

# ANÁLISE NUMÉRICA DE DELAMINAÇÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS CARBONO-EPÓXI

Gigliola Salerno <sup>1</sup>

## Resumo

Materiais compósitos transformaram-se em uma vantajosa opção devido às altas resistência e rigidez específicas; atualmente as aplicações são crescentes. Os mecanismos de dano de um material compósito, preparado com fibras unidirecionais, são complexos, sendo o processo de delaminação decisivo para a perda da integridade estrutural e de suma importância sua compreensão e avaliação. Como consequência a estes fatores, o objetivo deste trabalho é, a partir de uma identificação anterior das propriedades à fratura do material compósito carbono-epóxi, simular numericamente o processo de delaminação por meio de uma ferramenta computacional. Para tanto, ensaios de delaminação: DCB (*Double Cantilever Beam*) e ENF (*End Notched Flexure*) identificaram as energias críticas de fratura para as interfaces 0/0 e 0/90 em modos I e II. Foram realizadas simulações numéricas, embasadas em modelo a dano para interface, que considera a energia de deformação e a força de ativação, a partir da qual se inicia a trinca. Resultados preliminares mostram a capacidade das simulações numéricas em representar os dados experimentais.

**Palavras-chave:** Compósito laminado; Delaminação; Danos; Simulação numérica.

## DELAMINATION ANALYSIS FOR COMPOSITE MATERIALS

### Abstract

Composite materials became an advantageous option due high specific strength and stiffness; nowadays the applications grow. Unidirectional fiber composite materials have complex damage mechanisms; moreover the delamination process is the most important mechanism considering the structural integrity, being important its understanding and evaluation. As a consequence, the main purpose of this work, using previous fracture properties identification, is to simulate numerically delamination process through a finite element code. For that, delamination tests: DCB (*Double Cantilever Beam*) and ENF (*End Notched Flexure*), which identified critical fracture energies for interface 0/0 and 0/90 in modes I and II. Numerical simulations were run, these based on damage interface model that considers deformation energy and activation force for the delamination inception. Preliminary results show the numerical simulations ability to predict the experimental data.

**Key words:** Composite laminate; Delamination; Damages; Numerical simulation.

## I 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, de modo que permitem a redução da quantidade de material utilizado, baixo consumo de combustível e redução na manutenção. A definição de resistência e rigidez específica consiste na relação entre os valores de resistência ou rigidez e a densidade em massa do material; comparando os valores para ligas de alumínio e os compósitos, estes últimos são, em média, cinco vezes mais resistentes; tal fato caracteriza uma vantagem consi-

derável.<sup>(1,2)</sup> Apresentam uma característica importante, podem ser criados a partir das necessidades de aplicação: os materiais da fibra e da matriz, a orientação das fibras, a espessura de cada lâmina, e a sequência das lâminas na composição do laminado podem ser escolhidos de modo que a combinação forneça as propriedades mecânicas adequadas. Nos compósitos laminados com fibras contínuas unidirecionais cada lâmina é composta de extratos nos quais as fibras apresentam a mesma direção e de uma matriz que as une. As lâminas que compõem o compósito podem apresentar diversas orientações das fibras.

<sup>1</sup>Engenheira mecânica Doutora em Engenharia Estrutural pelo Politecnico di Milano, Professora, Universidade Nove de Julho, Departamento de Ciências Exatas, Engenharia de Produção Mecânica, Centro Universitário da FEI, Departamento de Engenharia de Materiais, Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, Cep 09850-901, São Bernardo do Campo, SP, Brasil. E-mail: gsalerno@fei.edu.br

Dentre os inúmeros mecanismos de fratura possíveis em um material compósito carbono-epóxi, a delaminação é o mais definitivo quanto à instabilidade estrutural, sendo este o foco principal deste trabalho.

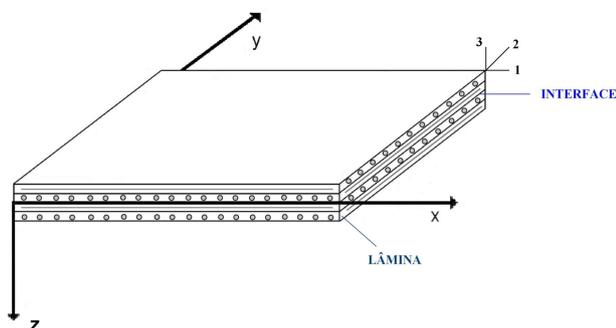
## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar em simulações numéricas o comportamento quanto à delaminação de um material compósito MTM-57 laminado, considerado transversalmente isotrópico, simétrico e balanceado, composto de lâminas [0/90], formadas por fibras longas unidirecionais de carbono e matriz de epóxi. Foram realizados ensaios de delaminação, em um estudo anterior,<sup>(3)</sup> em interfaces 0/0 e 0/90 em modos I e II de abertura, os quais forneceram as respectivas energias de fratura. A partir dos dados experimentais, foi implementado um modelo de dano para interface em um código de elementos finitos de modo a simular numericamente os ensaios.

