

## **Análise fractográfica do modo de falha de compósitos carbono/epóxi**

Franco, L.A.L.<sup>I</sup>; Botelho, E.C.<sup>II</sup>; Cândido, G.M.<sup>III</sup>; Rezende, M.C.<sup>I</sup>

<sup>I</sup>Divisão de Materiais - Instituto de Aeronáutica e Espaço/Centro Técnico Aeroespacial - Praça Mal-do-Ar Eduardo Gomes,50, 12228-906, São José dos Campos, SP.

e-mail: [leandro@iae.cta.br](mailto:leandro@iae.cta.br), [mirarezende@iae.cta.br](mailto:mirarezende@iae.cta.br)

<sup>II</sup>Depto de Materiais e Tecnologia, UNESP – Guaratinguetá - Rua Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá, SP.

e-mail: [ebotelho@pq.cnpq.br](mailto:ebotelho@pq.cnpq.br)

<sup>III</sup>Divisão de Homologação Aeronáutica/IFI/CTA - Praça Mal-do-Ar Eduardo Gomes, 50, 12228-906, São José dos Campos, SP.

e-mail: [geraldo@ifi.cta.br](mailto:geraldo@ifi.cta.br)

---

### **RESUMO**

A utilização de compósitos poliméricos na fabricação de aeronaves vem sendo cada vez mais intensa. Em função disso, a possibilidade de ocorrer falhas em serviço de um componente fabricado em compósito polimérico torna-se cada vez maior. A análise de falhas de materiais compósitos ainda é um tema pouco explorado, principalmente no Brasil, porém vem tornando-se cada vez mais importante em apoio à área de prevenção e investigação de acidentes aeronáuticos. Este trabalho teve como objetivo a caracterização de fraturas em laminados unidirecionais de fibra de carbono de módulo intermediário com sistema de resina epóxi modificada, tipo 8552, em resistência ao cisalhamento interlaminar nas condições ambiente e saturado de umidade em câmara higrotérmica. A análise fractográfica no plano de falha dos laminados foi realizada por microscopias óptica e eletrônica de varredura. A comparação dos resultados mostrou que o condicionamento higrotérmico afetou significativamente a região de interface da resina sem alterar a adesão interfacial fibra/resina. Os aspectos de fratura presentes na região de resina, como cristas de galo e escarpas, e do reforço foram detalhados, podendo-se assim estabelecer a direção de propagação da trinca e caracterizar o modo de falha, por ser do tipo misto (arrancamento e cisalhamento simultaneamente).

**Palavras-chaves:** fractografia, análise de falhas, compósitos, cisalhamento interlaminar, condicionamento ambiental.

---

## **Failure mode fractographic evaluation of carbon/epoxy composites**

### **ABSTRACT**

The use of polymeric composites in aircraft fabrication has been more and more intense. As a function of this fact, the possibility to occur service failures in components produced by using polymeric composites has increased more and more. The failure analyses in composite materials is still not much explored, principally in Brazil, but it has been very important in order to give subsidies to prevent aeronautical accidents. This work focuses the fracture characterization of intermediate modulus type unidirectional carbon fiber laminates impregnated with modified epoxy resin (code 8552), by using interlaminar shear test, in two conditions: ambient and saturated with moisture in an hygrothermal chamber. The fractographic analyses on the failure plane of the laminates were performed by optical and scanning electron microscopies. The comparison of results showed that the hygrothermal conditioning affects significantly the interface region but doesn't alter the fiber/matrix interfacial adhesion. The failure modes present in the resin region, such as hackles and scarps, and in the reinforcement were evaluated, being possible to establish the failure propagation direction and the failure mode that was characterized as a mixing of pull-out and shear modes.

**Keywords:** fractography, failures evaluation, composites, interlaminar shear, hygrothermal conditioning.

## 1 INTRODUÇÃO

Devido aos compósitos poliméricos avançados apresentarem elevadas propriedades específicas, como resistência e rigidez combinadas com baixa massa específica, essa classe de materiais tem se tornado cada vez mais atrativa para o setor aeroespacial. Sempre que possível, a manufatura de componentes estruturais metálicos é substituída pelo processamento com materiais mais leves e que apresentam desempenho mecânico equivalente [1, 2]. Entretanto, a crescente utilização de componentes estruturais aeronáuticos em materiais compósitos poliméricos tem aumentado a possibilidade de ocorrência de acidentes e incidentes aeronáuticos, envolvendo peças fabricadas com esses materiais [3]. Nesse caso, a causa da falha deve ser investigada para prevenir futuras ocorrências e melhorar o projeto e/ou desempenho do componente ou estrutura. Muitas vezes, o componente em compósito é fabricado por processo de laminação de camadas de material pré-impregnado curado a vácuo em autoclave. No entanto, a complexidade de parâmetros envolvidos nessa técnica de processamento, como tipo e orientação do reforço e especificação da matriz polimérica, dificulta o estabelecimento de metodologias normalizadas para a análise de falhas da estrutura.

