

FUROS CONCÊNTRICOS EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS: INFLUÊNCIA DA CARACTERÍSTICA DA FRATURA

Sérgio Renan Lopes Tinô, sergiorlt@yahoo.com.br¹
Raphael Siqueira Fontes, fontesrs@gmail.com¹
Eve Maria Freire de Aquino, eve@dem.ufrn.br¹

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

Resumo: *A presença de descontinuidade geométrica na seção transversal dos elementos estruturais em geral sempre induz a determinadas características da fratura, fator importante na prevenção da falha desses elementos frente aos mais diversos tipos de carregamentos. No caso dos laminados compósitos poliméricos reforçados com fibras espera-se o mesmo comportamento além da influência do tipo de reforço e sua orientação interna nas camadas. O objetivo desse trabalho de investigação visa um estudo detalhado da influência da presença de furos concêntricos na característica da fratura em laminados compósitos poliméricos reforçados tanto com fibras sintéticas quanto naturais. A orientação das fibras com relação à direção da aplicação da carga também é um parâmetro a ser estudado. O carregamento utilizado para tanto é o de tração uniaxial. Para se entender a influência da presença do furo na característica da fratura 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). A análise da fratura foi realizada em dois níveis: análises macroscópicas e microscópicas (óptica e MEV). Os resultados mostraram influência de todos os parâmetros acima relacionados na característica final da fratura.*

Palavras-chave: *Laminados Compósitos poliméricos, furo concêntrico, fratura.*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos materiais compósitos a base de reforços sintéticos ou do tipo híbrido (diferentes tipos de fibras), vem sendo investigado já há algumas décadas, e devido ao alto desempenho mecânico da maioria desses reforços, a aplicação dos mesmos se concentra nos elementos estruturais nas mais diversas áreas. O crescimento da substituição dos materiais ditos convencionais (metais, cerâmicas, etc.) por materiais compósitos nessas aplicações, tem levado os pesquisadores a uma busca incessante de compreender melhor as características de fratura nas mais diversas condições de carregamento e serviço.

Dentre os compósitos mais utilizados destacam-se os compósitos a base de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro, devido à versatilidade de suas propriedades e baixo custo da fibra quando comparado a outras fibras sintéticas como carbono, aramida (kevlar), entre outras. Destaque também se faz para os compósitos híbridos a base de fibras sintéticas e naturais para estruturas de pequeno porte (Aquino et al., 2007).

A característica de fratura dos materiais compósitos exibem 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.

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 e podem gerar sérios problemas com relação à distribuição das tensões internas ao elemento estrutural, originando “áreas de concentração de tensão” (Zhao et al., 2000; Yang e Pitchumani, 2004; Toubal et al., 2005; Hufner e Accorsi, 2009; Pihtili, 2008). Esse fenômeno influi diretamente na fratura final, pois concentra a região de fratura na seção da descontinuidade geométrica, principalmente nos compósitos poliméricos que são constituídos de um material considerado “quebradiço” (Aquino e Tinô, 2009).

Este trabalho de investigação estuda a influência da presença de furos concêntricos na área de seção transversal dos laminados compósitos em questão, CV e CH, na característica de fratura, sob carregamento de tração uniaxial. Dentro

desse estudo se destaca a presença da anisotropia, já que a orientação das fibras nas camadas dos laminados com relação à direção da carga aplicada podem exercer, de forma simultânea, influência na característica de fratura final (Yeh e Rashid, 2006).

A configuração do laminado **CV** envolve a presença de 4 (quatro) camadas de tecido bidirecional de fibras de vidro-E, enquanto a do laminado **CH** envolve a presença de 5 (cinco) camadas constituídas de tecido bidirecional de fibras de vidro-E e tecido bidirecional fibras de juta. Os compósitos foram fabricados industrialmente (Tecniplas Nordeste Indústria e Comércio Ltda) obtido através do processo de laminação manual (hand-lay-up).

As características de fratura estudadas foram determinadas a partir da realização do ensaio estático de tração uniaxial, para os laminados **CV** e **CH**. Para facilitar o entendimento, os laminados 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 geométrica na seção transversal é caracterizada por um furo concêntrico de diâmetro 6,0 mm (normativo). Foi realizado um estudo comparativo entre os mesmos, para se definir qual o grau de influência deste furo concêntrico na característica de fratura final dos laminados em estudo. As análises foram realizadas em níveis: macroscópico e microscópico (óptico e de varredura).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de fabricação utilizado para ambas as configurações foi o de laminação manual (hand lay-up), no qual foram obtidas duas placas de 1,0 m² cada, sendo utilizado como matriz a resina de poliéster orthofitálica. A configuração do laminado **CH** envolve a presença de uma única camada (central) de tecido bidirecional (600 g/m²) de fibras de vidro-E e quatro camadas de tecido bidirecional (trama de 3617,1 denier e urdume de 3245,4 denier) de fibras de juta com espessura média de 5,2 mm. A configuração do laminado **CV** se caracteriza pelo posicionamento das fibras nas camadas centrais tanto de vidro quanto de juta a 0/90°, enquanto que as camadas externas de fibras de juta, as mesmas estão $\pm 45^\circ$ e todas com relação à direção de aplicação da carga. Já a configuração do laminado **CV** é constituída por quatro camadas do mesmo tecido bidirecional de fibras de vidro-E e todas dispostas a 0/90° com relação à direção de aplicação da carga e com espessura média de 3,7 mm.

As configurações dos laminados **CV** e **CH** estão elucidadas na Fig. (1), no qual se define TFV e TFJ, respectivamente como, tecido bidirecional de fibra de vidro e tecido bidirecional de fibra de juta.