## 1.2 Revisão da Literatura

Os materiais compósitos podem exibir múltiplas fraturas antes de romper-se. Não existe uma única teoria que possa prever o modo de fratura para todos os níveis de análise, condições de carregamento ou tipos de materiais utilizados. Existem três escalas de observação e descrição do dano: micro-, meso- e macroescalas. Microescala considera a estrutura compósita heterogênea: a fibra, a interface matriz/fibra etc. A mesoescala define o laminado composto pela lâmina e interface associada (Figura 1). Por fim, a macroescala considera o comportamento global do compósito laminado.<sup>(4,5)</sup>

Existem vários mecanismos de fratura considerando a microestrutura, ou seja, interação fibra/matriz:<sup>(1,5)</sup> fratura das fibras, extração das fibras, descolamento entre fibra e matriz, fratura da matriz e flambagem das fibras. No caso de materiais compostos de carbono/epóxi, a

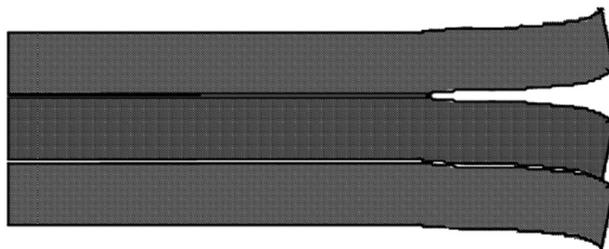


**Figura 1.** Sistema global de referência do material compósito (x-y-z) e sistema de referência de uma lâmina (1-2-3). Mesoescala: lâmina e interface.<sup>(3)</sup>

resistência transversal é muito menor do que aquela axial que justifica o crescimento das fraturas paralelas às direções transversais das fibras.<sup>(6)</sup> A fratura, denominada local, verifica-se em uma ou mais lâminas antes da fratura do laminado. Estas fraturas locais limitam-se entre uma lâmina e outra; quando as fraturas alcançam a interface, as tensões intralaminas provocam a propagação das delaminações (Figura 2) entre as lâminas, o processo de fratura mais catastrófico.

A mecânica da fratura pode ser aplicada na análise de delaminação em materiais compósitos laminados. O parâmetro mais importante a ser determinado experimentalmente é a energia crítica de fratura ( $G_c$ ).<sup>(7,8)</sup> Os ensaios de delaminação em modo I (abertura) são denominados DCB, onde  $a$  é o comprimento total da delaminação, de acordo com a norma ISO 15024<sup>(9)</sup> no caso de interface 0/0. Utiliza-se a norma ASTM D5528<sup>(10)</sup> quando considerada a interface 0/90. Ambos são métodos que consideram a compliância da curva força versus deslocamento. Os ensaios de delaminação em modo II (cisalhamento) são denominados ENF, de acordo com a norma ASTM D790<sup>(11)</sup> no caso de interface 0/0. Quando considerada a interface 0/90 o método utilizado é baseado na compliância e considera-se a teoria da laminação, a que se refere à homogeneização do laminado.<sup>(7)</sup> Para um material transversalmente isotrópico as energias críticas de fratura em modo II e modo III são consideradas iguais devido ao plano de isotropia. Trabalhos desenvolvidos por Massabò et al.,<sup>(12)</sup> Laksimi et al.<sup>(13)</sup> e Schipperen et al.<sup>(14)</sup> mostram resultados satisfatórios das análises experimental e numérica de delaminação baseados na compliância, apesar da anisotropia do material compósito.

Os modelos a dano para interface relacionam a descontinuidade de deslocamento [ $u_\perp$ ] com as trações ( $\tau$ ). A idéia principal do mecanismo de dano para interface aplicado a compósitos baseia-se no fato da interface ser considerada uma entidade independente que assegura a transferência de tensões e deformações de uma lâmina adjacente à outra (Figura 2), que pode ser atribuída uma lei constitutiva.<sup>(15)</sup> A energia de deformação elástica por unidade de superfície é dada por ( $E_d$ ) (Equação 1):



