

Tema: Materiais Cerâmicos, Compósitos e Poliméricos

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE DELAMINAÇÃO EM MATERIAL COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO E RESINA EPÓXI*

Amanda Coutinho Campanatti¹
Gigliola Salerno²

Resumo

O objetivo desse trabalho é caracterizar o processo de delaminação, tanto em Modo I como em Modo II, de abertura de trinca. A densidade e porcentagem de fibra do compósito carbono-epóxi foram calculadas para caracterizar o compósito. O inserto, para simular o início da trinca, foi feito no processo de fabricação dos compósitos a fim de manter sua integridade. Pelo mesmo motivo o corte foi feito a jato d'água. Para caracterização da delaminação foram feitos ensaios de DCB (*Double-cantilever Beam*) e ENF (*End-notched Flexure*), segundo as normas ASTM D5528 e ASTM D790-10, sendo ambos realizados na máquina universal de ensaio MTS, capacidade de 250 kN. A fractografia em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi feita a fim de identificar os mecanismos de dano durante a propagação da trinca. Foi possível concluir a fabricação do compósito, bem como do inserto, é viável. Porém, houve aparecimento de bolhas, por causa da baixa pressão da bomba a vácuo. O corte a jato d'água manteve a integridade do compósito. A rigidez alta do compósito pode ser comprovada por meio das propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração. Os valores de G_{IC} e G_{IIC} estão dentro do esperado pela literatura, sendo G_{IIC} maior que G_{IC} por causa da presença de um capo de compressão no ensaio em modo II, enquanto que em modo I é abertura pura por tração.

Palavras-chave: Delaminação; Compósito; Fibra de carbono.

CARBON EPOXY COMPOSITE MATERIAL EXPERIMENTAL DELAMINATION

Abstract

The main purpose of this study is the delamination characterization in Modes I and II. Density and fibre quantity were identified in order to define the carbon epoxy composite material. The initial delamination, using a bag insert, was done during the cure processing. After that, the water jet cutting applied to maintain the dimensions following ASTM standards and structural integrity, provoking no defects in the boundaries. DCB (*Double-cantilever Beam*) and ENF (*End-notched Flexure*) tests, according ASTM D5528 and ASTM D790-10, run in MTS 250 kN Universal Testing Machine. Scanning Electronic Microscopy demonstrated the damages involved during delamination process. Besides proved that the manual processing provoked many air bubbles, which could increase damage. Modes I and II critical fracture energies (G_{IC} and G_{IIC}) are characterized, following the standards, these values are compatible with the literature, therefore the delamination initial energy are identified.

Keywords: Delamination; Composites; Carbon-epoxy.

¹ Engenharia de Materiais, estudante, Departamento de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil.

² Engenharia Mecânica, Dra., Professora, Departamento de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos laminados são muito utilizados nas indústrias aeronáutica e aeroespacial. São altamente resistentes e mais leves que as ligas de alumínio usadas atualmente, permitindo a redução da quantidade de material utilizado, no consumo de combustível e na manutenção. Isso acontece em função da resistência e rigidez específicas dos compósitos, que podem ser cinco vezes maiores do que as do alumínio. Porém, estes materiais apresentam, entre outros mecanismos de danos, a delaminação, que é considerado o mecanismo mais preocupante, pois, além de ser subsuperficial, promove a fratura catastrófica [1-3].

Para análise de delaminação de materiais compósitos laminados, o parâmetro mais importante a ser determinado é a energia crítica de fratura (G_C), que é a energia necessária para iniciar a trinca. Para esses ensaios, é feita uma trinca artificial que define como será a propagação. Os testes são executados em função do tipo, ou modos, de abertura da trinca conforme Figura 1 [1,4].

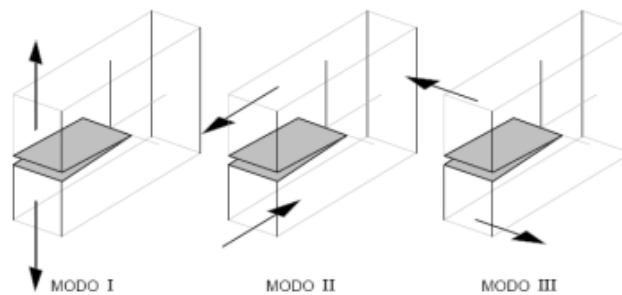


Figura 1. Modos de abertura da trinca.

No presente trabalho, somente serão caracterizados os processos de delaminação em Modo I e II, sendo os testes para essa caracterização, DCB (*Double-cantilever Beam*) para o Modo I e o ENF (*End-notched Flexure*) para o Modo II, pois considera-se que o Modo III é aproximadamente igual ao Modo II.