Um dos procedimentos utilizados para analisar os modos de falha em material compósito é por meio da avaliação da qualidade da adesão interfacial fibra-resina. Este conhecimento permite prever o comportamento do material em serviço quanto à possibilidade de ocorrência de falha na adesão dos constituintes do compósito [2]. Dentro deste contexto, uma das metodologias que vem sendo utilizada como ferramenta de controle da qualidade de compósitos poliméricos com fibras longas, com ampla aceitação para avaliar as propriedades de adesão interfacial fibra/resina, envolve ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS). Este ensaio fornece a máxima resistência à adesão interfacial fibra/resina após o carregamento em três pontos e é muito utilizado em laminados unidirecionais devido à simplicidade, facilidade e baixo custo do preparo dos corpos-de-prova. A partir das superfícies de fratura do compósito, realiza-se a análise fractográfica, identificando os aspectos que indicam a direção de propagação da trinca e o modo de falha predominante na fratura do compósito [2].

Com base no que foi anteriormente exposto, este trabalho tem como objetivo identificar os modos de falha e os aspectos típicos das fraturas obtidas em ensaio de resistência em cisalhamento interlaminar, à temperatura ambiente, de laminados unidirecionais (0°) de carbono/epóxi após a exposição ao condicionamento higrotérmico em câmara de climatização até a ocorrência de saturação de umidade e na condição ambiente.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Preparação dos Compósitos

Os compósitos foram produzidos com resina epóxi 8552, fornecido pela empresa Hexcel Composites e fibras unidirecionais de carbono de módulo intermediário IM7. A laminação e a cura dos compósitos em autoclave seguiram os procedimentos descritos na literatura para compósitos estruturais aeronáuticos [4 - 6].

Após a cura, as placas de laminados foram avaliadas por inspeção não-destrutiva, utilizando-se um equipamento de varredura ultra-sônica de transmissão por coluna de água automatizado da Automation Industries, INC., modelo US 640 SPERRY DIVISION, provido de um detector de falhas, modelo Reflectoscope S-80.

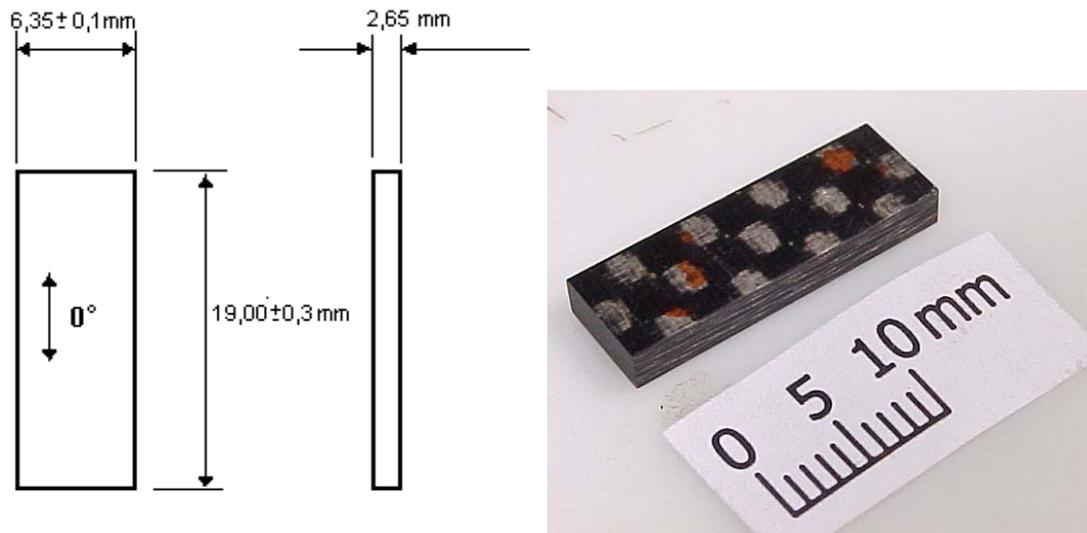
As amostras de laminados curados foram separadas em dois lotes, sendo o primeiro mantido em condição ambiente ( $23 \pm 5$  °C e  $50 \pm 5\%$  de umidade relativa (UR)) e o segundo submetido ao condicionamento higrotérmico a  $80 \pm 5$  °C e  $90 \pm 5\%$  UR. Antes de serem submetidas ao condicionamento ambiental, as amostras foram secadas de acordo com o procedimento da norma ASTM C562-85 [7]. O condicionamento higrotérmico foi realizado em uma câmara Climats-Saprati, conforme o procedimento B da norma ASTM D5229/D5229-M92 [8], até completar o ciclo de saturação de umidade das amostras.

### 2.2 Ensaios Realizados

As dimensões dos corpos-de-prova (CDP) utilizados nos ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar em três pontos foram definidas de acordo com a norma ASTM D2344-87 [6]. A Figura 1 apresenta os CDP's antes da realização dos ensaios e suas dimensões.

Os CDP's foram ensaiados à temperatura ambiente em uma máquina universal de ensaios Instron modelo 4301. As superfícies de fratura dos corpos-de-prova foram analisadas por inspeção visual, por microscopia óptica (estereoscópio marca Zeiss, modelo Stemi SV11) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (equipamento Zeiss, modelo DSM 950), utilizando elétrons secundários. A microscopia óptica foi realizada utilizando-se amostras polidas dos laminados, previamente embutidas em resina poliéster.