**Figura 2.** Delaminações entre as diversas lâminas.

$$E_d = \frac{1}{2}(1-d_1)k_1[u_1]^2 + \frac{1}{2}(1-d_2)k_2[u_2]^2 + \frac{1}{2}(1-d_3)k_3^+ \langle [u_3] \rangle_+^2 + \frac{1}{2}k_3^- \langle [u_3] \rangle_-^2 \quad (1)$$

$$\tau_i = \frac{\partial E_d}{\partial [u_i]_{d_i}}; \quad Y_i \equiv -\frac{\partial E_d}{\partial d_i} \Big|_{[u_i]}$$

em que  $Y_i$  são as forças de ativação em cada direção,  $d_i$  as variáveis de dano. No modelo elastodano,<sup>(16-18)</sup> a evolução do dano,  $f(Y_i)$ , é governada por uma lei não-associada (Equações 2,3):

$$f(Y_i) = \left( (Y_3)^\alpha + (a_1 Y_1)^\alpha + (a_2 Y_2)^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}}; \quad (2)$$

$$\bar{Y} = \max_{\tau \leq \tau} \{f(Y_i)\}$$

$$L(\bar{Y}) = 2 \left( 1 - \frac{\sqrt{\bar{Y}_c}}{\sqrt{2\bar{Y}}} \right); \quad d_i = L_i(\bar{Y}) \quad i=1,2,3 \quad (3)$$

em que  $\alpha$  caracteriza a propagação da delaminação em modo misto,  $\bar{Y}$  é a força de ativação considerando os três modos de abertura,  $Y_c$  é a energia crítica de fratura em modo I,  $a_i$  ( $i = 1, 2$ ) são razões entre as energias de fratura modo II/I e modo III/I. A lei que governa o dano considera que a curva tração versus descontinuidade de deslocamento cresce linearmente até um valor máximo e, a partir deste, decresce com comportamento linear. Quando a interface é completamente degradada em modo I, esta é considerada degradada nos modos II e III.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Análise Experimental

O material estudado é um compósito de fibras de carbono unidirecionais e resina epóxi que as envolveu, chamado MTM-57. Ensaios de tração e de torção realizados em Salerno,<sup>(3)</sup> conforme a norma ASTM D3039<sup>(19)</sup>, fornecem as propriedades elásticas da lâmina do material compósito. No mesmo trabalho,<sup>(3)</sup> foram realizados ensaios de delaminação DCB (normas ISO15024<sup>(9)</sup> e D 5528-01<sup>(10)</sup>) e ENF (ASTM D790<sup>(11)</sup>) para as interfaces 0/0 e 0/90 (Figura 3), dos quais foram obtidas as energias críticas de fratura ( $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ ).

### 2.2 Análise Numérica

Simulações numéricas que representem a delaminação e possam quantificar o dano em diversas situações de carregamento são fundamentais para desenvolvimento de projetos com materiais compósitos. Simulações numéricas realizadas em elementos finitos tiveram como objetivo representar o comportamento do material compósito quanto à delaminação, para tanto o modelo de dano para interface citado na seção 1.2, foi implementado na subrotina de lei constitutiva. Os dois braços de material compósito foram modelados com elementos tridimensionais (8 nós) e a lei constitutiva elástica a interface modelada com elementos de interface (8 nós) e a lei elastodano.

