

## **FUROS CONCÊNTRICOS EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS: RESISTÊNCIA E RIGIDEZ**

**Sérgio Renan Lopes Tinô, sergiorlt@yahoo.com.br<sup>1</sup>**  
**Raphael Siqueira Fontes, fontesrs@gmail.com<sup>1</sup>**  
**Eve Maria Freire de Aquino, eve@dem.ufrn.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>UFRN – DEM – Programa de Pós-graduação em Engenharia mecânica/PPGEM - Centro de Tecnologia, Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal – RN/Brasil, CEP: 59072-970 da instituição.

**Resumo:** *O interesse de se estudar a utilização de compósitos poliméricos reforçados com diversos tipos de fibras, sejam as mesmas sintéticas ou naturais, tem levado a um grande desenvolvimento destes materiais. Somando-se a isto, torna-se inegável uma melhor análise do comportamento mecânico desses materiais, quando envolvidos em projetos estruturais, sob as mais severas condições de geometria, incluindo a presença de descontinuidades as quais influem de forma adversa na resposta mecânica final. Este presente trabalho tem como objetivo analisar as propriedades mecânicas de resistência (tensão de fratura) e de rigidez (módulo de elasticidade) frente ao carregamento de tração uniaxial, de laminados compósitos poliméricos reforçados tanto com fibras sintéticas quando naturais, com e sem presença de descontinuidade geométrica. A descontinuidade geométrica consiste em um furo concêntrico na seção transversal do compósito. Para se entender a influência da presença do furo nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos, duas diferentes configurações de laminados compósitos foram estudadas: um unicamente reforçado com tecido de fibras de vidro-E (CV) e o outro do tipo híbrido, ou seja, reforçado com tecido de fibras de vidro-E e fibras de juta (CH). O laminado CV se mostrou mais sensível à presença do furo em relação ao laminado CH com relação à resistência. Já o comportamento da rigidez se mostrou contrário ao observado na resistência.*

**Palavras-chave:** *Laminados Compósitos, Furo Concêntrico, Resistência, Rigidez*

### **1. INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento de novos materiais que possam combinar alto desempenho e baixo custo vem sendo a tônica de muitos trabalhos de investigação nas últimas décadas. Os materiais compósitos e principalmente os compósitos à base de matriz polimérica, tem tido um espaço importante nessas investigações, já que os mesmos atendem bem aos requisitos mencionados acima, somando-se ainda a vantagem de possuírem baixo peso, parâmetro imprescindível em muitas aplicações estruturais.

A resposta mecânica dos materiais compósitos exhibe uma forte influência das propriedades de seus constituintes, como tipos de reforços e matrizes, percentuais desses constituintes e principalmente da distribuição e orientação das fibras (anisotropia) (Herakovich, 1997). A propriedade de anisotropia torna-se, inclusive, um limitante em termos de aplicação para os materiais compósitos na forma de estrutura laminar, porém sua presença se torna necessária se essas estruturas estejam destinadas a suportar grandes esforços.

Somado a essa complexidade, as aplicações desses elementos estruturais podem apresentar, também, variações bruscas na área de seção transversal, tais como: furos, ranhuras e entalhes dos mais diversos tipos. Esses tipos de descontinuidades geométricas muitas vezes são necessários para viabilização de conexões entre mecanismos de projetos estruturais. A presença dessas descontinuidades pode gerar sérios problemas com relação à distribuição das tensões internas ao elemento estrutural originando “áreas de concentração de tensão” (Feraboli et al, 2009; Wu e Mu, 2003; Toubal et al, 2005; Hufner e Accorsi, 2009; Pihtili, 2008). Esse fenômeno influi diretamente na resposta mecânica do elemento, principalmente se o mesmo é constituído de um material com comportamento “quebradiço” como é o caso dos compósitos poliméricos em geral (Aquino e Tinô, 2009).

O objetivo deste trabalho é estudar a influência da presença de descontinuidades na área de seção transversal de laminados compósitos a base de matriz polimérica nas propriedades mecânicas de resistência e rigidez, sob carregamento de tração uniaxial. Os laminados compósitos em questão, possuem configurações distintas, sendo um deles reforçado unicamente com fibras de vidro/E e definido como CV e o outro do tipo híbrido reforçado com fibras de vidro/E e fibras de juta e definido como CH. Os dois laminados têm como matriz a resina de poliéster ortoftálica e os reforços são constituídos de tecidos bidirecionais.

Dentro desse estudo se destaca a presença da anisotropia referente a ambos laminados, já que a orientação das fibras em suas camadas (configuração) pode exercer, de forma simultânea, influência nessas propriedades (Yeh e Rashid, 2006). Os compósitos foram fabricados industrialmente (Tecniplas Nordeste Indústria e Comércio Ltda.) obtido através do processo de laminação manual (hand-lay-up).