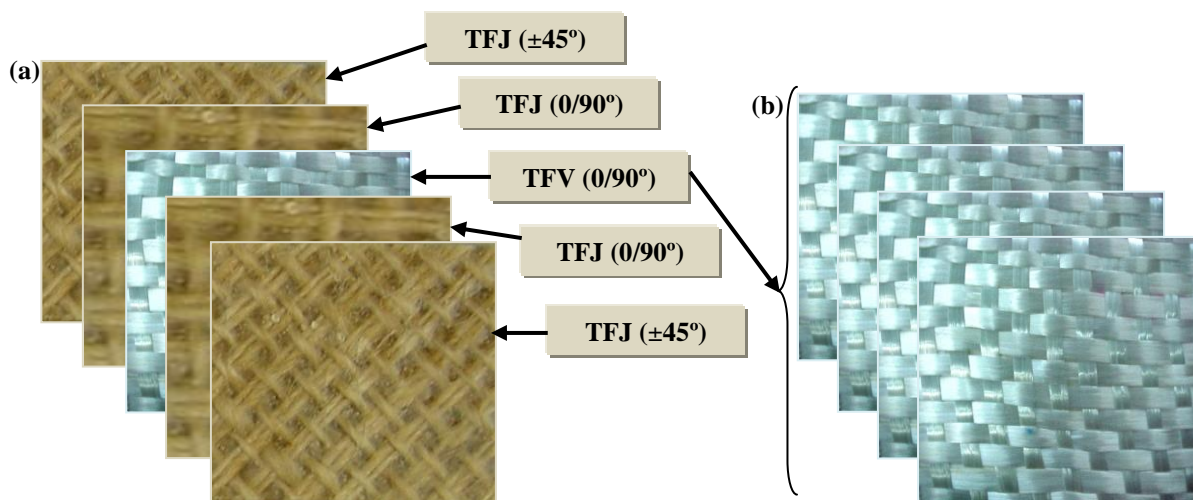


Figura 1. Configuração dos laminados compostos: (a) para o CH, (b) para o CV.

Todos os corpos de prova foram cortados das respectivas placas. É importante salientar que os mesmos foram obtidos seguindo o sentido previamente definido para a configuração de cada laminado, ou seja, as fibras ficaram nas direções mostradas na Fig. (1) com relação à aplicação da carga. 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. Além disso, para os corpos de provas 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) do furo de 6,0 mm. As brocas utilizadas no processo tinham fio diamantado, evitando assim, possíveis irregularidades na superfície do furo.

Foram confeccionados 8 (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 Shimatzu) com capacidade máxima de 25 T. 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 à temperatura ambiente.

As dimensões dos corpos de prova sem a presença do furo concêntrico foram definidas utilizando-se a norma ASTM D 3039-08 e os mesmos procedimentos metalográficos dos corpos de prova do laminado com presença do furo

concêntrico. 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 $\pm 1\%$. As Figuras (2a) a (2d) mostram os corpos de prova para todos os tipos de laminados compósitos estudados.

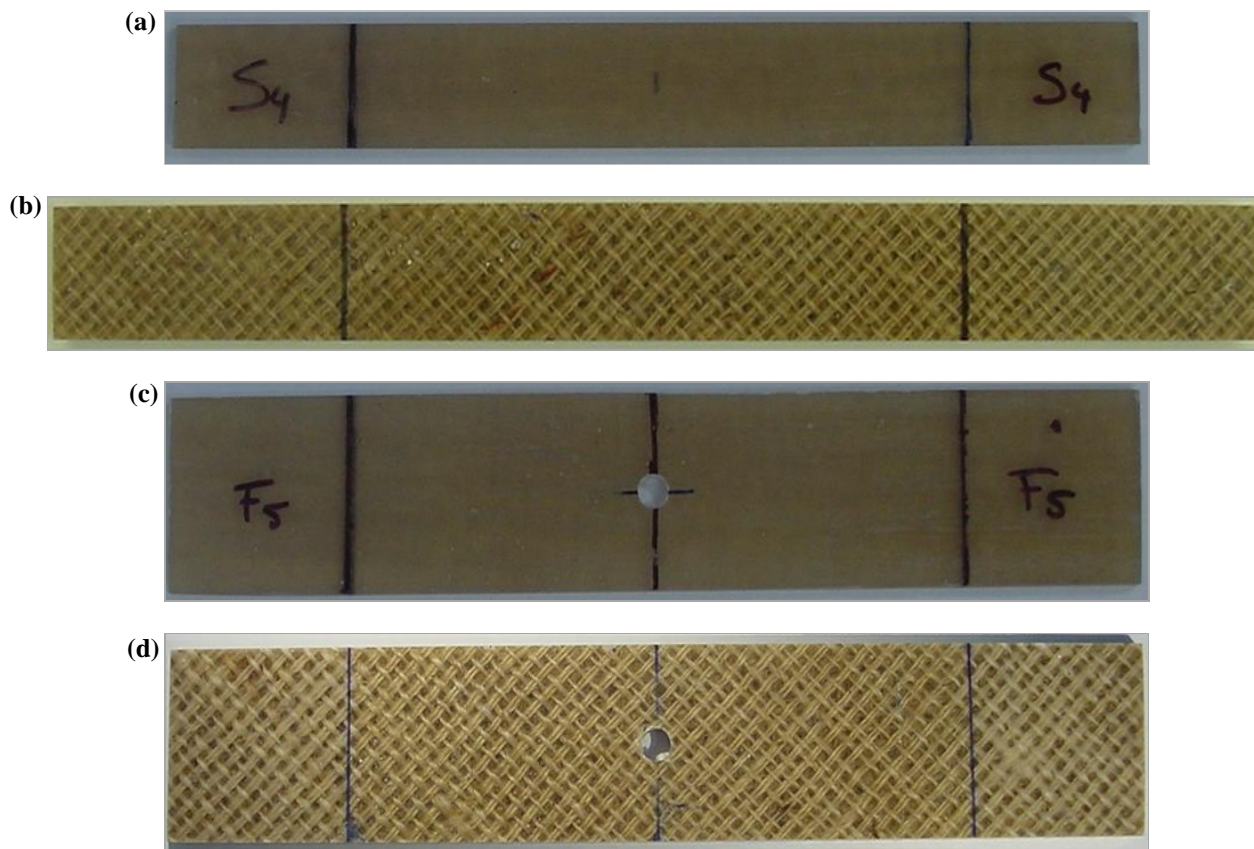


Figura 2. Corpos de prova utilizados para os laminados do tipo: (a) CV, (b) CH, (c) CVD, (d) CHD.