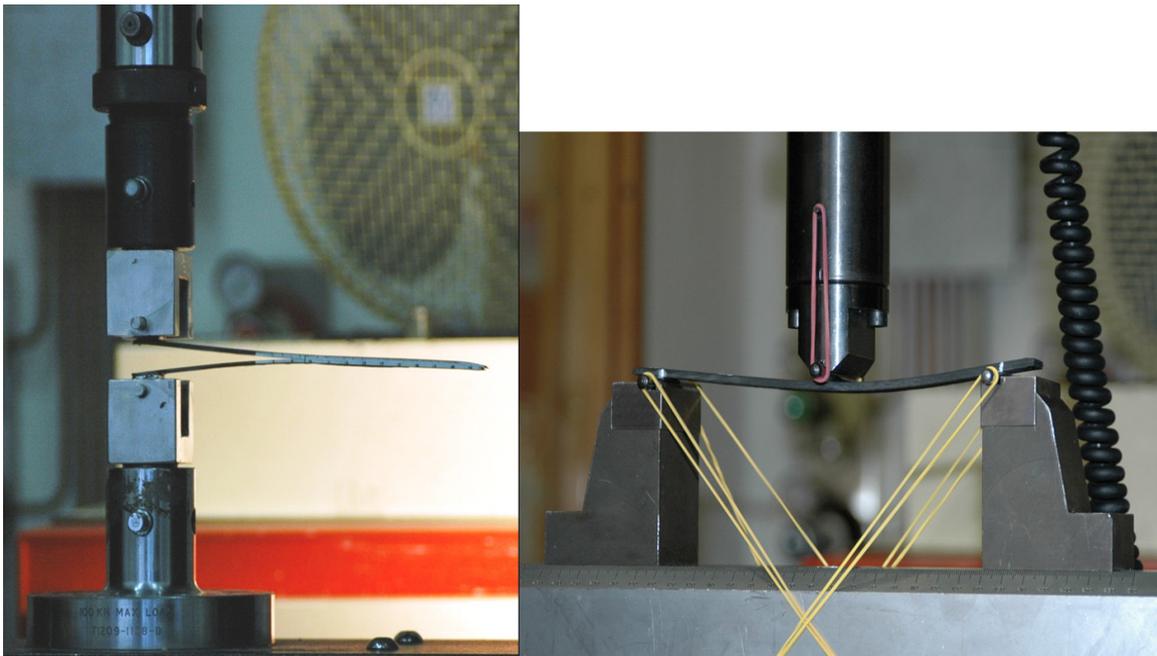


Figura 3. Configuração dos ensaios DCB (esquerda) e ENF (direita).<sup>(6)</sup>

### 3 RESULTADOS

Dos ensaios de tração e torção as propriedades elásticas da lâmina foram obtidas (Tabela 1). Estas foram utilizadas para o modelo elástico dos braços em simulações numéricas dos ensaios. As energias críticas em modo I e modo II para interfaces 0/0 e 0/90 estão reunidas na Tabela 2.

Os resultados obtidos para cinco ensaios DCB, no caso da interface 0/0, são mostrados nas curvas força versus deslocamento (Figura 4). Nesta configuração ocorreu o processo de *fiber-bridging* (Figura 5), um fenômeno devido ao entrelaçamento das fibras na interface 0/0, pois estas estavam orientadas na mesma direção. Este entrelaçamento provoca um ligeiro aumento da resistência durante o processo de propagação da delaminação (Figura 4) e a mantém praticamente constante até momentos que antecederam a ruptura total.

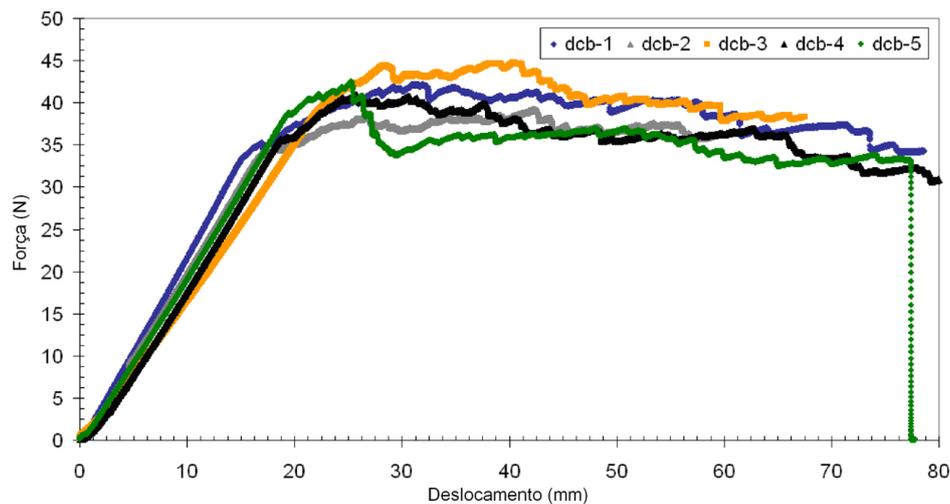
A simulação numérica realizada para o ensaio DCB interface 0/0 pretende reproduzir as condições do ensaio experimental, utilizando o modelo a dano para interface. Deste modo, foi computado o dano na interface (SDVI) (Figura 6). Comparando os resultados em termos da curva força versus deslocamento (Figura 7) observa-se que a curva numérica caracteriza o comportamento até o início da delaminação. A partir do momento em que esta começou a propagar e o efeito *fiber-bridging* se manifesta, as curvas divergem. Considerando o comprimento da delaminação em função do tempo (Figura 8), apresenta-se uma curva atípica (dcbI); os resultados experimentais e numéricos são similares nos 40 mm iniciais da propagação; passado este limite, as curvas divergem significativamente. Nota-se que, após 140 mm, a delaminação propaga-se rapidamente, caracterizando um processo instável.

**Tabela 1.** Propriedades elásticas da lâmina<sup>(3)</sup>

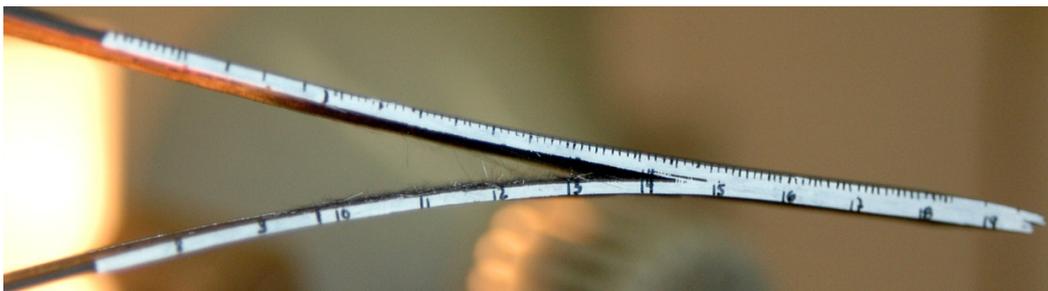
$E_{11}$	$171.430 \pm 33.900$	MPa
$E_{22}$	$7.523 \pm 1.195$	MPa
$G_{12}$	$3.560 \pm 1.022$	MPa
$G_{23}$	$3.277 \pm 225$	MPa
$\nu_{12}$	$0,3 \pm 0,09$	