1.1 DCB (Double-cantilever Beam)

De acordo com Chai [4], o Modo I é o responsável por ampliar o efeito de delaminação. O cálculo do G_{IC} está representado pela Equação 1, sendo necessário ter o conhecimento da compliância (Equação 2) [4,5].

$$G_{IC} = \frac{n}{2b} \frac{kP^2 a^n}{a} \quad (1)$$

$$C = \frac{\delta}{P} = k \cdot a^n \quad (2)$$

Chai [4] realizou ensaios em compósito de epóxi e fibra de carbono multidirecional a fim de estudar o Modo I de delaminação. O corpo de prova utilizado por ele tinha uma trinca inicial de 50 mm, taxa de abertura de 1,3 mm/min e lâminas com orientações de 0°/0°, 45°/-45° e 90°/90°, variando dimensões e utilizando diferentes resinas epóxis. Os valores médios de G_{IC} encontrados foram de 129,84, 123, 99 e 138 N/m para as orientações de 0°/0°, 45°/-45° e 90°/90°, respectivamente. O fato de os valores serem inferiores a outros trabalhos, como Salerno [5] e Gill *et al.* [6], se dá pela falta de agente de compatibilização, como o Silano [4]. Gill *et al.* [6]

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

realizou seu trabalho variando a porcentagem de fibra de carbono entre 51,1%, 54,4% e 61,3%. Os G_{IIC} por ele encontrados foram de 430, 525 e 741 J/m², sendo que os ensaios foram realizados segundo norma ASTM D5528 [7]. O autor observou que há dois comportamentos na curva de resistência à delaminação, sendo que no primeiro, a energia de abertura de trinca diminui com o crescimento da trinca e o segundo onde aumenta, que é explicado pela propagação da trinca no sentido transversal da abertura de trinca (Modo II). Salerno [5] obteve um valor de 239±22 para lâminas 0°/0° e 687±88 J/m² para 0°/90° utilizando um compósito unidirecional. Esse tipo de compósito apresenta poucos entrelaçamentos entre as fibras, diminuindo a resistência à delaminação. Porém, não existe o cisalhamento entre as próprias fibras, como em tecidos.

1.2 ENF (End-notched Flexure)

A Figura 2 é uma representação do ensaio de ENF com alguns parâmetros, sendo a o tamanho da trinca inicial, b a largura do corpo e prova e c a espessura.

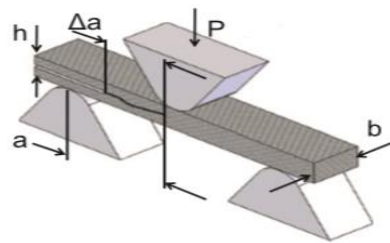


Figura 2. Representação do ensaio de delaminação [8].

Para cálculos do G_{IIC} é utilizada a teoria clássica de vigas (*classic beam theory*), representada pela Equação 3 [8,5].

$$G_{IIC} = \frac{9P^2a^2}{16Eb^2h^3} \quad (3)$$

em que E é o módulo de flexão e h é a meia altura do compósito. A Equação 4 representa o cálculo da compliância, sendo que L é a metade do comprimento do *span* [5].

$$C = \frac{2L^3 + 3a^3}{8Ebh^3} \quad (4)$$

Sela *et al.* [9] realizou uma pesquisa sobre um compósito de fibra de carbono com matriz epóxi, o valor obtido no ensaio ENF foi de 518 J/m² com aproximadamente 50% de fibra de carbono. Salerno [5] obteve um valor de 837±235 J/m² no compósito unidirecional 0°/90°, que é um valor alto, pois compósitos unidirecionais não sofrem ação de cisalhamento devido ao entrelaçamento das fibras por causa da configuração em tecido.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a preparação dos corpos de provas, o tecido de fibra de carbono foi silanizado, com o intuito de melhorar a aderência entre a fibra e a matriz. Subsequentemente, os compósitos foram montados com 10 lâminas 0°/90° introduzindo um inserto de plástico bag (Figura 3b) na quinta com a sexta lâmina. A cura da resina foi feita a

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

vácuo por uma hora a 120°C na estufa Fanem (Figura 3a). O corte a jato d'água promoveu a precisão das dimensões e integridade na lateral do compósito.

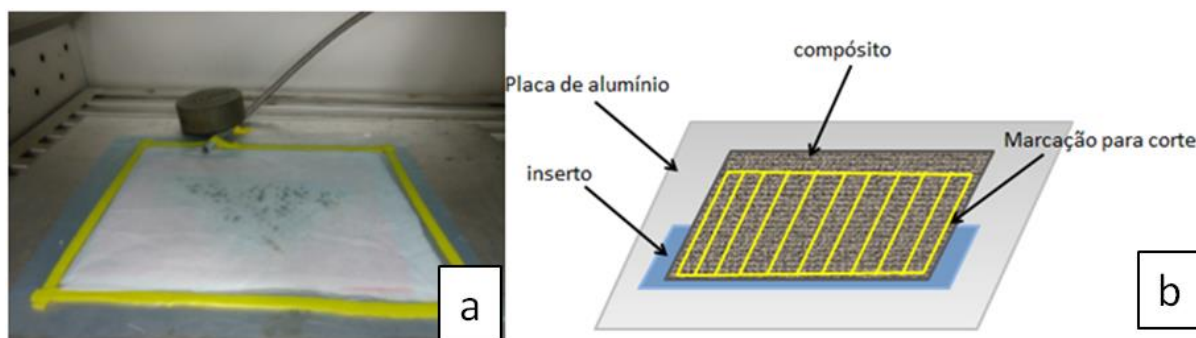


Figura 3. (a) material compósito na estufa. (b) placa de compósito para corte.

Para o cálculo da densidade do compósito, foi cortado 1 cm² do compósito, medida sua espessura e massa. Para determinar a porcentagem de fibra de carbono (%F.C.), foi utilizada a massa anterior em recipiente cerâmico; após 1 hora a 500°C, a resina evaporou e permaneceram somente as fibras.