As propriedades mecânicas estudadas, tais como resistência última à tração e módulo de elasticidade longitudinal (na direção de aplicação da carga), foram determinadas a partir da realização do ensaio estático de tração uniaxial, para o **CV** e o **CH**. Para facilitar o entendimento dessas propriedades, os laminados compósitos serão definidos como **CV** e **CH** para o estudo dos mesmos sem a presença de descontinuidade, enquanto que, **CVD** e **CHD**, se referem aos laminados com a presença de descontinuidade. A descontinuidade na seção transversal é caracterizada por um furo concêntrico de diâmetro 6,0 mm. Foi realizado um estudo comparativo entre os mesmos, para se definir qual o grau de influência desta descontinuidade geométrica nas propriedades mecânicas dos laminados em estudo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Configuração dos Laminados

A configuração do laminado **CV** envolve a presença de 4 (quatro) camadas sendo todas de tecido bidirecional de fibras de vidro-E (gramatura: 600 g/m<sup>2</sup>). Quanto ao laminado compósito **CH**, definido como laminado compósito híbrido, o mesmo envolve a presença de 5 (cinco) camadas todas de tecidos bidirecionais sendo a camada central de fibras de vidro-E (600 g/m<sup>2</sup>) e as 4 camadas adjacentes de fibras de juta (trama de 3617,1 denier / urdume de 3245,4 denier).

O processo de fabricação utilizado para ambos os laminados foi o de moldagem manual (Hand Lay-up), no qual foram obtidas duas placas de 1,0 m<sup>2</sup> cada, sendo utilizada como matriz a resina poliéster ortoftálica (para ambos, **CV** e **CH**). As configurações dos laminados **CV** e **CH** estão ilustradas nas Figs. (1a) e (1b), onde a definição de 0/90° e ±45° se refere à orientação das fibras com relação à direção de aplicação da carga e no qual se define TFV e TFJ, respectivamente como, tecido bidirecional de fibra de vidro e tecido bidirecional de fibra de juta.

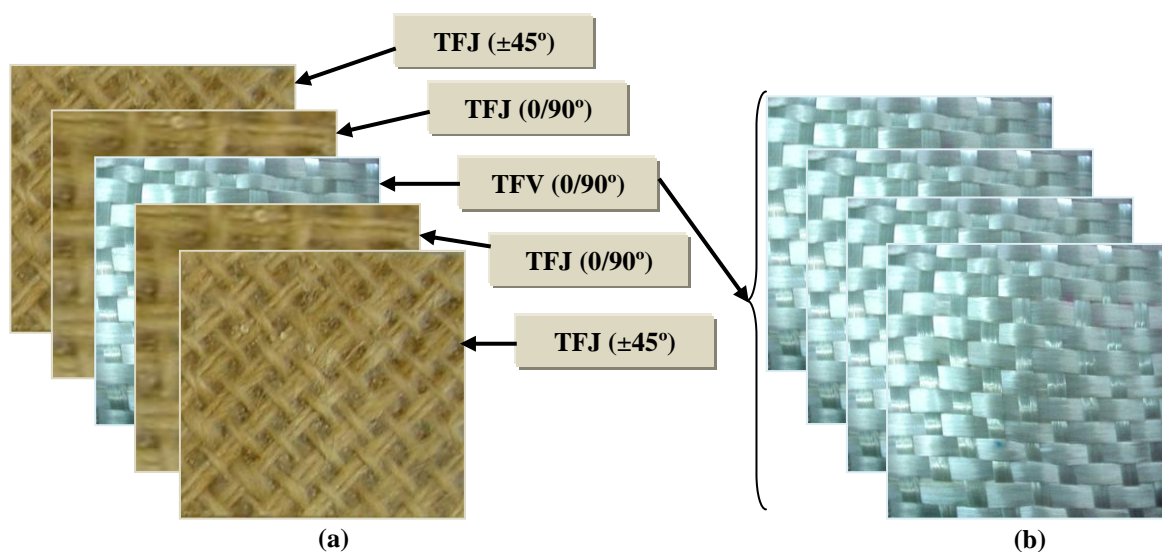


Figura 1. Configuração dos laminados: (a) CV, (b) CH.

### 2.2. Corte e Confeção dos Corpos de Prova

Após a obtenção das dimensões apropriadas dos corpos de prova, foram realizados os procedimentos de lixamento e polimento nas regiões onde o disco de corte foi aplicado. Como a espessura dos laminados apresenta variações em função do processo de fabricação utilizado, foram necessárias pelo menos 05 (cinco) medidas na região do galgo para a obtenção do valor médio das dimensões (largura e espessura) de cada corpo de prova.