**Tabela 2.** Energias críticas de fratura<sup>(3)</sup>

Interface			
0°/0°	$G_{Ic}$	$239 \pm 22$	J/m <sup>2</sup>
	$G_{IIc}$	$2.944 \pm 182$	J/m <sup>2</sup>
0°/90°	$G_{Ic}$	$687 \pm 88$	J/m <sup>2</sup>
	$G_{IIc}$	$837 \pm 235$	J/m <sup>2</sup>



**Figura 4.** Ensaio DCB para interface 0/0: curvas força versus deslocamento.<sup>(3)</sup>



**Figura 5.** Ensaio DCB para interface 0/0: *fiber-bridging*.<sup>(3)</sup>

As curvas força versus deslocamento (Figura 9) apresentam os resultados experimentais obtidos para três ensaios DCB, no caso da interface 0/90. Nesta configuração ocorre um mecanismo de propagação diferente, pois a delaminação muda constantemente o

caminho preferencial passando de uma lâmina à outra (Figura 10). Desta forma, combinam-se os efeitos de fratura interlaminar e intralaminar. Este efeito pode ser observado na fractografia realizada por MEV (Figura 11).

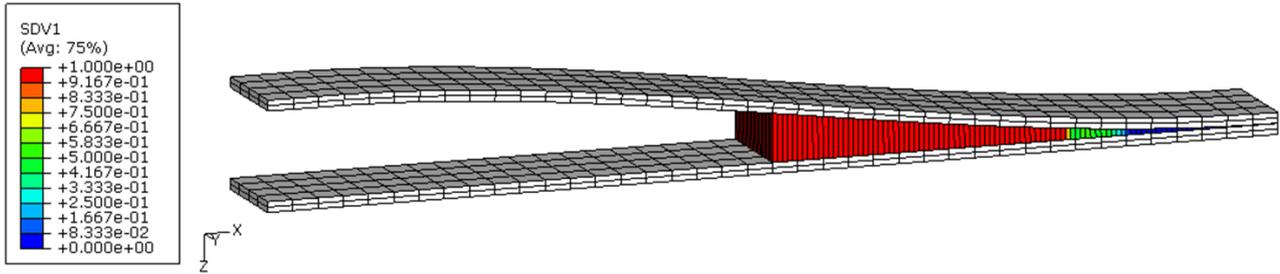


Figura 6. DCB para interface 0/0: dano computado na interface ao final da simulação.

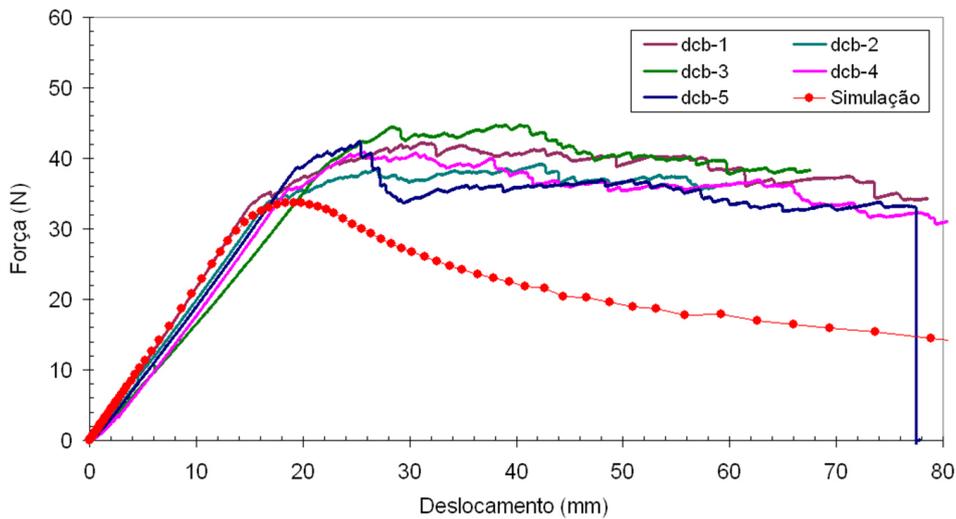


Figura 7. DCB para interface 0/0: curva força versus deslocamento. Comparação entre dados experimentais e numéricos.

