande dependência da tenacidade com a orientação das fibras. Quando elas estão orientadas perpendicularmente ao entalhe a tenacidade aumenta mais de duas vezes se comparada com os valores obtidos em corpos de prova com fibras longitudinais.

Tabela 2: Resultados experimentais. Orientação L.

Diâmetro da ponta do entalhe [mm]	$K_q$ médio [MPa.m <sup>1/2</sup> ]	Desvio padrão [MPa.m <sup>1/2</sup> ]
0,10	6,43	0,15
0,30	6,56	0,10
0,60	6,78	0,24
1,00	6,54	0,02

Tabela 3: Resultados experimentais. Orientação T.

Diâmetro da ponta do entalhe [mm]	$K_q$ médio [MPa.m <sup>1/2</sup> ]	Desvio padrão [MPa.m <sup>1/2</sup> ]
0,10	15,19	1,06
0,30	16,47	1,85
0,60	15,10	0,25
1,00	15,29	0,17

Um fato interessante foi o modo de fratura. Na orientação L a trinca propagou-se no mesmo sentido do entalhe, enquanto que na orientação T a trinca propagou-se sempre transversalmente ao entalhe, como pode ser visualizado na Fig. 4. Este modo de fratura se apresenta em materiais com alto grau de anisotropia, particularmente em materiais reforçados por fibras de vidro (Hine *et al*, 1993).

Baseado nos dados apresentados nas Tabelas 2 e 3 construiu-se o gráfico da Fig. 5, onde se mostram superpostos os resultados para as duas orientações analisadas. As barras verticais em cada ponto representam a magnitude do desvio padrão. Na referida figura pode-se observar que não existe diferença significativa na tenacidade com a mudança na acuidade do concentrador de tensões, dentro da faixa de diâmetros utilizada, sendo assim para as duas orientações analisadas. Este resultado é muito diferente do comportamento apresentado pelos materiais metálicos tradicionais, cuja tenacidade aumenta com a diminuição da acuidade (Hertzberg, 1996).



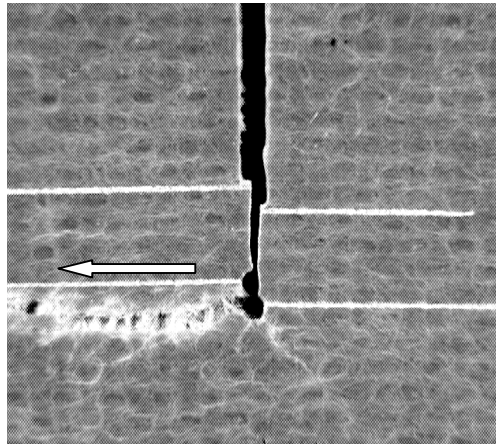


Figura 4 – Fratura perpendicular ao entalhe. A seta indica o sentido da propagação. Corpos de prova orientação T (as fibras contínuas estão na direção da seta).

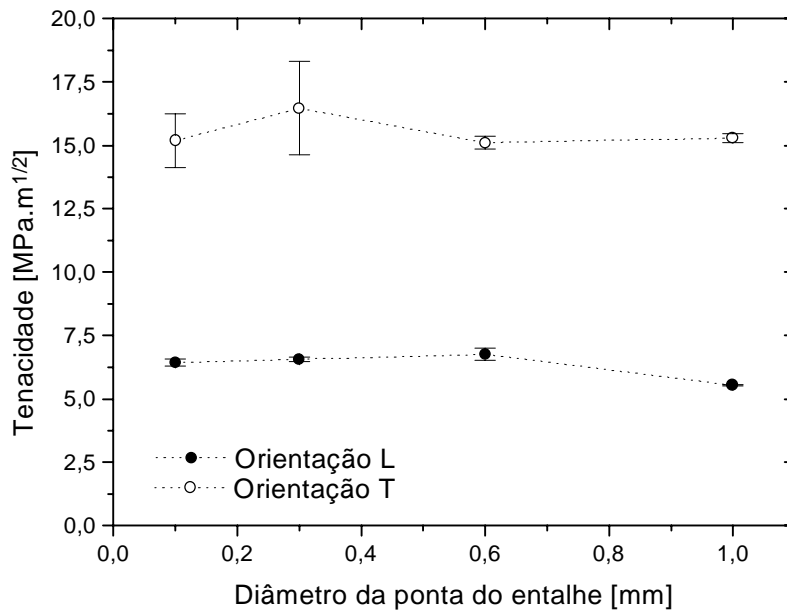


Figura 5 - Resultados experimentais.