2.1 DCB (*Double-cantilever Beam*)

O corpo de prova DCB consiste em uma amostra de espessura retangular e uniforme, de um compósito laminado contendo um inserto não adesivo no plano médio da espessura que atua como uma trinca inicial (delaminação). Forças de abertura são aplicadas na amostra através dos blocos que estão colados na extremidade da amostra, Figura 4, causando a separação das camadas. As dimensões dos corpos de prova (Figura 4) foram obtidas pela a norma ASTM D5528 [7] sendo a espessura (h) e o comprimento da trinca inicial (a₀) calculadas para valores de $a \leq 63\text{mm}$ e $h \geq 3\text{ mm}$ (considerando G_{IC} e E_{11} , respectivamente, 239 J/m² e 20 GPa [5,10]). Foram utilizados oito corpos de prova. Foram feitas marcas a cada 1 mm, a fim de medir o deslocamento da trinca. Os blocos foram fixados na amostra (com uma cola epóxi de cura a frio) e na máquina de forma a deixar a amostra alinhada e centralizada. A Figura 5 mostra um corpo de prova pronto para ensaio.

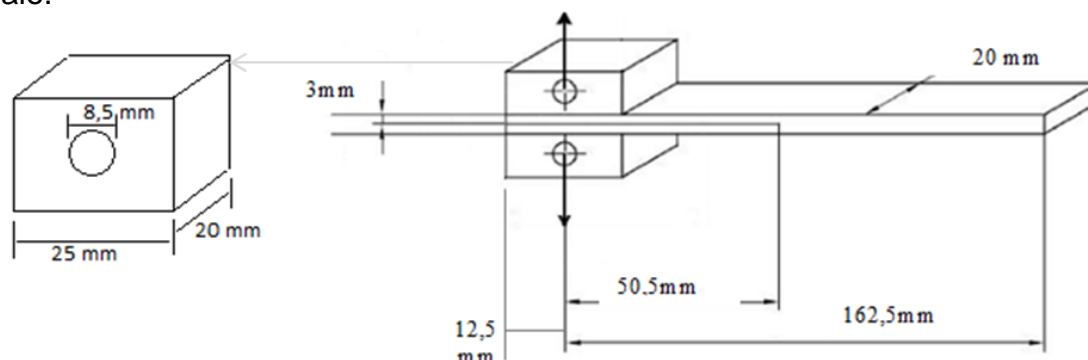


Figura 4. Desenho esquemático do bloco e do corpo de prova usados para o ensaio e DCB, bem como suas dimensões.

Para esse trabalho foi utilizada uma velocidade constante de 2 mm/min com o objetivo de garantir que a delaminação ocorra sem a ruptura do compósito, na máquina universal de ensaios MTS com capacidade de 250 kN. Para o cálculo do

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

G_{IC} , deve-se utilizar o ponto de instabilidade do gráfico Força x deslocamento, ou seja, o ponto onde se perde a linearidade dessa relação. Para determinar as constantes n e k , foi feito o gráfico do log da compliância (Equação 2) pelo log do comprimento de trinca (imagens capturadas durante o ensaio), sendo n o coeficiente da reta e o k a constante da equação de reta. Com os valores de força, deslocamento, abertura da trinca e os coeficientes n e k , é possível fazer o cálculo do G_{IC} de acordo com Equação 1.



Figura 5. Corpo de prova pronto para ensaio DCB.

2.2 ENF (End Notch Flexure)

A norma ASTM D790-10 [11] determina as dimensões das amostras de acordo com a Figura 6. Para o cálculo da trinca inicial a deve-se buscar a estabilidade do teste, sendo essa relação $0,37 < (a/l) < 1$, onde a e l são, respectivamente o comprimento da trinca e do *span*. A relação entre *span* e espessura é de 32:1 no caso de compósitos reforçados de alta resistência [11]. Sendo a espessura 3,2 mm, o *span* foi de aproximadamente 102 mm. Dessa forma, $37,74 \text{ mm} < a < 102 \text{ mm}$. Para o ensaio, a trinca escolhida foi de 41 mm. Os pinos de apoio e de carga são de diâmetro igual a 15,8 mm. A velocidade utilizada no ensaio foi de 2mm/s. Foi utilizado o equipamento Instron de capacidade máxima de 30 kN, conectado a um software para obter a curva carga x deflexão, sendo a delaminação obtida por meio de fotos tiradas sincronizadamente ao ensaio. A Figura 7 mostra configuração do ensaio. Para o cálculo do G_{IIC} , foi utilizada a Equação 3 sendo que a força e a abertura de trinca utilizadas devem ser as do ponto de instabilidade da trinca, ou seja, a perda da linearidade entre a força e o deslocamento.

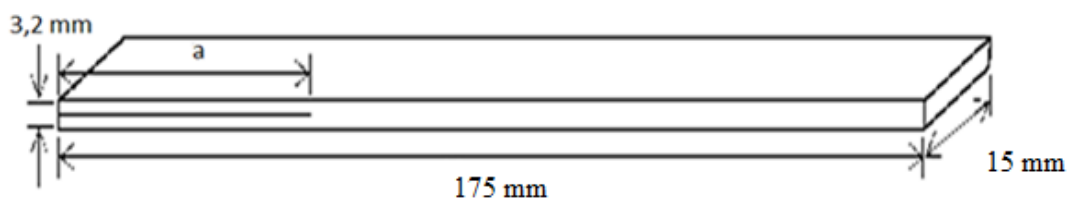


Figura 6. Dimensão da amostra ENF.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Figura 7. Equipamento preparado para ensaio ENF.