Para o estudo da característica final da fratura (corpos de prova já fraturados) análises microscópicas e macroscópicas dos corpos de prova na região de fratura foram realizadas. Para a análise microscópica utilizou-se um microscópio ótico MG da marca Olympus, e para a microscopia eletrônica de varredura (MEV) um microscópio do tipo Shimadzu SSX550.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise da fratura para os laminados CV e CVD

A característica da fratura para os laminados **CV** e **CVD** inicia-se com uma fissuração progressiva intensa e transversalmente à aplicação da carga que se propaga em todo o comprimento útil dos corpos-de-prova, apresentando estado de saturação da mesma antes da fratura final. Apresentou também, o fenômeno do “rasgamento” na região final da fratura, dano característico dos compósitos poliméricos a base de tecidos (Aquino e Tinô, 2009). É importante lembrar que esse “rasgamento” (pull out) torna-se perceptível após a retirada dos corpos-de-prova das garras da máquina.

A Figura (3) mostra a região de fratura final dos laminados **CV** e **CVD**, que segundo as normas ASTM D 3039-08 e ASTM D 5766-02, o tipo de fratura é lateral na região mediana do galgo (LGM), portanto, totalmente válida para este tipo de ensaio. Também se observa que para o caso do laminado **CVD** as fissurações ocorrem de forma mais concentrada na seção do furo, caracterizando o fenômeno da concentração de tensão.

Na análise da fratura em nível microscópico para o **CV** além da fissuração na matriz, também denominada de fratura coesiva na matriz, foram observadas características de dano como fratura adesiva (desaderência na interface fibra/matriz), delaminação (desaderência entre as camadas do laminado) e ruptura de fibras. A microscopia óptica revelou que as fissuras transversais na matriz quando propagadas até a interface entre as camadas do laminado originou as delaminações, como mostra também a Fig. (4).

É interessante observar que apesar da existência de defeitos de fabricação no laminado **CV**, ver Fig. (4b), alguns deles não se mostram responsáveis por qualquer tipo de dano durante todo o carregamento, muito pelo contrário para

alguns defeitos verifica-se a presença de uma fratura adesiva muito próxima aos mesmos, porém em uma região sem qualquer tipo de defeito aparente de fabricação.

A análise obtida na microscopia eletrônica de varredura (MEV) ainda para o laminado CV, ver Fig. (5), mostra uma região de fratura adesiva (interface fibra/matriz) e com a presença de alguns vestígios de resina na mesma, ou seja, caracterizando a fratura coesiva na matriz.

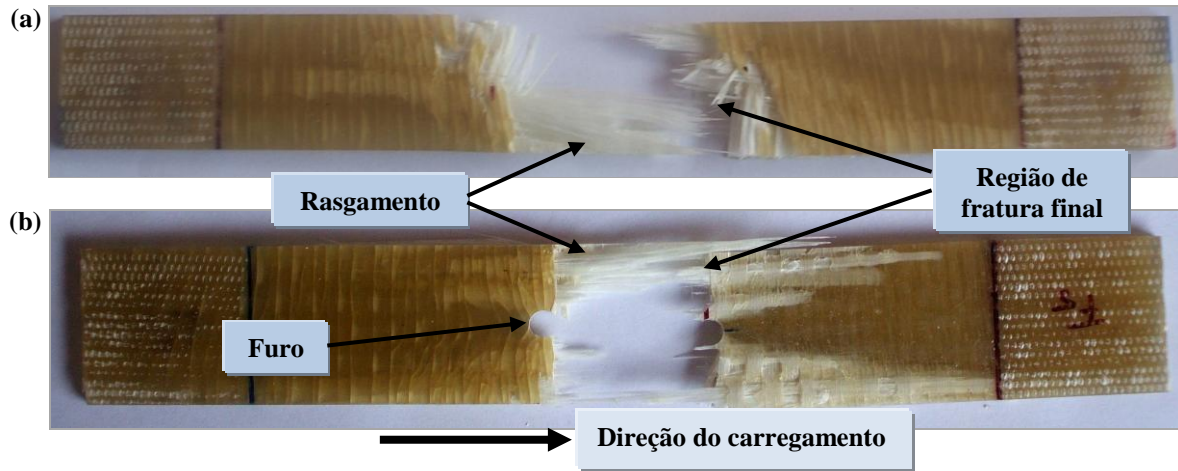


Figura 3. Região de fratura final dos cp's dos laminados (a) CV, (b) CVD. Tração uniaxial.

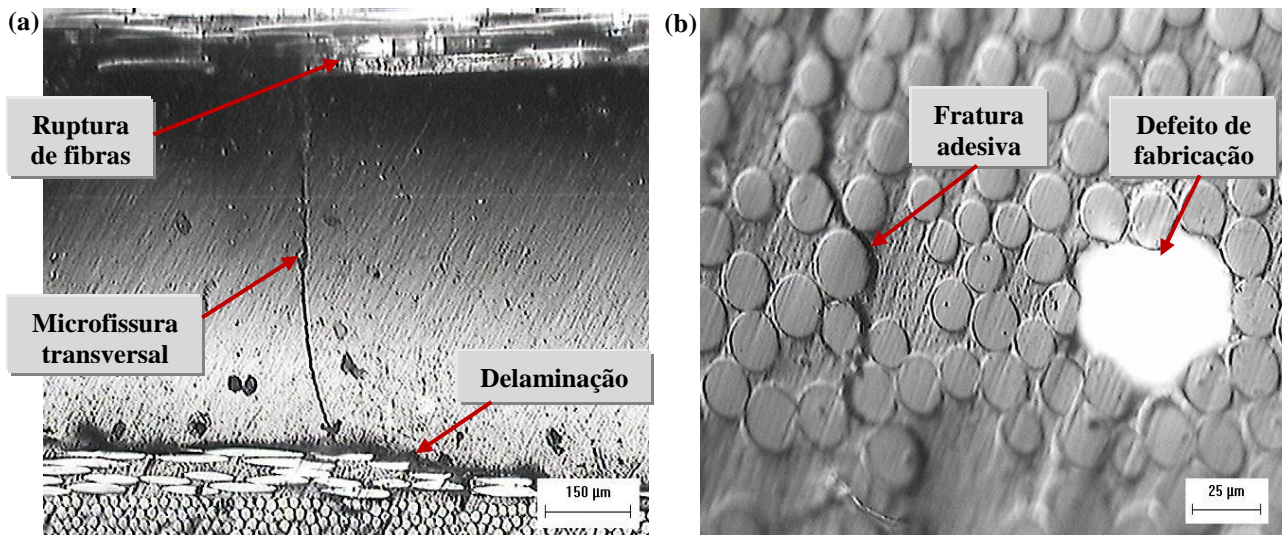


Figura 4. Características da fratura no laminado CV na tração uniaxial: (a) fissuração, delaminação, ruptura de fibras, (b) presença de defeito de fabricação sem originar dano.