#### 4. CONCLUSÕES

- Os valores aproximados de tenacidade obtidos com as fibras na orientação L são coerentes com os valores de tenacidade típicos de materiais poliméricos (Williams, 1987). Neste caso a tenacidade é um pouco maior que a da matriz, indicando que as fibras longitudinais não atuam reforçando esta propriedade. Este pequeno aumento de tenacidade, se comparado com a tenacidade da matriz, é fornecido pela contribuição de reforço das fibras curtas das camadas de manta. Quando as fibras longas estão orientadas transversalmente ao entalhe a tenacidade aumenta. Este comportamento é coerente com toda a teoria estabelecida sobre reforços em materiais compósitos (Chawla, 1987).

- Dentro da faixa de acuidades analisada não existem diferenças significativas entre os valores de tenacidade. Isto significa que entalhes com diâmetros na ponta de 1,00 mm podem ser igualmente críticos que um entalhe agudo. Este comportamento é similar para as duas direções das fibras analisadas, resultado substancialmente diferente do comportamento dos materiais metálicos tradicionais.
- A dispersão dos resultados é baixa, indicando que provavelmente um corpo de prova poderia haver sido suficiente para avaliar, com razoável precisão, a tenacidade do material.

### ***Agradecimentos***

Ao CNPq, Finep, CAPES e à Fundação José Bonifácio pela ajuda financeira para a realização da pesquisa; assim como à Cogumelo Ltda. pelo fornecimento do material e a usinagem dos corpos de prova.

## **5. REFERÊNCIAS**

- ASTM, 1998, Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.01, Philadelphia.
- Callister, W. D., 1994, Materials Science and Engineering, 3<sup>rd</sup> ed., John Wiley & Sons Inc., New York.
- Castrodeza, E. M., 1998, Avaliação da Tenacidade à Fratura de Compósitos Laminados Metálicos de Ligas de Alumínio com Epóxi Reforçado por Fibras, Tese M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Chawla, K. K., 1987, Composite Materials: Science and Engineering, 1<sup>st</sup> ed., Springer-Verlag, New York.
- Hertzberg, R. W., 1996, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, 4<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, New York.
- Hine, P. J., Duckett, R. A. and Ward, I. M., 1993, The Fracture Behaviour of Short Glass Fibre-reinforced Polyoxymethylene, Composites, vol. 24, pp. 643-649.
- Irwin, G. R., 1957, Analysis of Stresses and Strains Near the End of Crack Transversing a Plate, Journal of Applied Mechanics, vol. 6, pp. 361.
- Marissen, R., 1984, Flight Simulation Behaviour of Aramid Reinforced Aluminium Laminates (ARALL), Engineering Fracture Mechanics, vol 19, no 2, pp. 261-277.
- Paris, P., and Sih, G., 1965, Stress Analysis of Cracks, In: Fracture Toughness Testing and Its Application, ASTM STP 381, American Society for Testing Materials, pp. 30-81.
- Ritchie, R., Yu, W., and Bucci, R. J., 1989, Fatigue Crack Propagation in ARALL® Laminates: Measurement of the Effect of Crach-Tip Shielding from Crack Bridging, Engineering Fracture Mechanics, vol. 32, no 3, pp. 361-377.
- Smith, W. F., 1990, Principles of Materials Science and Engineering, 2<sup>nd</sup> ed., Mc Graw Hill, New York.
- Williams, J. G., 1987, Fracture Mechanics of Polymers, Ellis Horwood Limited, Great Britain.

## DEPENDENCE OF PULLTRUDED FIBERGLASS COMPOSITES TOUGHNESS ON NOTCH ACUITY

**Abstract.** *The fracture behavior of fiberglass reinforced pultruded composite was studied as function of the tip diameter of the stress concentrator. The values of the stress intensity factor at fracture ( $K_q$ ) were obtained for two orientations of the fibers relative to the notch: longitudinal and transverse. The results show that the values of  $K_q$  are very sensitive to the orientation, as expected, but insensitive to the diameter of the tip of the stress concentrator, in the range of the diameters studied.*

**Keywords:** *Pultruded composites, Fracture toughness, Crack-tip acuity.*