Os teores de fibra e resina foram determinados pelo ensaio de digestão ácida de acordo com a norma ASTM D3171-82 [9].



**Figura 1:** Desenho e fotografia do corpo-de-prova utilizado no ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

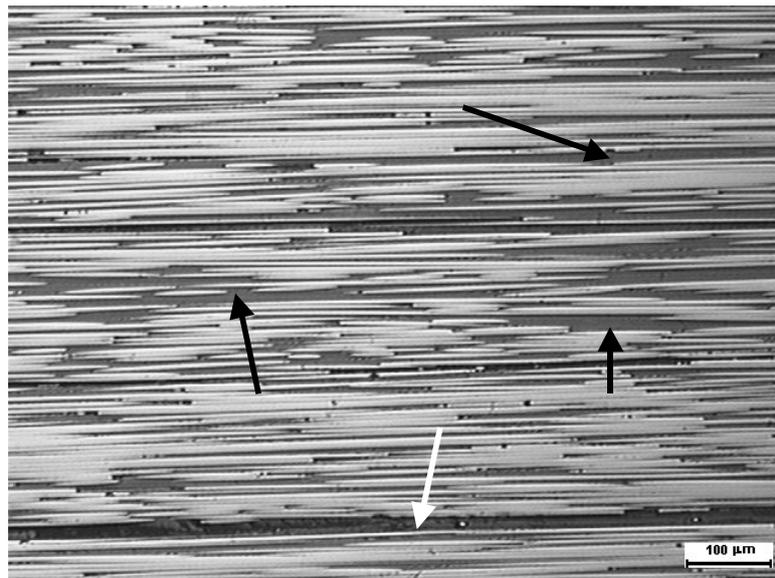
#### 3.1 Qualidade dos Laminados

O padrão da qualidade dos laminados, verificado por meio de varredura ultra-sônica, não apresentou nenhum tipo de descontinuidade ou dano de fabricação na estrutura do compósito, mostrando que os laminados estavam adequados para as análises propostas neste trabalho.

A verificação do padrão da qualidade dos laminados foi complementada de forma quantitativa, pelo ensaio de digestão química da resina epóxi 8552, e qualitativa pela análise microestrutural do compósito. O ensaio de digestão química foi realizado em ácido sulfúrico aquecido e forneceu informações que permitiram determinar o teor médio de resina em massa. As porcentagens médias em massa de reforço e de matriz polimérica encontradas no compósito foram respectivamente 64 e 36±1%, e estão dentro da faixa de valores encontrados na literatura [2]. Estes parâmetros estão relacionados com o processo de cura em autoclave, onde o ciclo utilizado é determinante na obtenção adequada do fluxo de resina, na compactação das camadas, na extração de voláteis e na redução do conteúdo de vazios, assegurando aos laminados valores adequados de propriedades mecânicas.

#### 3.2 Análise Morfológica

A análise por microscopia óptica permite observar a compactação das camadas e a distribuição das fibras e resina no interior dos laminados. A micrografia apresentada na Figura 2 é representativa do padrão de qualidade obtido na compactação das camadas do laminado curado em autoclave. As setas pretas indicam as pequenas bolsas de resina que se formaram durante a cura do compósito devido ao pré-impregnado ser do tipo resina pura, que dispensam a utilização de tecidos absorvedores de excesso de resina na preparação do saco de vácuo. Tal procedimento é adotado considerando-se que o pré-impregnado já possui o conteúdo de resina útil para o laminado sólido. A seta branca aponta o local onde ocorre a falha no ensaio mecânico de cisalhamento interlaminar. Esta análise confirma a boa qualidade dos laminados fabricados.



**Figura 2:** Seção longitudinal do laminado unidirecional analisado após o condicionamento higrotérmico.

Os efeitos combinados de temperatura, pressão e vácuo que são utilizados durante o ciclo de cura são fundamentais para a obtenção de laminados com espessura uniforme e isentos de defeitos, onde os espaços são completamente preenchidos pela resina, como assegura a inspeção ultra-sônica. No processo de cura dos compósitos poliméricos, o tempo de gelificação é um dado importante na definição dos parâmetros ótimos de operação, visando à obtenção de compósitos de qualidade. O conhecimento deste parâmetro, em sistemas onde o fabricante não fornece o ciclo de cura, é fundamental, pois é em função deste dado que se aplica a pressão necessária para a compactação dos laminados na autoclave [5, 10].

### 3.3 Absorção de Umidade

Os teores médios de umidade absorvida pelos laminados unidirecionais de resina epóxi 8552 com fibras de carbono IM7 encontram-se apresentados na Tabela 1. O cálculo do ganho médio percentual de massa ( $M(\%)$ ) pela absorção de umidade em cada laminado, após seis semanas de exposição na câmara climática, é definido pela Equação 1 [2].

$$M(\%) = \left| \frac{Mu - Ms}{Ms} \right| \times 100 \quad (1)$$

Sendo:  $Mu$  - massa da amostra úmida (g);  $Ms$  - massa da amostra seca (g).

A análise da Tabela 1 mostra que a partir da quinta semana de condicionamento higrotérmico os corpos-de-prova já se apresentam saturados com um ganho médio de massa de 0,71%.