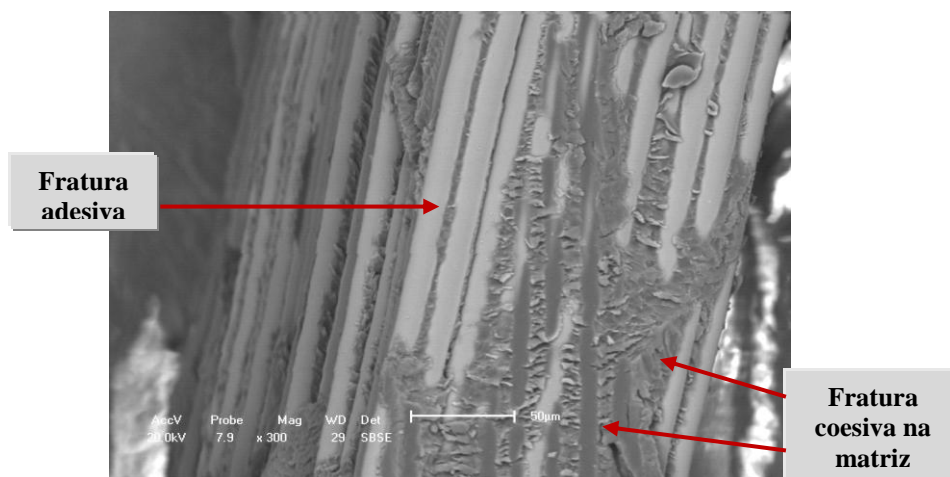


Figura 5. Região de fratura adesiva com resquícios de resinas nas fibras do laminado CV.

No que diz respeito à análise da microscopia óptica para o laminado **CVD**, também ocorreram fissuras transversais na matriz, fratura adesiva na interface fibra/matriz, fratura coesiva na fibra e na matriz e delaminações entre as camadas. Algumas destas características são mostradas na Fig. (6).

Também foram encontradas fissuras que se propagaram na interface das mechas do laminado **CVD**, mostrado na Fig. (6a). Já na Figura (6b) observa-se a desaderência entre as camadas do compósito laminado, ou seja, a delaminação que ocorreu entre as camadas de fibra de vidro do laminado **CVD** devido às discrepâncias ocorridas nas distribuições de tensões no laminado.

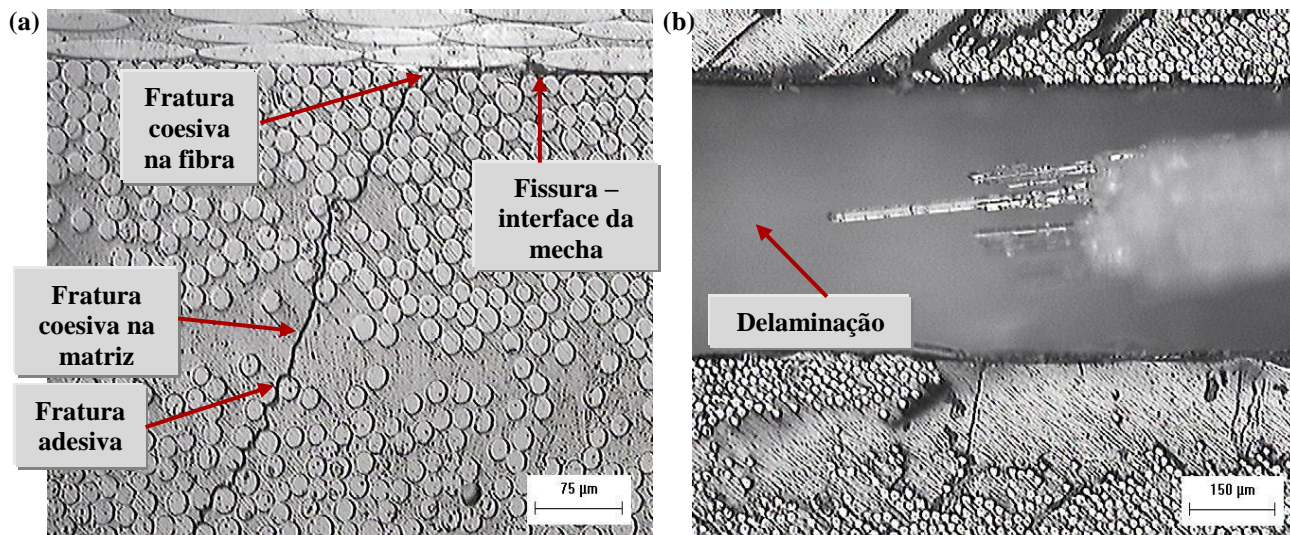


Figura 6. Características da fratura para o laminado **CVD** na tração uniaxial: (a) fissuração, fraturas coesiva e adesiva, (b) delaminação.

A Figura (7), obtida no MEV, mostra a presença de fratura adesiva para o laminado **CVD**, no qual se observa a existência de fibras com superfície limpa de matriz além do arranque de fibras transversais, após a fratura do corpo-de-prova.