2.3 Ensaio de Tração

Foi realizado ensaio de tração para obtenção do módulo elástico (E), coeficiente de Poisson (ν_{xy}), módulo de rigidez (G_{xy}) e resistência à ruptura (σ_r). Foram preparados corpos de prova com as dimensões apresentadas na Figura 8. O ensaio foi realizado na MTS, segundo norma ASTM D3039 [12], com velocidade de 5 mm/s. Foram posicionados *straingages* bidirecionais PA-06-125TG-350L no centro do corpo de prova para leitura da deformação longitudinal (ϵ_l) e deformação transversal (ϵ_t). Foram colados *tabs* de apoio nas extremidades para a proteção do corpo de prova à pressão da garra (6 MPa). O coeficiente de Poisson e o Módulo de Cisalhamento são obtidos para o plano xy , pois neste o material é isotrópico.

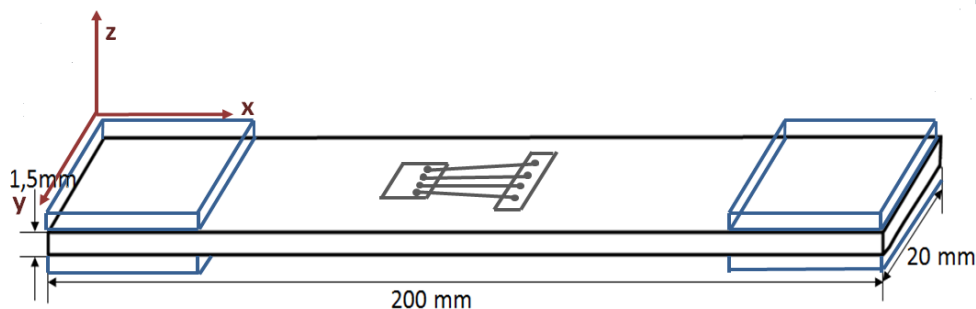


Figura 8. Dimensões dos corpos de prova de tração em preto, *tabs* de apoio em azul e *straingage* em cinza.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 9 mostra a extremidade do compósito cortado. Pode-se observar que o compósito não apresenta nenhum dano nas extremidades, como delaminações, arrancamento de fibras, entre outros. Outro fato importante é que as dimensões estão precisas, atendendo as especificações das normas ASTM D5528 [7] e ASTM D790-10 [11]. Pode-se notar que o processo de fabricação do inserto utilizando o *bag* mantém a integridade do compósito, garantindo a trinca inicial.



Figura 9. Amostra após corte a jato d'água. Inserto obtido na preparação do compósito.

A densidade e de porcentagem de fibra de carbono foram, respectivamente, $2,2 \text{ g/cm}^3$ e 57,75%F.C. Fato que demonstra que o compósito tem grande

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

quantidade de fibra de carbono caracterizando-o como rígido em relação a matriz termofixa.

A Figura 10 apresenta o gráfico de tensão x deformação dos ensaios de tração. Pode-se caracterizar os valores de módulo elástico (E), Poisson (ν), módulo de rigidez (G) e resistência à ruptura (σ_r), Tabela 1. Adicionalmente, o compósito apresenta pouca deformação plástica, evidenciando que se trata de um material rígido e frágil, com comportamento elástico linear, sem escoamento definido. O módulo elástico de 36,9 GPa comprova que o compósito tem elevada rigidez.

Tabela 1. Valores das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração

	E (GPa)	σ_r (MPa)	ν_{xy}	G_{xy} (GPa)
média	36,9	244,7	0,081	31,8
desvio padrão	3,1	33,8	0,036	3,4

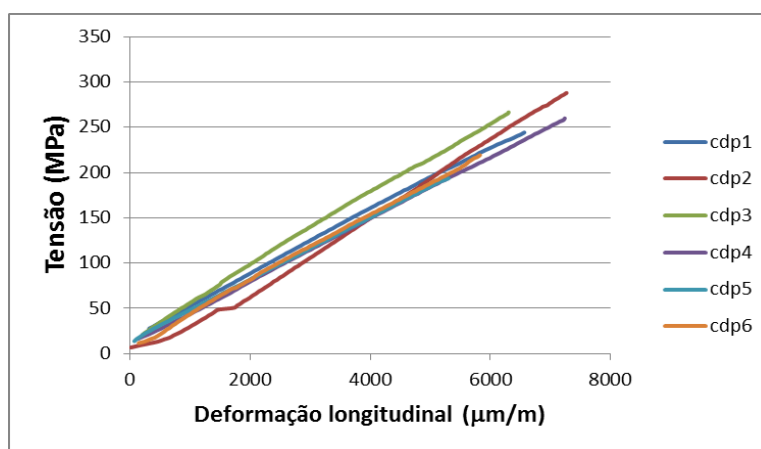


Figura 10. Gráfico Tensão x Deformação longitudinal.