**Tabela 1:** Ganho de massa médio dos laminados IM7/8552.

Média do Ganho de Massa em %					
1º Semana	2º Semana	3º Semana	4º Semana	5º Semana	6º Semana
0,40	0,53	0,68	0,68	0,71	0,72

### 3.4 Comportamento em Cisalhamento Interlaminar

Apesar das aplicações estruturais dos laminados unidirecionais ( $0^\circ$ ) serem limitadas, o estudo do comportamento mecânico deste tipo de compósito ajuda a prever o desempenho dos laminados

multidirecionais. A resposta ao cisalhamento interlaminar é utilizada para avaliar os mecanismos de adesão interfacial da fibra de carbono/resina epóxi [2]. As medidas da resistência ao cisalhamento interlaminar das amostras ensaiadas, sendo seis em cada condição de condicionamento ambiental, encontram-se na Tabela 2, a qual também inclui os valores máximo e mínimo medidos para caracterizar a dispersão de dados.

Embora o padrão da qualidade obtido nos compósitos tenha sido o mesmo em todas as amostras, as diferenças nos tipos de condicionamentos (ambiente e saturado de umidade) podem ter provocado mudanças nas características físico-químicas da resina, sendo essas determinantes nos resultados de resistência ao cisalhamento interlaminar. Verifica-se, porém, que mesmo existindo uma diferença de 11% nas médias das resistências na ruptura, os valores de mínimo da amostra mantida em condição ambiente estão próximos dos valores de máximo material mantido em umidade saturada, demonstrando que a degradação ocorre na matriz, mas com interferência moderada na propriedade de resistência ao cisalhamento do compósito de fibras de carbono IM7 e resina epóxi 8552.

Comparando-se os resultados obtidos nestes ensaios com os apresentados em literatura [2], observa-se que o condicionamento higrotérmico afetou de maneira menos significativa a resistência ao cisalhamento interlaminar dos laminados fabricados com a resina epóxi 8552, que os laminados com a resina epóxi F593. Isto sugere que a interface da fibra de carbono formada com a resina epóxi 8552 é mais resistente aos danos causados pela difusão de umidade e/ou o sistema de resina em estudo é menos sensível à absorção de umidade.

Sabendo-se que uma boa adesão entre a fibra e a resina é pré-requisito para uma transferência de tensões eficiente em compósitos, a análise do modo de falha interfacial é condição essencial para compreender a resistência ao cisalhamento interlaminar. No caso da absorção de água por um laminado isento de vazios, como nas amostras ensaiadas, os resultados obtidos são dependentes das propriedades da interface fibra/resina e da própria resina. O baixo teor de vazios observado nos compósitos ensaiados encontra-se relacionado aos efeitos da temperatura e pressão de cura na compactação das camadas em autoclave [2].

**Tabela 2:** Resultados dos ensaios de cisalhamento interlaminar dos laminados condicionados ambiente e saturados de umidade.

Amostra	Tensão Média (MPa)	Máx. (MPa)	Min. (MPa)
Ambiente	101,9	109,6	92,0
Saturada de umidade	91,0	96,5	85,5

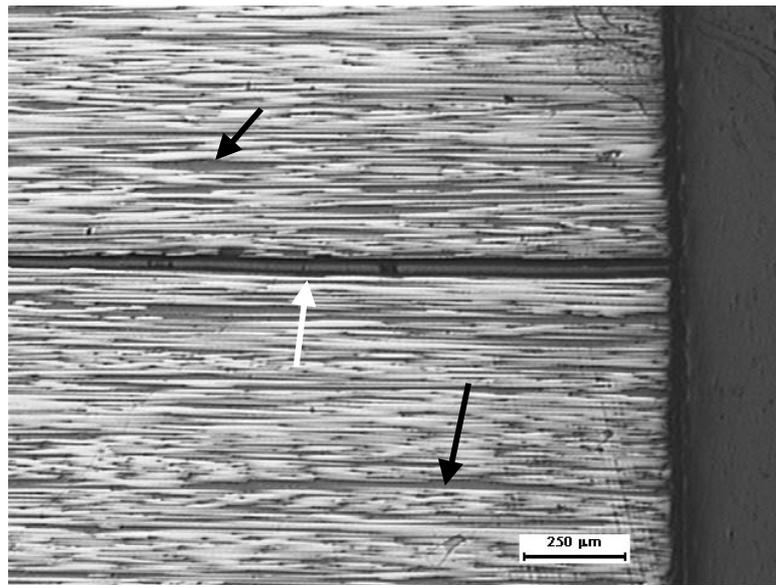
### 3.5 Análise Fractográfica

Conforme podem ser observados nas Figuras 2 e 3, os tipos de falha ocorridos nas amostras condicionadas higrotérmicamente e nas não condicionadas são semelhantes, não sendo idênticos apenas pela quantidade de aspectos tipo escarpas ou cristas de galo [1, 11 - 15] apresentados na superfície das fraturas.