Para os corpos de prova destinados à confecção do furo (**CVD** e **CHD**), os mesmos foram confeccionados a partir de um pré-furo de 2,0 mm, cujo procedimento contínuo de brocagem se deu até atingir o diâmetro normalizado (ASTM D 5766-02) dos furos, de 6,0 mm. As brocas utilizadas no processo possuem fio diamantado, evitando assim, possíveis irregularidades na superfície dos furos.

### 2.3. Ensaio de Tração

O ensaio de tração uniaxial foi realizado objetivando-se encontrar a resistência última à tração e o módulo de elasticidade longitudinal (na direção de aplicação da carga) dos laminados. Para tanto, foram confeccionados 08 (oito)

corpos de prova com e sem furo concêntrico para ambas as configurações, totalizando 32 amostras, os quais foram ensaiados utilizando uma máquina de Ensaio Universal Mecânica (AGI-250 KN Shimadzu) com capacidade máxima de 25 T.

As dimensões dos corpos de prova sem o furo concêntrico foram definidas utilizando-se a norma ASTM D 3039-08, enquanto para os corpos de prova com presença de furo concêntrico utilizou-se a norma ASTM D 5766-02. Todos os laminados possuem um comprimento útil (gage) de 127 mm e larguras de 36 mm (**CHD** e **CVD**) e 25 mm (**CH** e **CV**). Vale lembrar que todas as dimensões para os corpos de prova estão dentro de uma tolerância dimensional exigida na norma de  $\pm 1\%$ .

A Figura (2) mostra os modelos de corpos de prova para todos os tipos de laminados compósitos estudados. É importante lembrar que apesar do laminado **CH**, na Fig. (2b), ter um maior comprimento total, este possui um comprimento útil igual ao dos outros laminados (127 mm), portanto, a modificação se deu apenas para uma melhor acomodação do corpo de prova nas garras da máquina e inclusive previsto dentro da norma.

Ressalta-se que, segundo a norma ASTM D 5766-02, a resistência última a tração dos laminados **CVD** e **CHD** é determinada na área de maior seção transversal. O valor da velocidade de deslocamento foi definido através da norma para todos os corpos de prova como de 1,0 (um) mm/min. Todos os ensaios foram realizados a temperatura ambiente ( $25 \pm 2$ )°C.