3.1 ENF (End-notched Flexure)

A Figura 11 apresenta os gráficos de força por deslocamento obtidos no ensaio ENF. O início da propagação da trinca é dado pela falta da linearidade no gráfico (instabilidade proporcionada pela trinca). Observa-se que existe o comportamento linear no início do carregamento, seguido da instabilidade, caracterizando o início da propagação da trinca. Após este estágio, pode-se notar uma pequena propagação da trinca, porém insuficiente para a caracterização mecânica (Figura 12). Esse fato ocorre devido aos campos de compressão causados pela aplicação de carga durante a flexão do material, que na ponta da trinca dificulta sua abertura.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

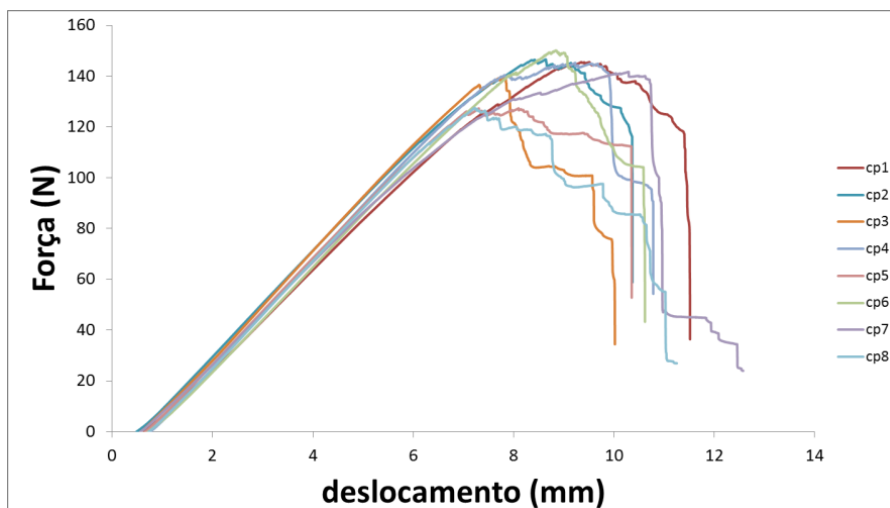


Figura 11. Gráfico Força x deslocamento obtida no ensaio ENF.

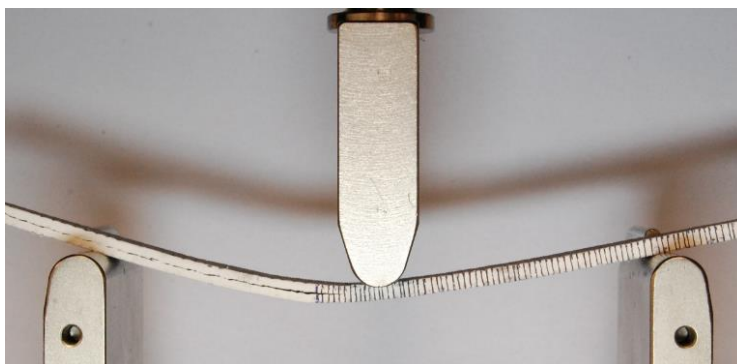


Figura 12. Propagação da trinca (4mm) do corpo de prova 1, apresentando o comportamento de insuficiente delaminação para estudo da propagação da fratura.

A Tabela 2 apresenta os valores da força necessária para iniciar a propagação da trinca, bem como os resultados de energia crítica. Adicionalmente, estão apresentados o valor médio de G_{IIC} e o desvio padrão (Equação 3). O valor da energia crítica necessária para propagar a trinca em Modo II é de $770,72 \text{ J/m}^2$, valor esperado quando comparado com os resultados obtidos por Sela *et al* [9], 518 J/m^2 para 50%F.C., enquanto que o compósito estudado neste trabalho possui 57%. Esse fator aumenta a rigidez do compósito o que fez com que o resultado obtido seja maior. Salerno [5] obteve um valor de $837 \pm 235 \text{ J/m}^2$ no compósito unidirecional $0^\circ/90^\circ$, que é um resultado superior ao obtido de $770,72 \text{ J/m}^2$, pois no compósito com reforço em tecido há cisalhamento entre as fibras horizontais com as fibras verticais, fazendo, portanto, com que o valor de G_{IIC} possa ser menor em compósitos reforçados com tecido do que nos unidirecionais.

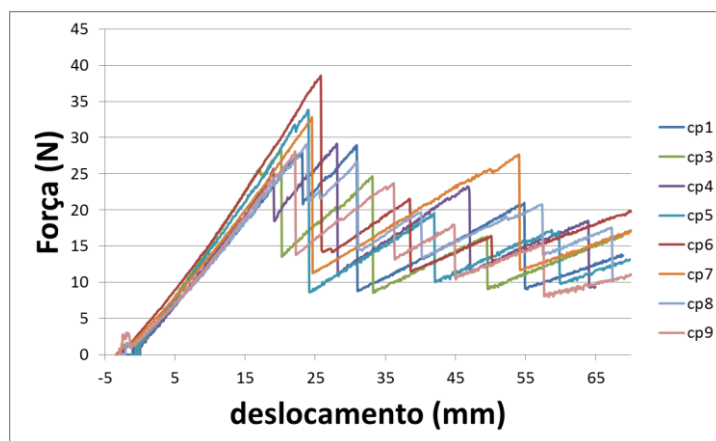
* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 2. Dados de G_{IIC}

cp	P_{crit} (N)	G_{IIC} (J/m ²)
1	128,544	587,8541
2	205,1716	1497,6157
3	144,2418	740,1984
4	139,4389	691,7255
5	136,2219	660,1761
6	141,7999	715,3486
7	125,9194	564,0936
8	141,145	708,7562
G_{IIC} total (J/m²)		770,72
desvio padrão		300,19