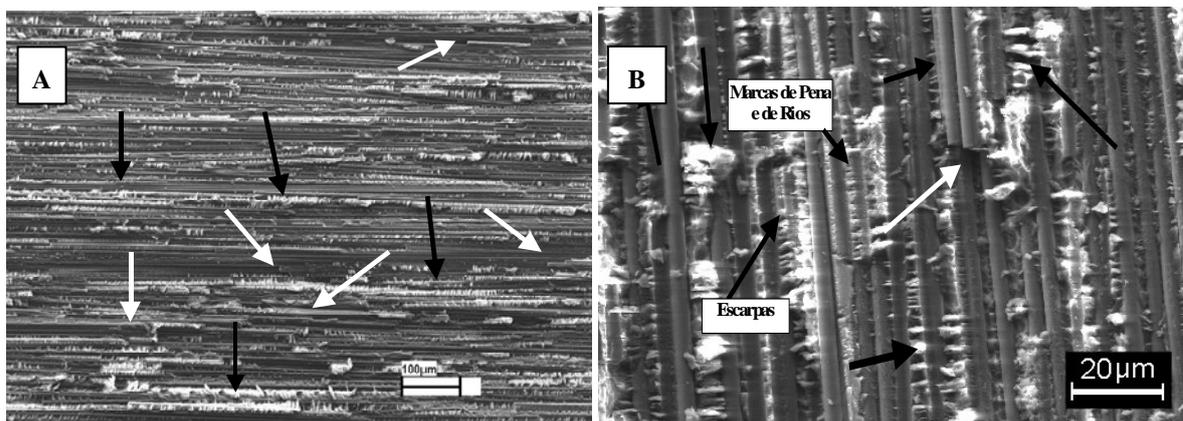
Sabe-se que a orientação e a distribuição inadequadas das fibras e a presença de microvazios e de fibras defeituosas (de diferentes diâmetros ou superfícies irregulares) modificam as propriedades mecânicas e o modo de falha do compósito, sendo responsáveis pelo surgimento dos diferentes aspectos observados na fratura do material [11, 12]. Porém, verifica-se que nas amostras ensaiadas não ocorre nenhum dos aspectos citados, sendo que as fibras apresentam uma distribuição na matriz em quantidade proporcional e de maneira ordenada e alinhada. As setas pretas indicam as poucas regiões ricas em resina presentes no laminado processado.

Pode ser observada também a sucessão do rompimento de diferentes camadas de fibras, indicado pela seta branca, devido à máxima tensão de cisalhamento geralmente ocorrer no plano médio do laminado, com a falha por cisalhamento interlaminar ocorrendo ao longo do plano horizontal. Este aspecto de falha é típico e esperado em laminados unidirecionais submetidos a este tipo de ensaio.

Na Figura 4, as regiões de cristas de galo nos laminados condicionados e não condicionados são identificadas por meio de setas. Pode-se afirmar que o tipo de fratura que ocorre nos laminados é semelhante.

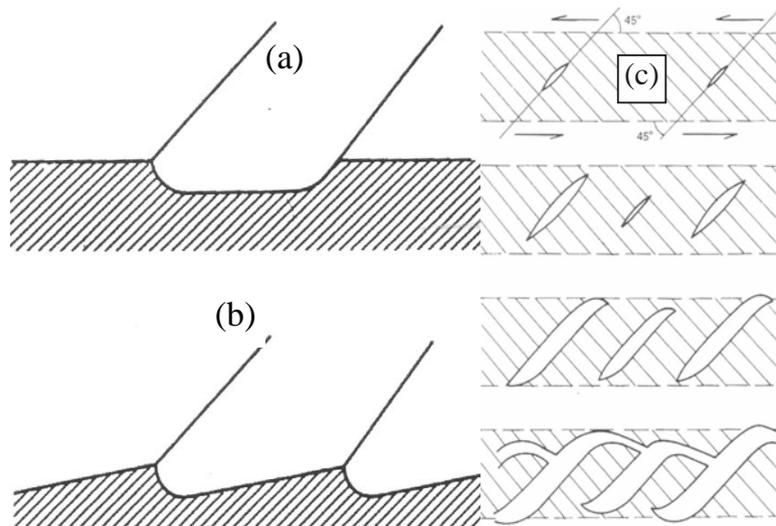


**Figura 3:** Vista da distribuição e alinhamento de fibras no laminado após ser submetido ao condicionamento ambiente.



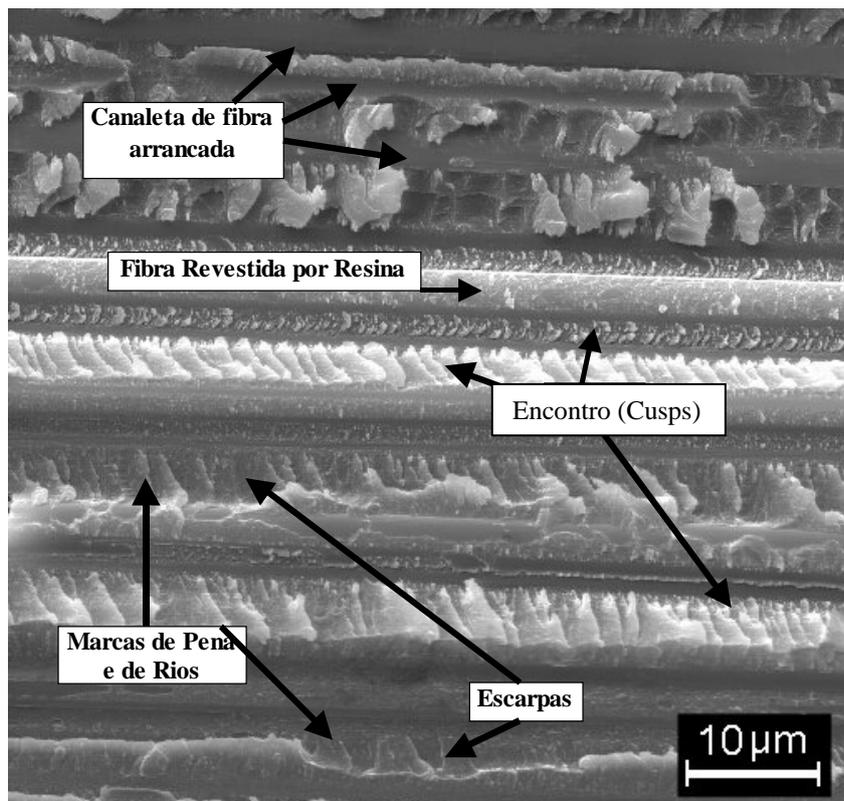
**Figura 4:** Regiões de cristas de galo (setas pretas): (a) amostra ambiente e (b) amostra saturada de umidade.