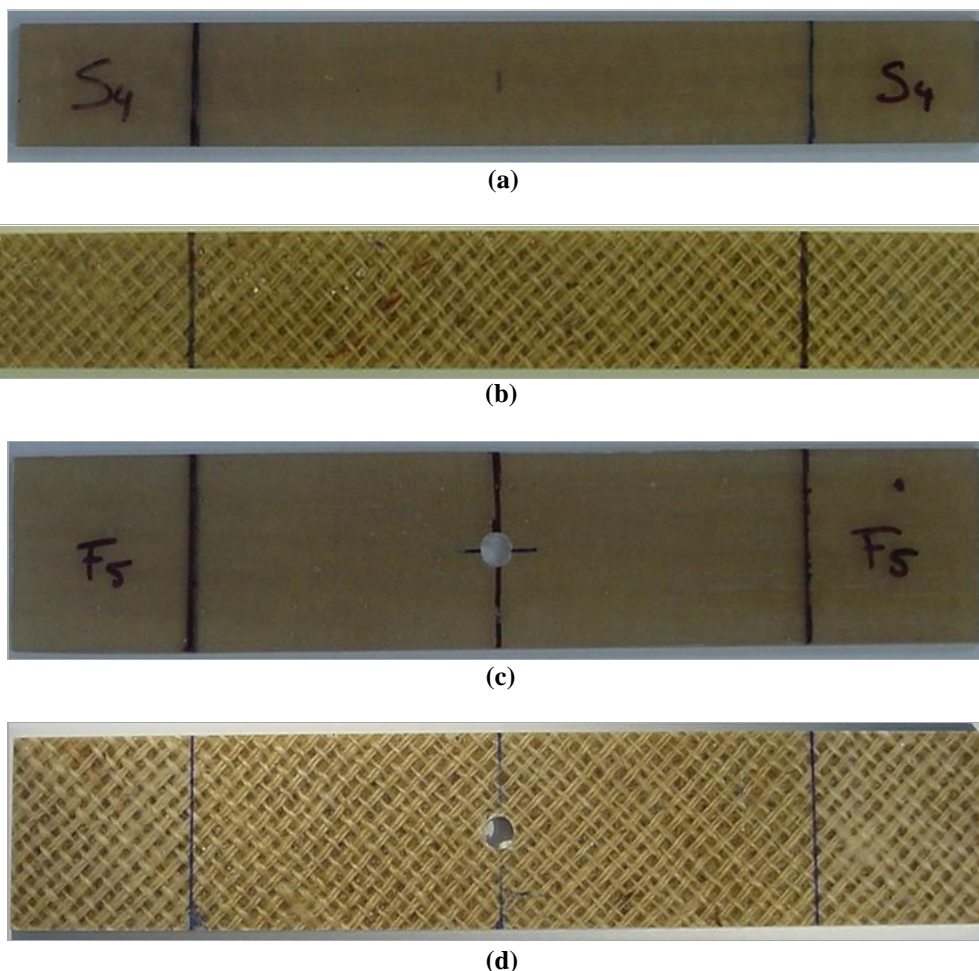


Figura 2. Modelos de corpos de prova utilizados para os laminados: (a) CV, (b) CH, (c) CVD, (d) CHD.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Ensaio de Tração Uniaxial para o Laminado Compósito Reforçado por Fibras de Vidro-E

No que se refere ao ensaio de tração uniaxial para os laminados compósitos **CV** e **CVD**, as Figs. (3a) e (3b) mostram os respectivos gráficos Tensão x Deformação. Observa-se um comportamento que pode ser considerado linear elástico entre a tensão e a deformação para os dois laminados, característica esta comum aos laminados à base de resina poliéster reforçados com fibras de vidro (Aquino et al, 2007). Neste sentido, a presença de um furo concêntrico no **CVD** não alterou significativamente esse comportamento do material.

Os valores médios do limite de resistência à tração (MPa) e do módulo de elasticidade longitudinal (GPa) (determinado na direção de aplicação da carga) estão mostrados na Tab. (1), bem como os valores referentes às suas

respectivas dispersões, caracterizadas pela diferença absoluta ocorrida entre os valores máximo e mínimo obtidos nos ensaios.

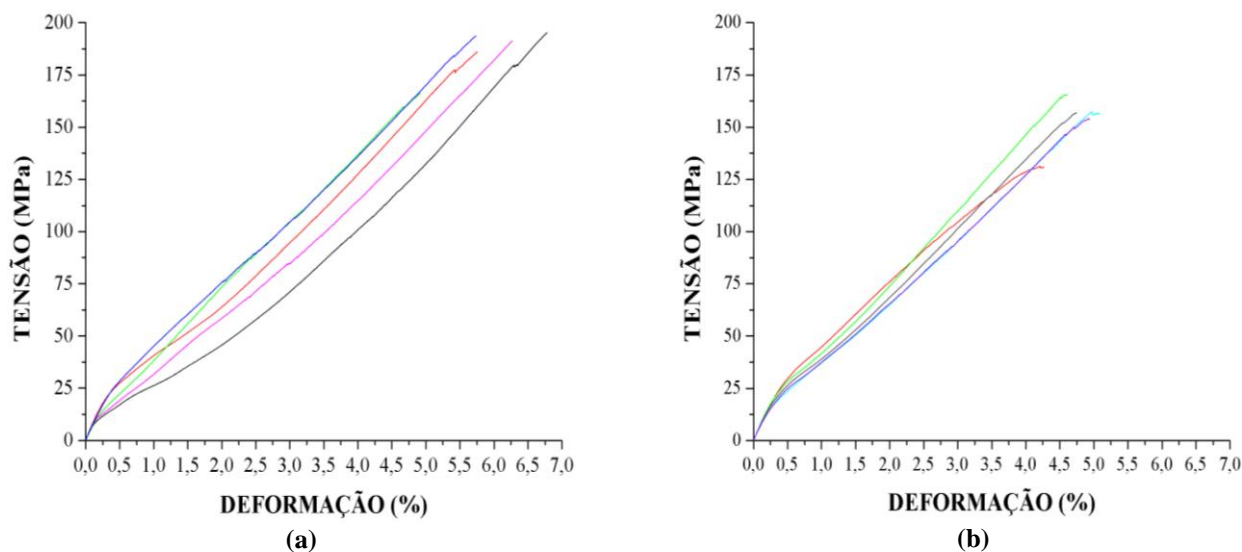


Figura 3. Gráficos Tensão x Deformação para os laminados: (a) CV, (b) CVD.

Tabela 1. Propriedades mecânicas obtidas para os laminados compósitos CV e CVD na tração uniaxial.