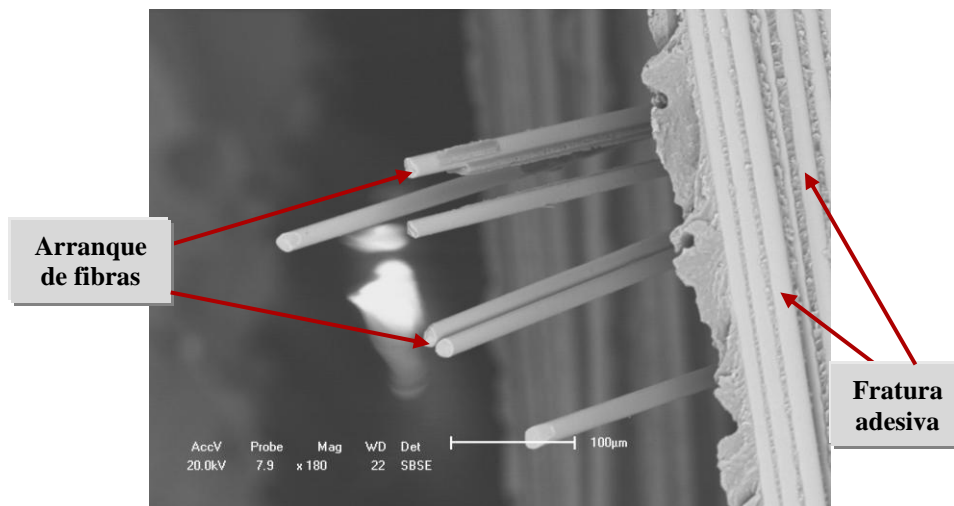


Figura 7. Ruptura de fibras e fratura adesiva observadas no MEV.

3.2. Análise da fratura para os laminados **CH** e **CHD**

Diferentemente dos laminados a base unicamente de fibra de vidro, os laminados híbridos **CH** e **CHD** não apresentaram estado de saturação da matriz, independentemente da presença ou ausência do furo concêntrico. O fenômeno do rasgamento (pull out) foi observado, e ocorreu na camada central (tecido bidirecional de fibra de vidro), como pode ser visto na Fig. (8). Ainda na análise macroscópica do dano ocorrido, o tipo de fratura final definida de acordo com as normas ASTM D 3039-08 e ASTM D 5766-02, foi o lateral e na região mediana do galgo (LGM) para os dois laminados.

Para os laminados **CH** e **CHD** pode-se dizer que a região de fratura ocorreu de forma extremamente localizada, quando comparado com os laminados **CV** e **CVD**, podendo também ser observada na Fig. (8).

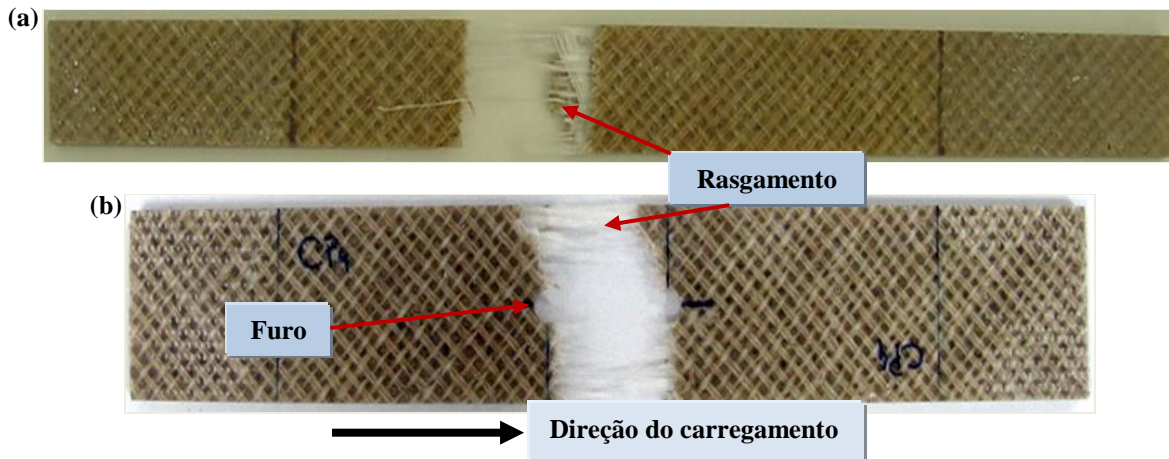


Figura 8. Região de fratura final na tração uniaxial para os laminados: (a) CH, (b) CHD.

A análise microscópica para o laminado **CH** mostrou que ocorreram fissurações na matriz transversal à aplicação da carga também denominada fratura coesiva, fratura adesiva na interface fibra/matriz, além da ruptura de fibras, tanto nas fibras de vidro como nas fibras de juta. A delaminação não se mostrou presente, ou seja, não ocorreram desaderência entre as camadas do laminado **CH**. A Figura (9) mostra alguns destas características do dano citadas anteriormente para o laminado **CH**.