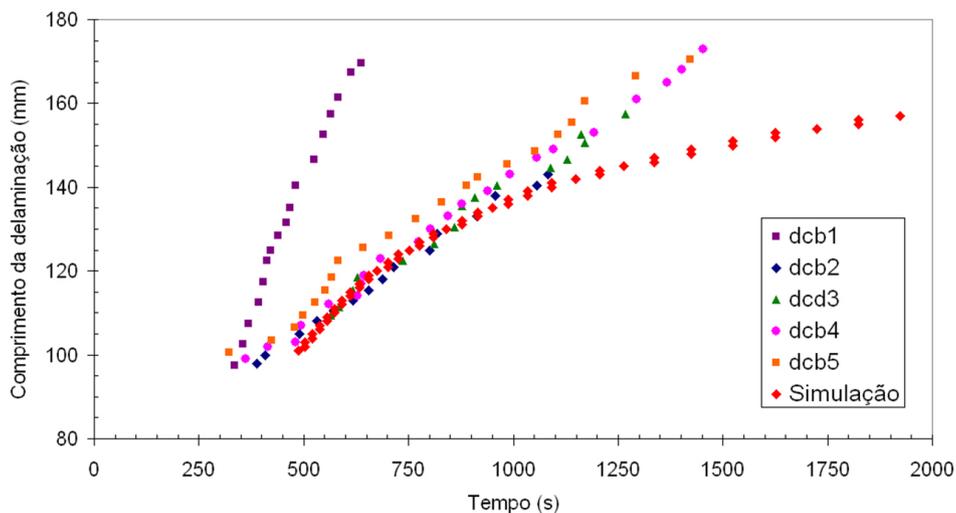


Figura 8. DCB para interface 0/0: curva comprimento da delaminação versus tempo. Comparação entre dados experimentais e numéricos.

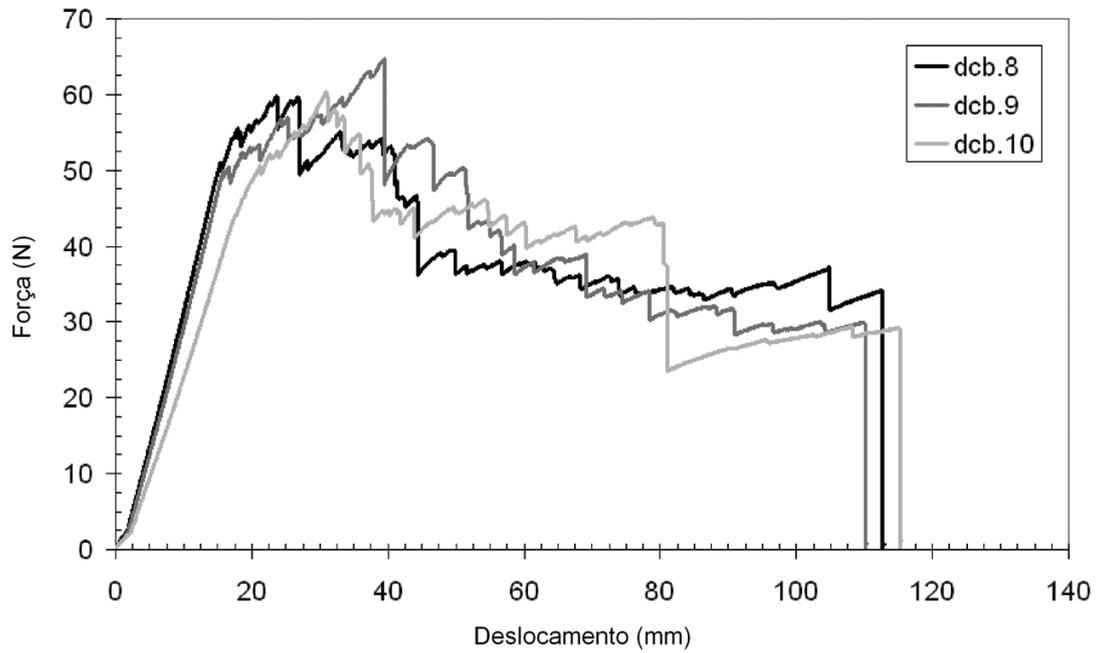


Figura 9. Ensaio DCB para interface 0/90: curvas força versus deslocamento.<sup>(6)</sup>