O próximo passo é identificar o tipo de modo predominante na falha, se é Modo I, arrancamento ou Modo II, ou cisalhamento [13]. Como característica do Modo I, tem-se a pouca presença de encontros de duas regiões curvas (*cusps*) e a maior presença de aspectos de pena, marcas de rios, escarpas, costelas e fibras quebradas [13]. Os aspectos de pena são formados a partir da propagação da frente da trinca [13]. Em maior magnitude, os aspectos de pena são denominados de marcas de rio e a direção de propagação da trinca pode ser dada pela direção onde as linhas coalescem. Quando as marcas de rios juntam-se, se formam as escarpas mostradas nas Figuras 5 (a) e 5 (b). Portanto, as escarpas são sempre acompanhadas de aspectos de pena e marcas de rios em menor escala. A presença das escarpas indica se ocorre o Modo I puro (faces opostas) ou se o Modo I sofre influência de cisalhamento do Modo II (faces do mesmo lado), porém não fornece a direção da propagação da falha [12 - 14]. Já para o Modo II, têm-se a predominância de fibras, indicando que a interface não foi afetada, e a presença de marcas na resina, como aspectos de pena ou marcas de rios. É observada também a presença de fibras quebradas, indicadas pelas setas brancas, identificando a ocorrência do modo misto de falha.

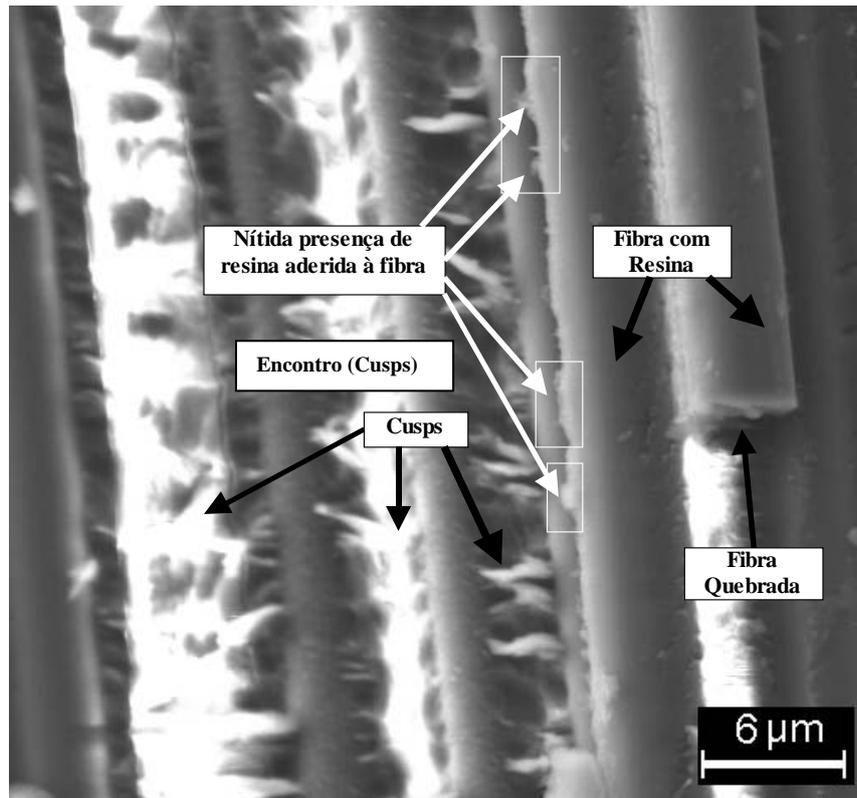


**Figura 5:** Esquema de: (a) escarpas com faces opostas, (b) escarpas com faces adjacentes e (c) formação de cristas de galo.

Nas Figuras 6 e 7 tem-se um aumento maior da superfície de fratura em análise, com a possibilidade de identificar os aspectos como escarpas, marcas de pena e de rios e regiões de encontro de duas regiões curvas, bem próximos às fibras, bem como pode ser nitidamente visualizado a resina, cobrindo a superfície das fibras, e o topo de fibras fraturadas.