3.2 DCB (Double-cantilever Beam)

A Figura 13 mostra as curvas dos oito corpos de prova ensaiados. É possível observar que possuem o mesmo comportamento em relação ao ensaio, podendo assim caracterizar G_{IIC} . A Figura 14 mostra o início e o final do ensaio do corpo de prova 4, demonstrando a propagação da trinca. Apesar de haver regiões onde a trinca propaga rapidamente (onde existe uma queda brusca de força), o compósito retorna à estabilidade na propagação. Isso significa que ainda não foi atingido um comprimento de trinca necessário que promova a propagação catastrófica, promovendo a completa ruptura do compósito. Os ensaios foram realizados com velocidade de abertura de 2 mm/s segundo norma ASTM D5528 [7].

**Figura 13.** Curvas Força x deslocamento para os quatro corpos de prova obtida pelo ensaio DCB.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

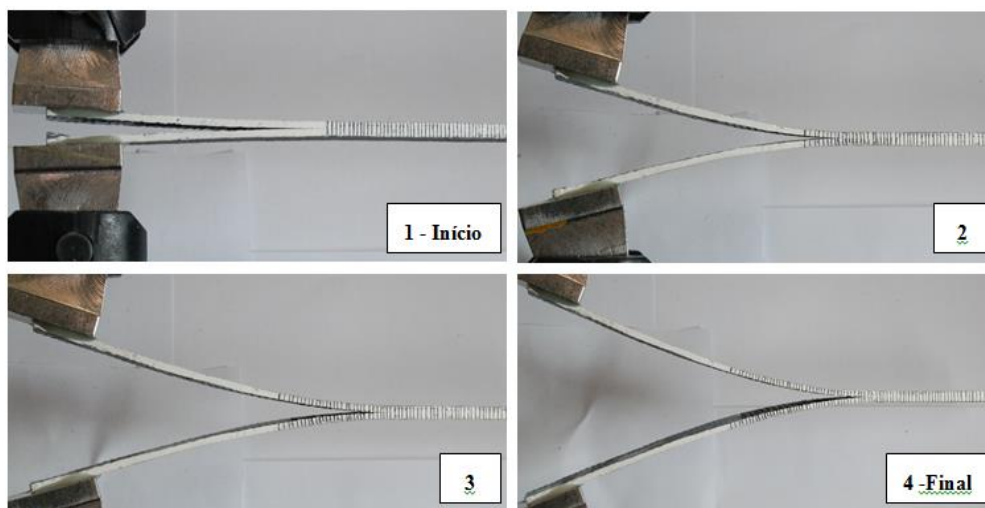


Figura 14. Imagens do corpo de prova 4, enfatizando o comprimento de propagação da trinca.

A Figura 15 mostra os gráficos do logaritmo da Compliância pelo logaritmo do comprimento de trinca para a obtenção dos coeficientes n e k dos oito corpos de prova, que estão apresentados na Tabela 3, bem como os valores de força e G_{IC} .

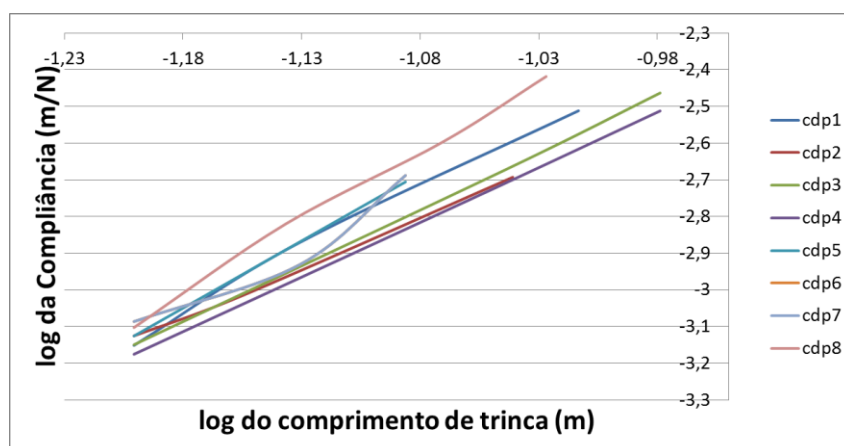


Figura 15. Gráfico log Compliância x log comprimento de trinca.

Tabela 3. valores obtidos de n e k , força e G_{IC}

cdp	n	k	P (N)	G_{IC} (J/m ²)
1	2,566	0,940	27,854	468,431
2	3,375	2,567	28,552	492,202
3	2,732	1,407	25,290	386,160
4	3,084	3,568	33,798	689,687
5	2,987	2,576	37,862	865,520
6	3,021	2,012	32,071	621,005
7	3,368	2,123	28,367	485,844
8	3,017	1,791	27,581	459,293
média	3,019	2,123	30,172	558,518
desvio padrão ±	0,329	0,804	4,100	157,075

O valor obtido de G_{IC} é esperado de acordo com a literatura, em Gill *et al* [6], para um compósito com 54,4%F.C., obteve um valor de 525 J/m². Valor inferior aos encontrados no ensaio ENF, na Tabela 2. Esse fato é devido a existência do campo de compressão no ENF, enquanto que no DCB se trata de tração direta, o que

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

facilita significativamente a abertura da trinca, propagando-a com maior facilidade, fato esse comprovado quando se observa o comprimento de propagação da trinca dos corpos de prova dos ensaios DCB e ENF.