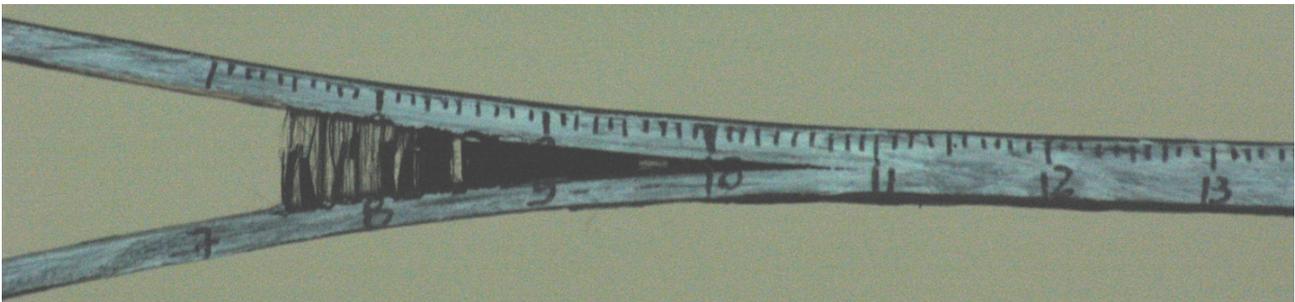


Figura 10. Ensaio DCB para interface 0/90: a delaminação muda caminho preferencial.<sup>(6)</sup>

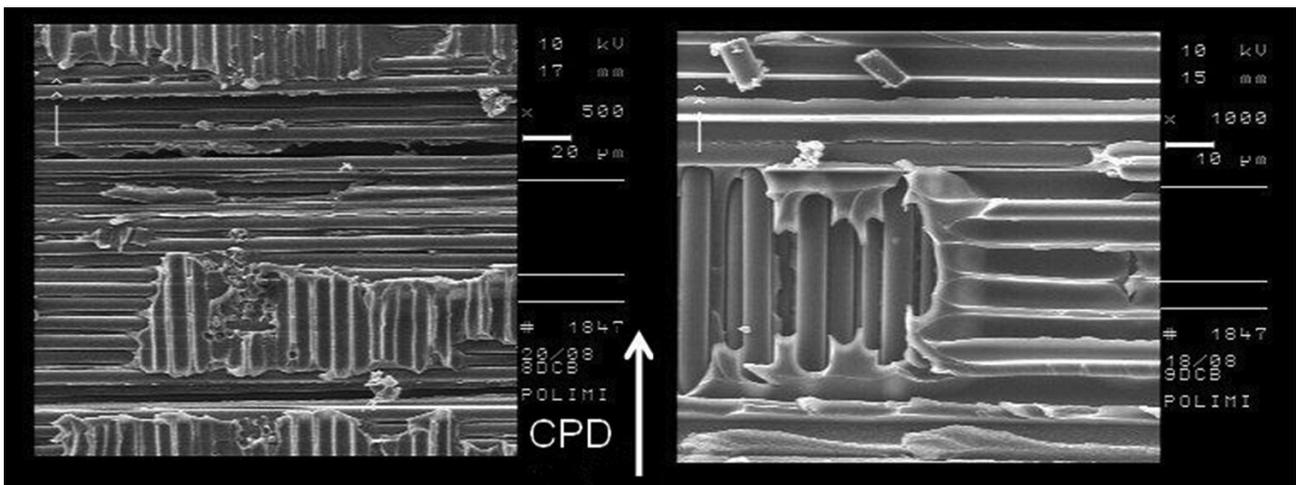


Figura 11. Ensaio DCB para interface 0/90: fractografia porMEV da área fraturada.<sup>(6)</sup>

Com intuito de reproduzir as condições do ensaio experimental, a simulação numérica realizada para o ensaio DCB interface 0/90 utiliza o modelo a dano para interface. Sendo assim, pode ser computado o dano na interface (SDVI) (Figura 12). Comparando os resultados em termos da curva força versus deslocamento (Figura 13) observa-se que a curva numérica tende a caracterizar o comportamento elástico; no entanto, o início da delaminação não

é identificado, devido ao fato da delaminação mudar o caminho preferencial a partir do momento de sua iniciação. As curvas, no entanto, apresentam características semelhantes. Considerando o comprimento da delaminação em função do tempo (Figura 14), os resultados experimentais e numéricos são similares. Observa-se um atraso quanto ao início da delaminação e os resultados divergem no final do processo, porém as curvas se aproximam.