PROPRIEDADE MECÂNICA	CV		CVD	
	Valor Médio	Dispersão (%)	Valor Médio	Dispersão (%)
Resistência última à Tração (MPa)	186,59	15,13	152,99	20,77
Módulo de Elasticidade longitudinal (GPa)	3,03	9,63	3,15	18,08

### 3.2. Ensaio de Tração Uniaxial para o Laminado Compósito Híbrido

Assim como ocorre para o laminado CV, observa-se também que a linearidade entre a tensão e a deformação pode ser considerada para o laminado compósito híbrido CH. Os gráficos Tensão x Deformação para os laminados CH e CHD estão mostrados nas Figs. (4a) e (4b). Os valores médios da resistência última à tração (MPa) e do módulo de elasticidade longitudinal (GPa) (determinado na direção de aplicação da carga), para esses laminados, estão mostrados na Tab. (2), bem como suas respectivas dispersões.

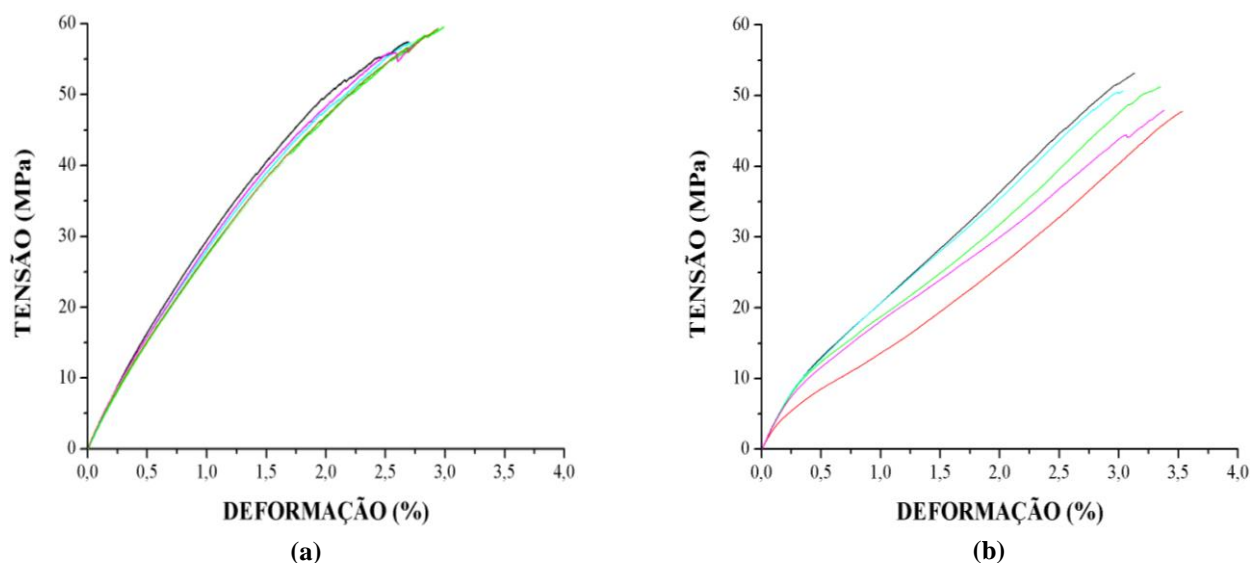


Figura 4. Gráficos Tensão x Deformação para os laminados: (a) CH e (b) CHD.

Tabela 2. Propriedades mecânicas obtidas para os laminados híbridos (CH e CHD) na tração uniaxial.

PROPRIEDADE MECÂNICA	CH		CHD	
	Valor Médio	Dispersão (%)	Valor Médio	Dispersão (%)
Resistência última à Tração (MPa)	58,25	3,71	50,11	10,19
Módulo de Elasticidade longitudinal (GPa)	2,74	10,18	1,39	21,21

### 3.3. Estudo Comparativo entre os Laminados CV e CVD

Para ilustrar a influência do furo concêntrico, foi traçado um gráfico comparativo entre as curvas médias obtidas referentes aos ensaios de tração uniaxial realizados nos laminados **CV** e **CVD** estão na Fig. (5). Percebe-se que não houve alteração no módulo de elasticidade longitudinal entre os laminados, já que a diferença de 3,97 % encontra-se dentro do patamar das dispersões. Por outro lado, houve um decréscimo na resistência última de 18,01 % referente ao **CVD**, em comparação com o **CV**, comprovando-se a influência negativa da presença do furo concêntrico. Essa perda na resistência é uma consequência direta do fenômeno de “Concentração de Tensão”, fenômeno extremamente localizado na vizinhança do furo e caracterizado pela descontinuidade na distribuição da tensão (Shigley e Mischke, 2002).