A Figura 16 apresenta o comportamento da energia de abertura de trinca em função do crescimento da trinca. Observa-se dois comportamentos diferentes, sendo um que a energia de abertura de trinca diminui com o crescimento da trinca e o segundo em que o G_I aumenta com o crescimento da trinca, semelhante ao comportamento apresentado por Gill *et al* [6]. De acordo com Gill *et al* [6], a trinca que se propaga na direção transversal à abertura de trinca, tem um aumento de 60% da força necessária para propagar a trinca na direção da abertura. Isso pode ser observado nas imagens feitas por MEV. A Figura 17a apresenta a imagem de MEV feita para o corpo de prova 4, onde de acordo com a Figura 16, observa-se a diminuição da energia de abertura de trinca com o crescimento da trinca. As marcas de fratura na matriz epóxi mostram que o sentido da propagação da trinca é o mesmo do sentido de abertura da trinca. Na Figura 17b, onde mostra o corpo de prova 1, no qual G_I aumenta conforme ocorre o crescimento da trinca, pode-se observar que em algumas regiões existem marcas de propagação no sentido transversal a abertura de trinca, no qual a propagação transversal pode acontecer por que a energia necessária para atravessar uma fibra na transversal é maior do que acompanhar a direção dessa fibra [6]. Esse comportamento está apresentado na Figura 17b onde a mudança da direção da propagação está exatamente no entrelaçamento das fibras, ou seja, onde há a mudança de direção.

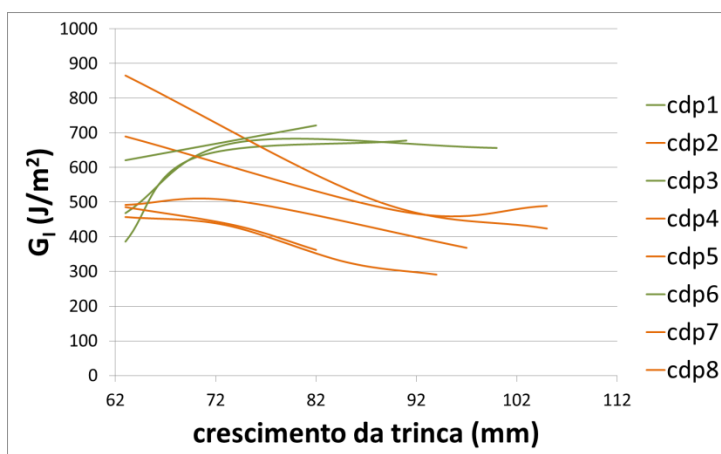


Figura 16. Gráfico G_I x crescimento da trinca mostrando os dois comportamentos obtidos.

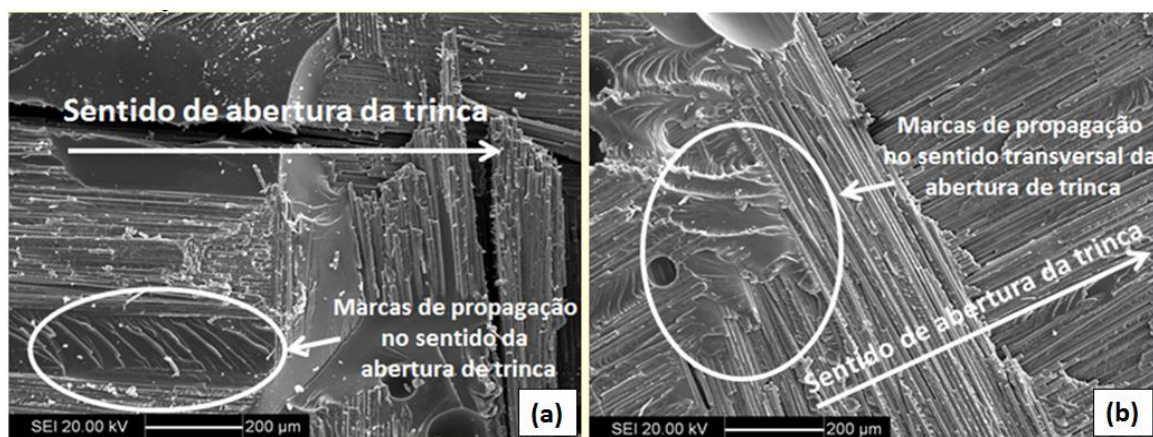


Figura 17. Imagem de MEV do corpo de prova 1(a) e 4 (b), enfatizando as marcas de propagação.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

A Figura 18a mostra uma imagem de MEV da região do final do inserto e começo da fratura. É possível observar a planicidade da matriz na região do inserto, enquanto que a região da fratura há arrancamento da fibra, ruptura da matriz, entre outras. Demonstra que a fabricação do inserto atendeu a descrição da norma. Adicionalmente, observa-se existência de bolhas na superfície da fratura do compósito que mostra que a fabricação manual do compósito não foi apropriada, podendo levar a danos. O fato de essas bolhas existirem pode estar relacionado com a pressão insuficiente gerada pela bomba de vácuo, fazendo com que nem todo ar seja eliminado no momento da cura. Na Figura 18b é possível observar que além da fratura da matriz e da delaminação, há fratura das fibras e descolamento da fibra em relação à matriz durante a delaminação.