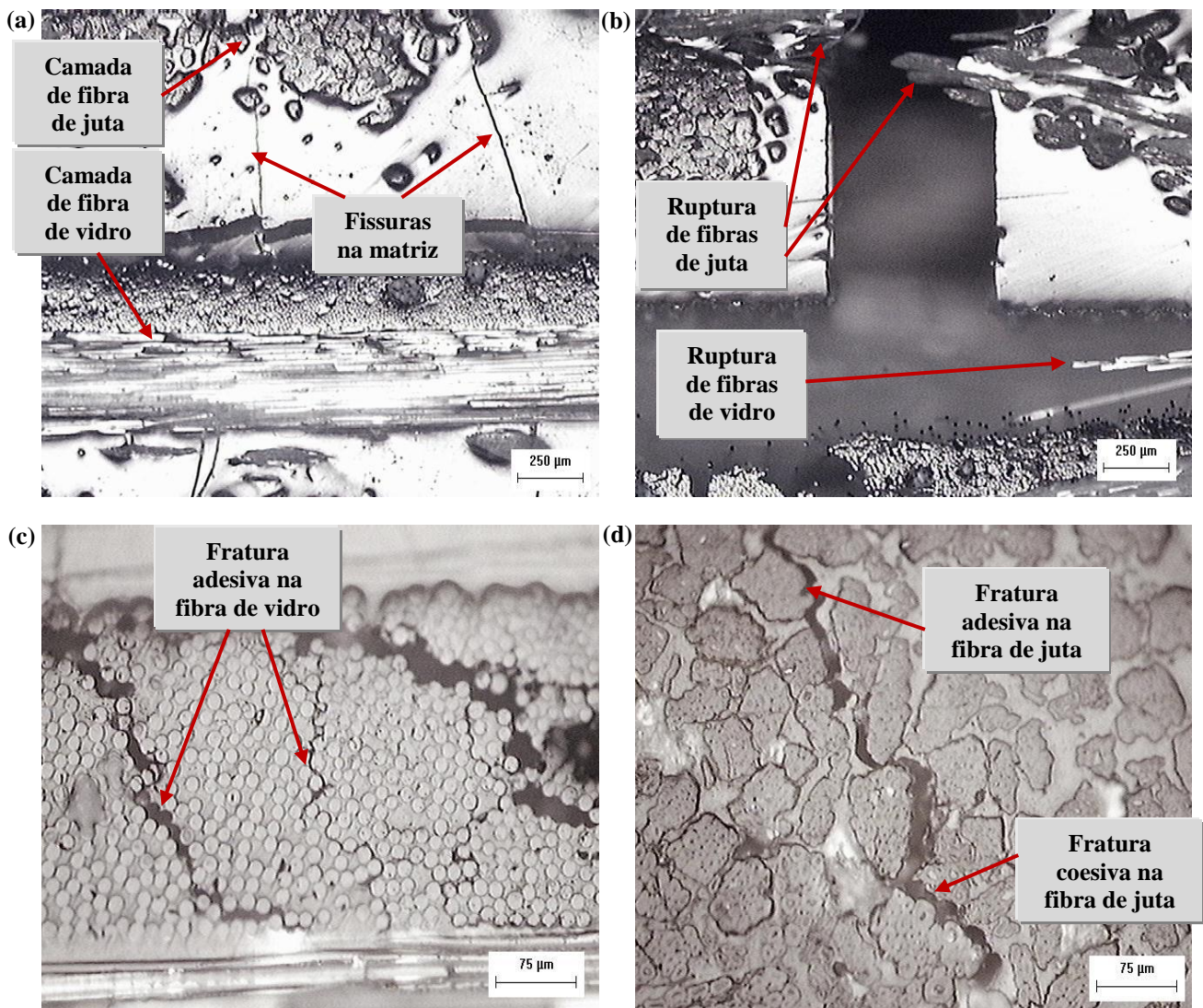


Figura 9. Características de fratura na tração uniaxial para o laminado **CH**: (a) fissuração na matriz, (b) ruptura de fibras, (c) fratura adesiva, (d) fratura adesiva e coesiva.

Devido à diferença de propriedades entre as fibras de vidro e de juta, pode-se dizer que esta configuração idealizada não acarretou em grandes problemas na resposta final de fratura para o laminado **CH**, visto que não ocorreram delaminações entre as camadas do laminado compósito.

Com relação à análise microscópica do **CHD**, foram observadas várias características de dano em comum com o **CH**, como a presença de microfissuras transversais à aplicação da carga originando a fratura adesiva (desaderência fibra-matriz) e coesiva na matriz e nas fibras. Pode-se, também, comprovar a presença da delaminação entre as camadas de fibras de vidro e fibras de juta, originando um total “isolamento” da camada de fibra de vidro já próximo à região de fratura final. Verificou-se também, a não existência de delaminação entre as camadas de juta a $0/90^\circ$ e a $\pm 45^\circ$. A Figura (10) traz alguns destes danos observados para o laminado **CHD**.

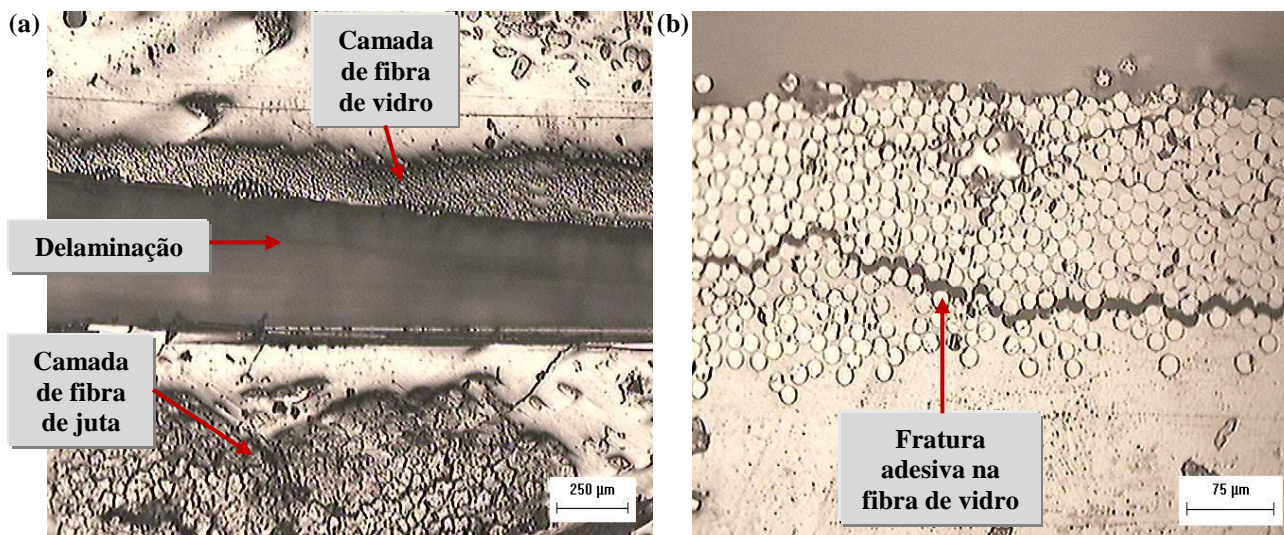


Figura 10. (a) fissurações transversais na matriz e delaminação, (b) fratura adesiva. Tração uniaxial.

Na imagem mostrada na Fig. (11) obtida no MEV para o laminado **CHD**, características da fratura como a presença de ruptura das fibras de vidro e de juta podem ser observadas. Esta característica torna-se mais intensa principalmente na região mais próxima ao furo.