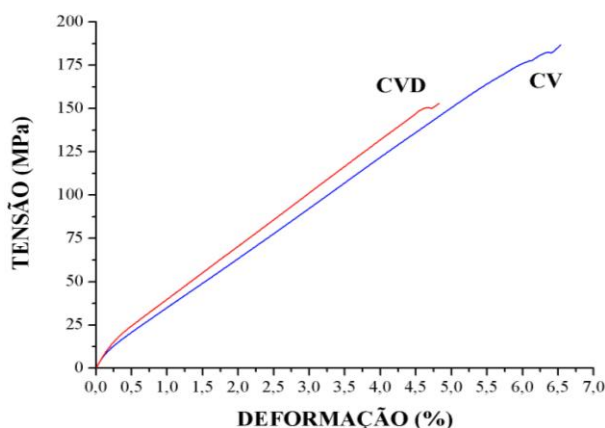


Figura 5. Gráfico Tensão x Deformação comparativo entre os laminados CV e CVD.

### 3.4. Estudo Comparativo entre os Laminados CH e CHD

Para o caso do laminado compósito híbrido foi desenvolvido, de forma semelhante, um gráfico comparativo entre as curvas médias referentes aos ensaios de tração uniaxial realizados para os laminados **CH** e **CHD** e mostrado na Fig. (6). Pode-se perceber, nesse caso, que a influência da presença do furo concêntrico, em termos da resistência última, foi de 13,97 % de perda do **CHD** com relação ao **CH**. No caso do módulo de elasticidade, percebe-se uma perda maior, ou seja, de 49,41 % comparando-se o **CHD** com o **CH**.

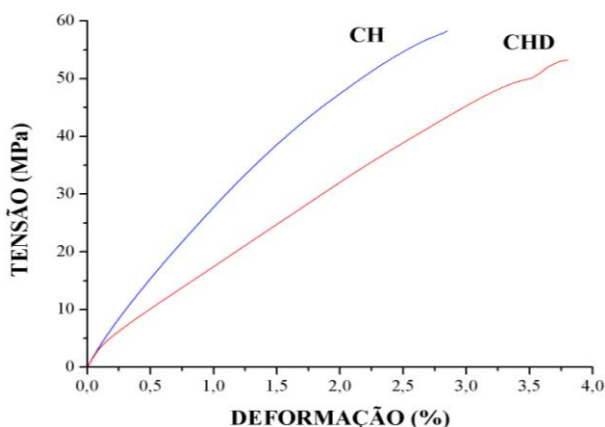


Figura 6. Gráfico comparativo entre os laminados CH e CHD.

### 3.5. Comparativo Global entre os Laminados Compósitos

Para melhor ilustrar as perdas ocorridas nas propriedades mecânicas de resistência e rigidez nos laminados em estudo, foi realizado um estudo comparativo sob a forma de um diagrama global, que mostra de forma mais clara a influência simultânea da configuração e da presença do furo concêntrico nos laminados. Este gráfico é apresentado na Fig. (7) mostrando os valores médios das propriedades mecânicas com suas respectivas dispersões.

De uma forma geral, para os laminados em estudo a presença do furo concêntrico acarretou um grau de nocividade com relação às propriedades de resistência última à tração e módulo de elasticidade do material.

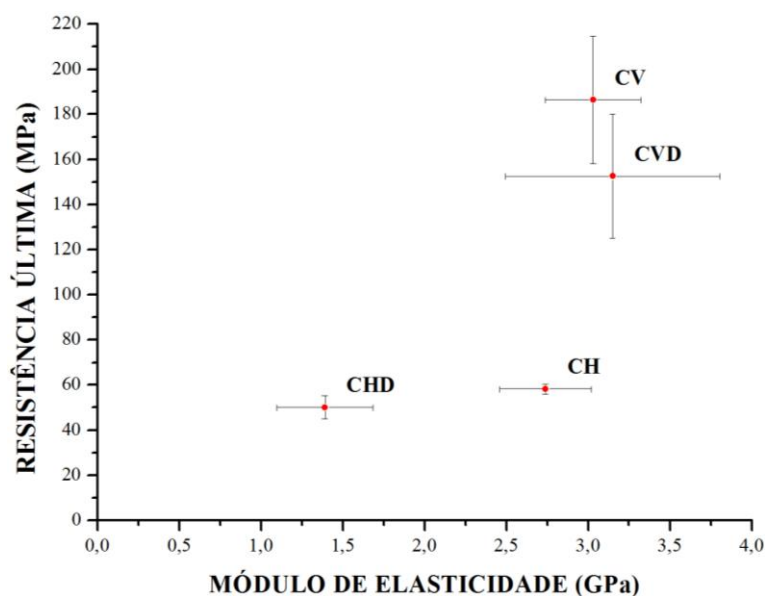


Figura 7. Diagrama comparativo global entre os laminados compósitos.