**Figura 6:** Aspectos de falha da amostra não-climatizada.

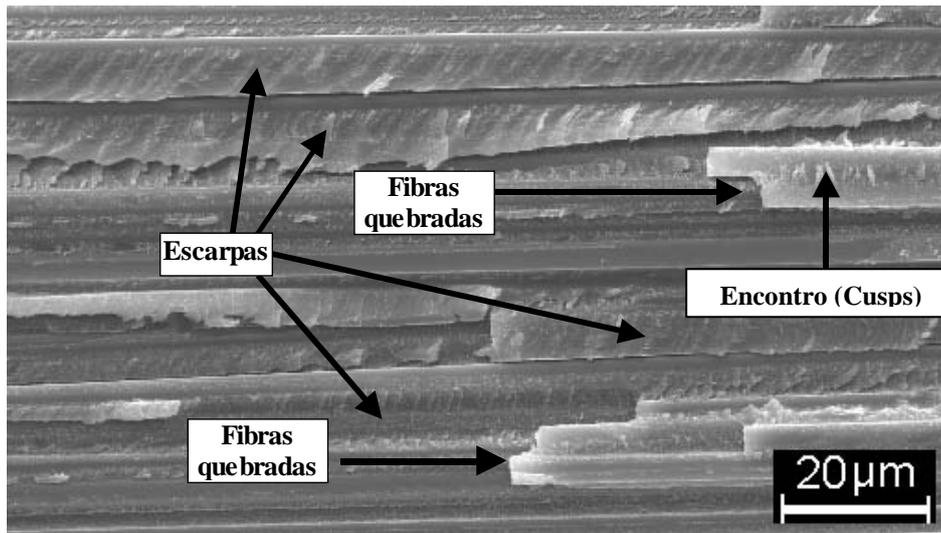


**Figura 7:** Aspectos de falha da amostra saturada de umidade.

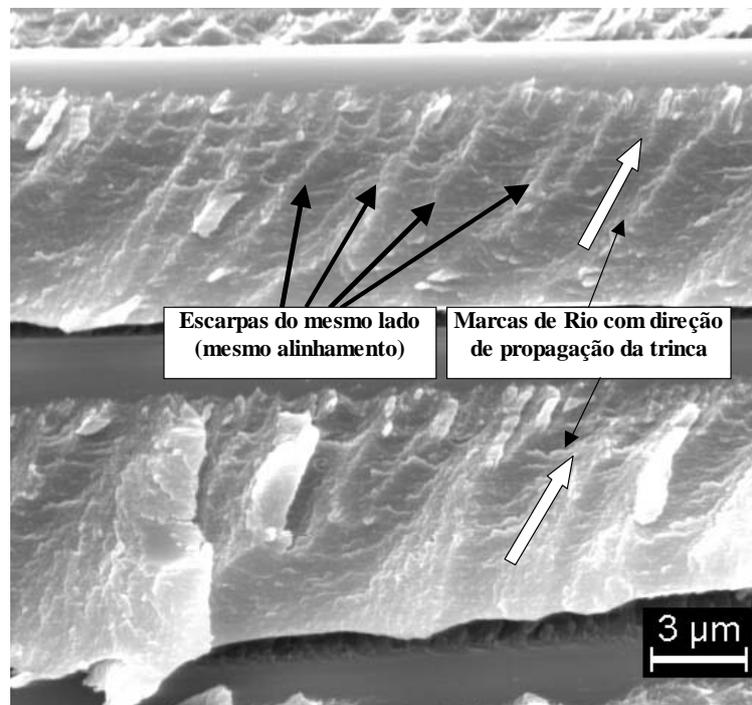
As Figuras 4, 6 e 7 revelam a existência de uma boa ancoragem da resina nas fibras. Isto é um indicativo de uma interface fibra/resina forte, uma vez que nas amostras condicionadas não se observa o efeito adverso da umidade na adesão interfacial. A presença de resina na superfície das fibras indica que o cisalhamento destes laminados ocorre preferencialmente na matriz polimérica, devido à região interfacial apresentar uma interação mais forte do que a própria resina. Quando isto não ocorre, a falha dá-se na interface fibra/resina, evidenciada pelo fato do reforço mostrar-se liso e sem resíduos da matriz polimérica e, muitas vezes, solto no plano de fratura [11, 12].

Como as regiões de cisalhamento para esta família de laminado são típicas e semelhantes, tanto para as amostras secas como para as condicionadas, fica claro que a absorção de água pelo laminado não fragiliza a interface fibra/resina, afetando apenas a matriz polimérica, gerando este tipo de falha característico de fraturas por cisalhamento [13 - 15].

Finalmente, observam-se as regiões de escarpas reveladas pelas Figuras 8 e 9. As escarpas e fibras fraturadas indicam a ocorrência de Modo I de falha. São observadas, também, pequenas ocorrências de regiões de encontro de duas regiões curvas, mas com a predominância de escarpas. Como mencionado, as escarpas podem fornecer informações sobre a ocorrência do Modo I influenciado pelo Modo II, além das marcas de rios fornecerem a direção de propagação das trincas por entre a matriz do laminado. Como aparecem escarpas com faces alinhadas de um mesmo lado, pode-se afirmar que ocorre influência do Modo II, cisalhamento e do Modo I, arrancamento. Por meio de análise das Figuras 4 e de 6 a 9, pode-se dizer que o modo de falha das amostras condicionadas e o das não condicionadas são por Modo Misto, sem a predominância de cisalhamento ou arrancamento.