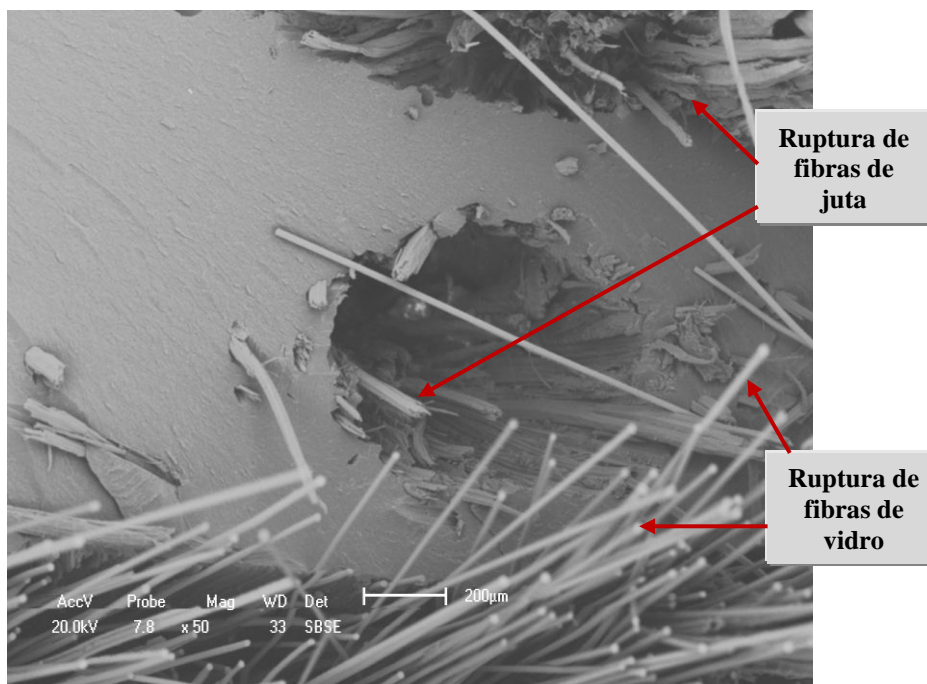


Figura 11. Ruptura de fibras de vidro e de juta no laminado **CHD**.

Assim como em Silva et al. (2004) é importante salientar que as fissurações foram mais intensas sempre na camada de fibra de vidro e que se propagam em toda extensão da matriz até atingir a camada de fibra de juta, como observado na Fig. (12).

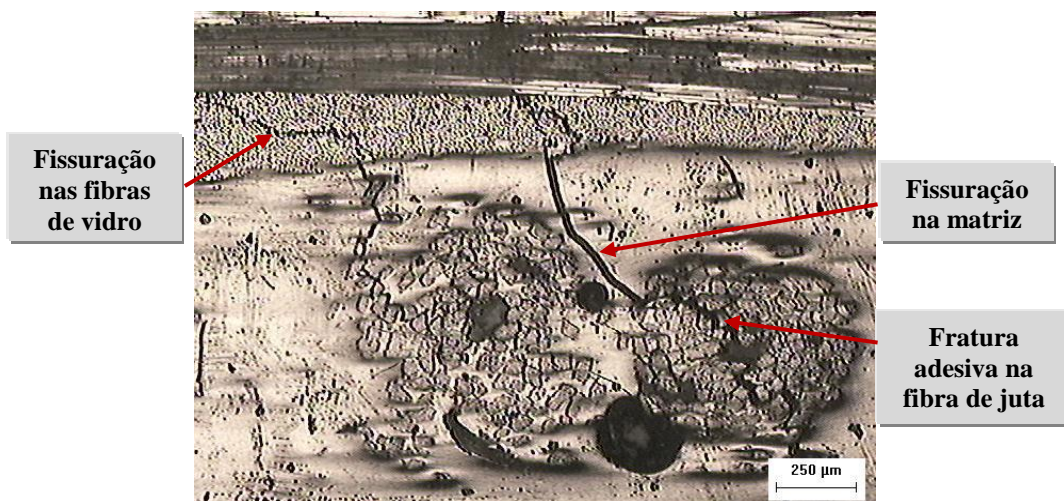


Figura 12. Ruptura de fibras de vidro e de juta no laminado CHD.

3.3. Influência da presença do furo na fratura para os laminados CV e CH

A presença do furo concêntrico para o laminado CV não mudou de forma significativa a característica final de fratura, apenas concentrou as mesmas na região próxima ao furo, como pode ser observado na Fig. (3), onde as fissurações na matriz localizam-se menos espaçadas, na região do furo, devido o efeito da concentração de tensão.

Já para o laminado CH, a presença do furo, levou a uma debilidade entre as camadas de vidro/juta, devido à ocorrência da presença da delaminação, possivelmente devido à concentração de tensão que acarretou discrepância entre as tensões interlaminares. Estas características são de suma importância na avaliação do laminado híbrido, pois mostram se há uma boa aderência entre as camadas de fibras de vidro e juta, afetada apenas na vizinhança do furo, apesar da forte discrepância entre as propriedades mecânicas destas. Neste sentido, ressalta-se a importância da configuração idealizada para o laminado híbrido.

3.4. Característica da fratura final - Comparativo

O esquema da Fig. (13) mostra de forma sucinta os tipos de fratura observados nos laminados estudados.