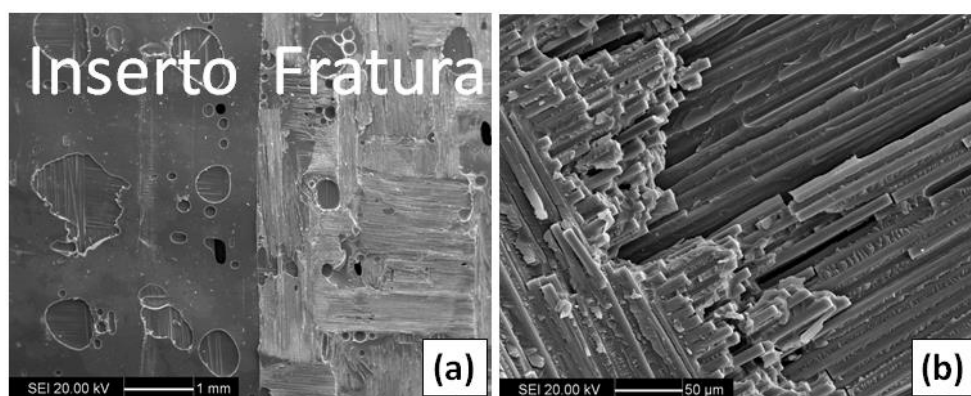


Figura 21. Imagem de MEV enfatizando o final do inserto (a) e fratura das fibras.

4 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que é viável a fabricação desse compósito, inclusive com o inserto. Porém, a presença de bolhas no compósito mostra que houve falha na preparação, devido a baixa pressão da bomba de vácuo. O corte com o jato d'água foi eficiente para manter a integridade das extremidades mantendo boa qualidade dimensional, sem introduzir defeitos.

O inserto atendeu perfeitamente as exigências da pré-trinca sem danificar ou contaminar o material e evitou a aderência entre as superfícies de cada braço de material compósito.

A densidade do compósito, bem como a porcentagem de fibra, levam o compósito a apresentar um comportamento rígido. Comportamento esse verificado pelas propriedades obtidas em tração e por MEV, onde se observa propagação frágil da trinca.

Os valores de G_{Ic} (558,528 J/m²) e G_{IIc} (770,72 J/m²) obtidos estão dentro do esperado pela literatura. O fato de a energia necessária para iniciar a propagação da trinca em Modo II ser maior do que Modo I é por que, na flexão existe um campo de compressão, enquanto que no Modo I se trata de uma abertura pura por tração. Esse fator faz com que o comprimento de propagação da trinca em Modo II seja significativamente menor do que Modo I, dificultando a caracterização da propagação da fratura. A curva de resistência à delaminação apresenta dois comportamentos de energia de abertura de trinca, sendo que o primeiro diminui enquanto aumenta o comprimento da trinca e o segundo diminui.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Agradecimentos

Ao Centro Universitário da FEI, à Prof^a Dra. Gigliola Salerno, ao Prof^o. Msc. Willian Naville pelo auxílio nos ensaios e na utilização da máquina universal de ensaios, à Prof^a Dra. Daniella Caluscio pela colaboração e auxílio nas análises por microscopia eletrônica de varredura e aos técnicos do Laboratório de Materiais (LabMat-FEI).

REFERÊNCIAS

- 1 Cândido GM, Rezende MC, Donadon MV, Almeida SFM. Fractografia de compósito estrutural aeronáutico submetido à caracterização de tenacidade à fratura interlaminar em Modo I. Polímeros. 2012; 22(1). <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282012005000019>
- 2 Rezende MC, Costa ML, Botelho EC. Compósitos estruturais. Tecnologia e Prática. São Paulo: Artliber; 2011.
- 3 Choi NS, Kinloch AJ, Willians JG. Delamination fracture of multidirectional carbon-fiber/epoxy composite under Mode I, Mode II and mixed-Mode I/II loading. Journal of Composite Materials. 1999;33(1):73-100.
- 4 Chai H. The characterization of Mode I delamination failure in nonwoven, multidirectional laminates. Composites. 1984;5(4):277-290.
- 5 Salerno G. Damage analysis of composite laminates subject to low velocity impacts. [dissertação de doutorado em Engenharia estrutural]. Milão: Doctoral School in Structural, Politecnico di Milano; 2009.
- 6 Gill AF, Robinson P, Pinho S. Effect of variation in fibre volume fraction on modes I e II delamination behaviour of 5HS woven composites. Composites science and technology. 2009;69(14):2368-2375.
- 7 American Society for Testing and Materials. ASTM D5528: Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. Standard D. 20017:5528-01.
- 8 Pankow M, Salvi A, Waas AM, Yen CF, Ghiorse S. Resistance to delamination of 3D woven textile composites evaluated using End Notch Flexure (ENF) tests: experimental results. In: Composites, p. 1463-1476, 2011. Ed: Elsevier Ltda.
- 9 Sela N, Ishai O. Interlaminar fracture toughness and toughening of laminated composite materials: a review. Composites, 1999; 20.
- 10 Rossini MB. Caracterização das propriedades elásticas de um material compósito laminado. 2012. f. 73. Dissertação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2012.
- 11 ASTM D790. American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Standard D, 790-10, 2010.
- 12 ASTM D3039. American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Standard D, 3039, 2008.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.