**Figura 8:** Vista parcial da região de falha em Modo I (amostra não-condicionada).



**Figura 9:** Detalhe da vista parcial da região de falha em Modo I (amostra não-condicionada).

#### 4 CONCLUSÃO

A aplicação das técnicas de análise morfológica e de análise de falhas para os materiais compósitos poliméricos de resina epóxi, reforçada com fibras de carbono, auxiliou a determinação dos modos de falha e a direção de propagação das trincas para a maioria das amostras estudadas.

Nestes laminados, foram observados rompimentos sucessivos de diferentes camadas de fibras devido à máxima tensão de cisalhamento. Esta sucessão de rompimentos geralmente ocorre no plano médio do laminado, com a falha por cisalhamento interlaminar ocorrendo ao longo do plano horizontal. Este aspecto de falha é típico e esperado em laminados unidirecionais submetidos a este tipo de ensaio.

A análise fractográfica mostrou também que o condicionamento higrotérmico deteriorou a região da interface da resina epóxi 8552, sem alterar as características da interface fibra-resina e das fibras. Tal comportamento pode ser atribuído ao processamento adequado do laminado em autoclave e às características do sistema de resina epóxi pesquisado. Os aspectos de fratura presentes na região de resina, como cristas de

galo e escarpas, assim como do reforço foram detalhados, por meio dos quais foi possível estabelecer a direção de propagação da trinca e que o modo de falha foi caracterizado por ser do tipo misto (arrancamento e cisalhamento simultaneamente).

Como as regiões de cisalhamento para estes laminados são típicas e semelhantes, tanto para as amostras secas como para as condicionadas, fica claro que a absorção de água pelo laminado não fragiliza a interface fibra/resina, afetando apenas a matriz polimérica, gerando este tipo de falha característica de fraturas por cisalhamento.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer às empresas Hexcel Composites e Embraer, pelo fornecimento do material e fabricação dos corpos-de-prova utilizados neste trabalho, respectivamente; à Divisão de Materiais/IAE/CTA, pela realização dos ensaios e atividade de análise de falhas; ao CNPq (Processo 303528/2003-6) e à FAPESP (Processo 05/54358-7).

## 6 BIBLIOGRAFIAS

- [1] PURSLOW, D., “Matrix fractography of fibre-reinforced thermoplastics, part 2: shear failures”, *Composites Science and Technology*, v. 19, n. 2, pp. 115, 1988.
- [2] ASP, L.E., NILSSONS, S., SINGH, S., “An experimental investigation of the influence of delamination growth on the residual strength of impacted laminated”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 32, n. 9, pp. 1229-1235, 2001.
- [3] SHINDO, S., SHINOHE, D., “Analysis and testing of mixed-mode interlaminar fracture behavior of glass-cloth/epoxy laminates of cryogenic temperature”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 127, n. 4, pp. 468-476, October 2005.
- [4] BLANCO, N., *et al.*, “Mixed-mode delamination growth in carbon-fibre composite laminates under cyclic loading”, *International Journal of Solids and Structures*, v. 41, n. 15, pp. 4219-4235, July 2004.
- [5] GILCHRIST, M.D., SVNSSON, N., “A fractographic analysis of delamination within multidirectional carbon epoxy laminates”, *Composites Science and Technology*, v. 55, n. 2, pp. 195-207, 1995.
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *D 2344-87: Apparent Interlaminar shear strength of parallel fiber composites by short beam method*, 1992.
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *C 562-85: Moisture in a graphite sample*, 1992.
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *D 5229/D 5229M-92: Moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials*, 1992.
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *D 3171-76: Fiber content of resin-matrix composites by matrix digestion*, 1992.
- [10] SJOGREN, A., ASP, L.E., “Effects of temperature on delamination growth in a carbon/epoxy composite under fatigue loading”, *International Journal of Fatigue*, v. 24, n. 2-4, pp. 179-184, February/April 2002.
- [11] PURSLOW, D. – RAE – *Fractographic Evaluation of Composite Materials*, Technical Report, S/ N°, DERA, In: Farnborough Hants, UK, 1983.
- [12] GREENHALGH, E., HILEY, M., SINGH, S., *Introduction to fractographic analysis of composites*, Course Notes, In: Structural Materials Centre, DERA, Farnborough Hants, UK, October 1997.
- [13] FRANCO, L.A.L., *Análise fractográfica de compósitos poliméricos estruturais*, Tese de M.Sc., Instituto Tecnológico da Aeronáutica, Brasil, 2003.

- [14] HARMIA, T., FRIEDRICH, K. “Fracture toughness and failure mechanisms in unreinforced and long-glass-fibre-reinforced PA66/PP Blends”, *Composites Science and Technology*, v. 53, n. 1, pp. 423-430, 1995.
- [15] CRUSE, A.T., STOUT, M.G., “Fractographic study of graphite-epoxy laminated fracture specimens”, *Journal of Composite Materials*, v. 7, n. 2, pp. 272-276, 1973.