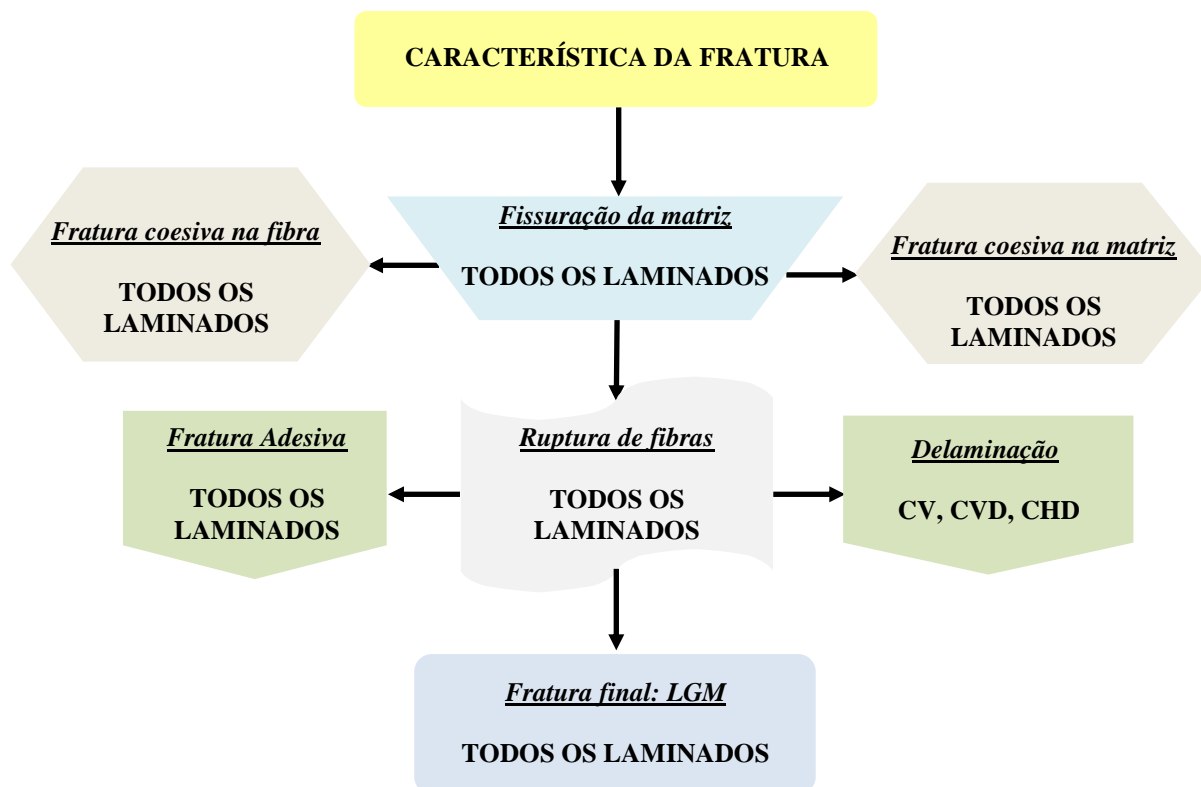


Figura 13. Comparativo das características da fratura dos laminados em estudo.

Pode-se dizer que com relação às configurações utilizadas não houve alterações significativas ao se comparar todos os laminados, ou seja, praticamente as mesmas características de fratura foram encontradas, salve a exceção para o laminado **CH** que não apresentou delaminação entre as camadas. Ressalva se faz com relação à presença de fibras contínuas na direção do carregamento (anisotropia) nestes laminados, que leva os mesmos a terem comportamentos semelhantes, apesar da região de fratura final ter sido mais localizada para o laminado híbrido.

O fenômeno do rasgamento (pull out) foi muito mais acentuado para o laminado a base de fibra de vidro, se comparado com o híbrido, certamente porque no híbrido ele aparece de forma acentuada apenas para a camada central de fibra de vidro. Isso ocorre devido à diferença de propriedades entre as fibras de vidro e juta.

4. CONCLUSÕES

- Quanto ao comportamento à fratura dos laminados **CH**, **CHD**, **CV** e **CVD**, de uma forma geral, apresentaram fratura final do tipo LGM;
- Na análise micrográfica do dano observou-se a presença de fraturas coesiva na matriz, na fibra e adesiva (interface fibra/matriz) para todos os laminados estudados, já a presença de delaminações (desaderência entre as camadas do laminado) ocorreu apenas nos laminados do tipo **CV**, **CVD** e **CHD**;
- As delaminações que ocorreram no laminado **CHD** foram apenas entre as camadas de fibra de vidro e de juta e próximo à região do furo devido ao fenômeno da concentração de tensão;
- O estado de saturação da matriz ocorre apenas para os laminados a base de fibra de vidro (**CV** e **CVD**), independentemente da presença do furo concêntrico, apenas de forma mais concentrada na seção do furo;
- De modo geral, dentro do estudo comparativo da característica da fratura entre as duas configurações, se pode ressaltar que a presença do furo foi mais significativa para o laminado híbrido. Isso leva a necessidade de melhorar a resistência interfacial vidro/juta quando em presença de furo concêntricos geométricas.

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, N° 2.
- Aquino, E.M.F.; Tinô, S.R.L., 2009, "Descontinuidade Geométrica nos Compósitos Poliméricos: Resposta Mecânica e Característica da Fratura", In: IX Congresso 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.
- 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, N° 18.
- Silva, C.D., Freire Júnior, R.C.S., Aquino, E.M.F., 2004, "Análise de Mecanismo de dano em Compósitos Híbridos, tipo sanduíche utilizando fibras naturais", XVI Congresso de Ciências e Engenharia de Materiais, Porto Alegre-RS, Anais, Vol. 1, 14p.
- Toubal, L., Karama, M., Lorrain, B., 2005, "Stress concentration in a circular hole in composite plate", *Composite Structures*, Vol. 68, pp. 31-36.
- Yang, F., Pitchumani, R., 2004, "Effects of interphase formation on the modulus and stress concentration factor of fiber-reinforced thermosetting-matrix composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 1437-1452.
- 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, N° 1.
- Zhao, J.H., Wang, X.F., Dharani, L.R., Wei, J., 2000, "Notch stress concentrations and failure characteristics in laminates with triple parallel notches", *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 2865-2872.

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 incluído no seu trabalho.

CENTER HOLES IN POLYMERIC COMPOSITES: INFLUENCE OF THE FRACTURE CHARACTERISTICS

Sérgio Renan Lopes Tinô, sergiorlt@yahoo.com.br¹

Raphael Siqueira Fontes, fontesrs@gmail.com¹

Eve Maria Freire de Aquino, eve@dem.ufrn.br¹

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

Abstract: *The presence of geometric discontinuity in the transversal section of structural elements in general always leads to certain characteristics of the fracture, an important factor in preventing the failure of these elements forward to most kinds of loadings. In the case of polymer composite laminates is expected the same behavior beyond the influence of reinforcement and its internal orientation in the layers. The aim of this research work is at a detailed study of the influence of the presence of center holes in relation the fracture characteristic in polymer composites laminates reinforced with both natural and synthetic fibers. The orientation of the fibers with respect to the direction of load application is also a parameter to be studied. The loading used was the uniaxial tensile. 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 fracture analysis was performed on two levels: macroscopic and microscopic analysis (optical and SEM). The results showed the influence of all parameters listed above in the final characteristic of the fracture.*

Keywords: *Polymer composites laminates, center hole, fracture.*