Como estudo complementar objetivando um melhor entendimento na resposta dos laminados, um parâmetro importante a ser analisado é a influência da configuração. Neste sentido, fez-se necessário a construção de diagramas mais detalhado da influência da orientação do reforço em relação à resistência última e ao módulo de elasticidade. Esse resultado pode ser observado nas Fig. (8).

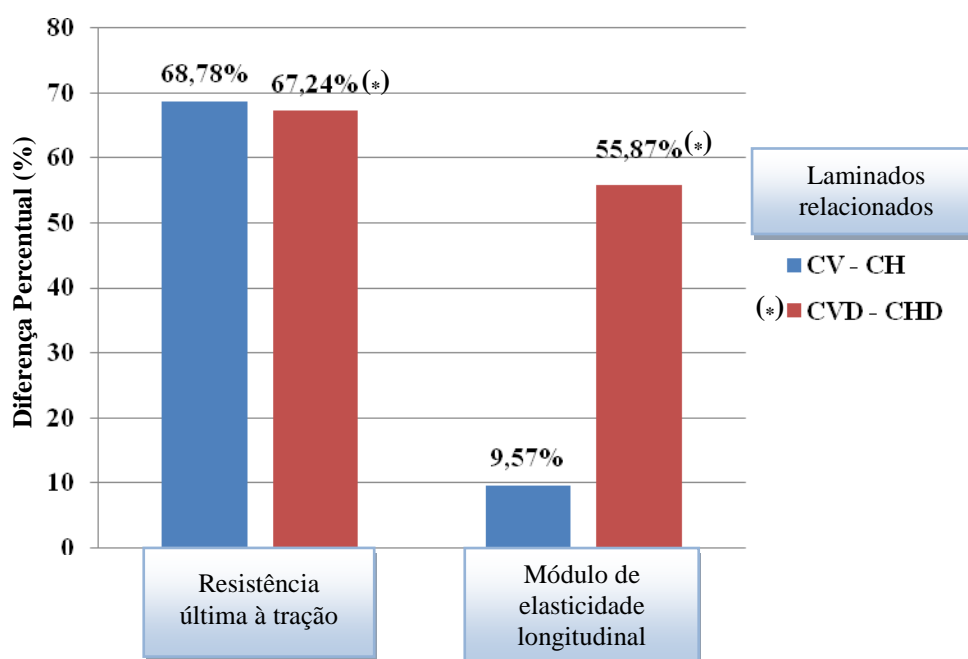


Figura 8. Estudo da influência da configuração: comparativo entre os laminados com relação à resistência última à tração e ao módulo de elasticidade.

Com relação à resistência última podemos dizer que quando comparado o laminado **CV** com o laminado **CH**, houve uma coerência no que diz respeito à orientação da fibra, ou seja, quando comparado os laminados sob mesmas condições, ou ambos com furo concêntrico ou ambos sem furo concêntrico, as diferenças percentuais são praticamente as mesmas (68,78% e 67,24%), como observado na Fig. (8).

Para o módulo de elasticidade observa-se que ao se comparar a influência da configuração entre os laminados, a presença de orientação de fibras a  $\pm 45^\circ$  para o laminado híbrido resulta em um comportamento complexo já que a presença do cisalhamento de alguma forma altera a capacidade de deformação desse laminado frente à outra configuração.

De forma geral a presença de elementos que possam concentrar tensão nos materiais compósitos precisa ser considerada em qualquer configuração e independentemente do grau de anisotropia do mesmo ou da presença de hibridização, apesar de Feraboli et al (2009) considerar em seu trabalho que para um pré-impregnado descontínuo de carbono/epóxi a concentração de tensão se dá devido a heterogeneidade do material e não pela existência da descontinuidade geométrica, e que portanto, considera o material insensível ao entalhe.

#### 4. CONCLUSÕES

A partir da análise de todos os resultados mostrados nesse trabalho, algumas conclusões podem ser feitas:

- Tanto para o **CVD** quanto para o **CHD**, a presença do furo concêntrico teve uma influência negativa no que diz respeito às suas propriedades mecânicas, tendo uma perda de resistência de 18,01% e 13,97%, respectivamente;
- Nos laminados a base de fibras de Vidro-E (**CV** e **CVD**), pode-se negligenciar a variação ocorrida entre os módulos de elasticidade longitudinais, uma vez que a mesma encontra-se dentro da dispersão;
- Para o laminado híbrido, a presença do furo concêntrico diminuiu a rigidez do mesmo, visto que a diferença percentual foi de aproximadamente 50%;
- Pode-se dizer que o laminado híbrido **CH** é menos sensível a presença de furo concêntrico quando comparado ao laminado **CV** no que diz respeito à resistência última e, portanto, é um laminado considerado menos “sensível ao entalhe”, por outro lado, quando se considera o módulo de elasticidade (rigidez), este comportamento se mostra de forma inversa;
- De uma forma geral quando se projeta, não só materiais convencionais assim como materiais compósitos, deve-se ter uma preocupação bastante significativa no que diz respeito à presença de elementos concentradores de tensão, pois estes podem levar a falhas no projeto para cargas de intensidades menores.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro provenientes da CAPES e do CNPq, pela concessão de bolsas.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Aquino, E.M.F., Sarmiento, L.P.S., Oliveira, W., Silva, R.V., 2007, “Moisture effect on Degradation of Jute/Glass Hybrid Composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 26, Nº 2.
- Aquino, E.M.F.; Tinô, S.R.L., 2009, “Descontinuidade Geométrica nos Compósitos Poliméricos: Resposta Mecânica e Característica da Fratura”, In: IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica - CIBIM, Las Palmas de Gran Canaria, Anais /2009, Vol. 1, pp. 12/2-12/9.
- ASTM D 3039-08, 2008, “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”, Philadelphia.
- ASTM D 5766-02, 2002, “Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates”, Philadelphia.
- Feraboli, P., Peitso, E., Cleveland, T., Strickler, P.B., Halpin, J.C., 2009, “Notched behavior of prepreg-based discontinuous carbon fiber/epoxy systems”, *Composites: Part-A*, Vol. 40, pp. 289-299.
- Herakovich, C.T., 1997, “Mechanics of fibrous composites”. Ed. Wiley, New York. 460p.
- Hufner, D.R., Accorsi, M.L., 2009, “A progressive failure theory for woven polymer-based composites subjected to dynamic loading”, *Composite Structures*, Vol. 89, pp. 177-185.
- Pihili, H., 2008, “Calculation and Comparison of Stress Concentration Factors in Composite Inverted-tooth Chain Link Plates with Various Dimensions”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 27, Nº. 18.
- Shigley, J.E.; Mischke, C.R., 2002, “Mechanical Engineering Design”. Ed. McGraw-Hill, 5<sup>th</sup> ed. 347p.
- Toubal, L., Karama, M., Lorrain, B., 2005, “Stress concentration in a circular hole in composite plate”, *Composite Structures*, Vol. 68, pp. 31–36.
- Wu, H.C., Mu, B., 2003, “On stress concentrations for isotropic/orthotropic plates and cylinders with a circular hole”, *Composite: Part B*, Vol. 34, pp. 127-134.
- Yeh, H.Y., Rashid, H.N., 2006, “Effect of t-stress on damage zone size predictions of notched laminated composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 25, Nº 1.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores Sérgio Renan Lopes Tinô, Raphael Siqueira Fontes e Eve Maria Freire de Aquino são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

# CENTER HOLES IN POLYMERIC COMPOSITES: STRENGTH AND STIFFNESS

Sérgio Renan Lopes Tinô, sergiorlt@yahoo.com.br<sup>1</sup>

Raphael Siqueira Fontes, fontesrs@gmail.com<sup>1</sup>

Eve Maria Freire de Aquino, eve@dem.ufrn.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UFRN – DEM – Programa de Pós-graduação em Engenharia mecânica/PPGEM - Centro de Tecnologia, Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal – RN/Brasil, CEP: 59072-970 da instituição.

**Abstract:** *The interests of studying the use of polymer composites reinforced with many kinds of fibers are the same synthetic or natural, has led to a great development of these materials. Adding to this, it is undeniably a better analysis of the mechanical behavior of these materials, when engaged in structural projects, under the most severe conditions of geometry, including the presence of discontinuities which adversely affect the final mechanical response. This present study aims to analyze the mechanical properties of strength and stiffness (elastic modulus) to the uniaxial tensile loading of laminated polymer composites reinforced with synthetic and natural fibers, with and without the presence of geometric discontinuity. The geometric discontinuity is characterized by the presence of a center hole in the transversal section of the composite. In order to know the presence influence of the hole for different kinds of stacking sequences, in the mechanical properties of polymer composites, two laminates were studied: one only reinforced with fabric of fiberglass-E (CV) and another is a hybrid reinforced with fabric of fiberglass-E and juta fibers (CH). The laminated CV was more sensitive to the presence of the hole in relation to the laminate CH with respect to strength. However, the stiffness behavior was opposite to that observed in the strength.*

**Keywords:** *Laminated Composites, Center Hole, Strength, Stiffness*