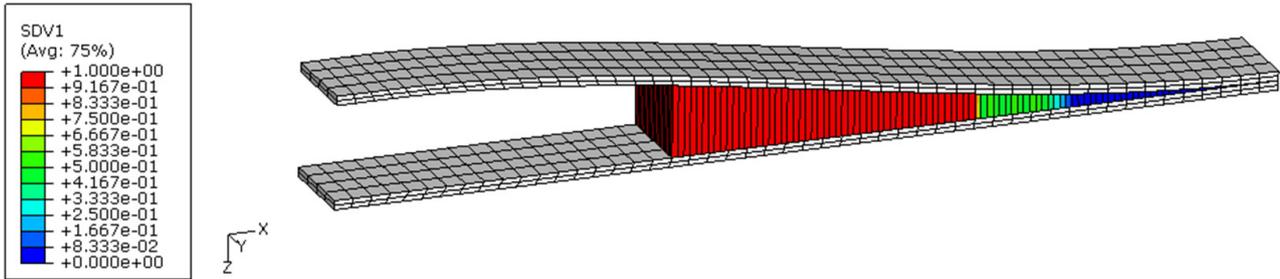


Figura 12. DCB para interface 0/90: dano computado na interface ao final da simulação.

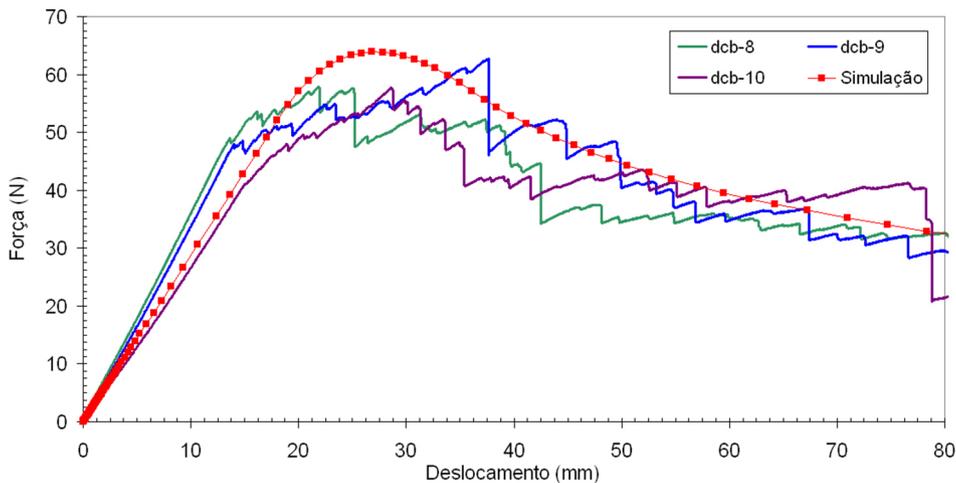


Figura 13. DCB para interface 0/90: curva força versus deslocamento. Comparação entre dados experimentais e numéricos.

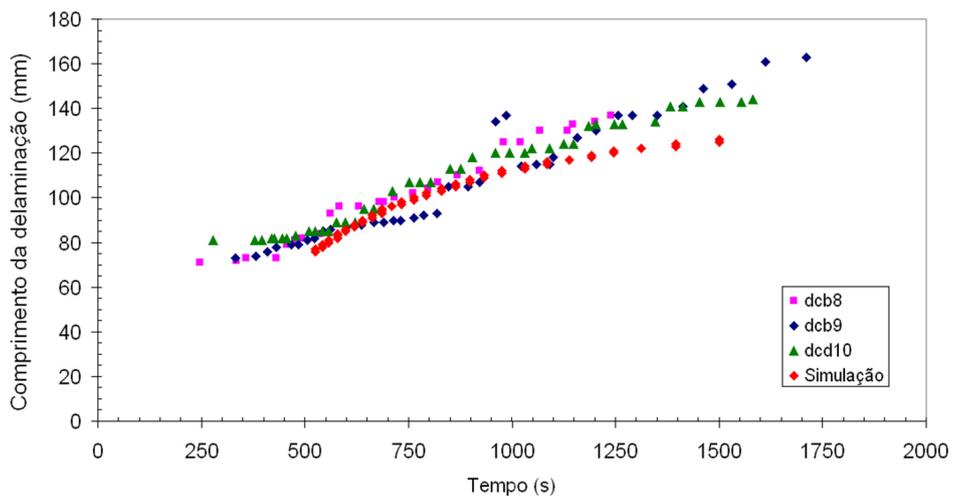


Figura 14. DCB para interface 0/90: curva comprimento da delaminação versus tempo. Comparação entre dados experimentais e numéricos.

## 4 DISCUSSÃO

Os ensaios experimentais mostram o comportamento das interfaces 0/0 e 0/90 quando a fratura ocorre em modo I, de acordo com os ensaios DCB. Estes dados são de suma importância quando se trata de materiais compósitos e o fenômeno da delaminação é o principal mecanismo de dano. Assim, como apresentado em Laksimi, et al.,<sup>(13)</sup> os valores obtidos para diferentes configurações de interface geram diferentes valores de energia crítica de fratura (Tabela 2). Com os resultados obtidos e utilizando o modelo a dano proposto na seção 1.2 para a interface 0/0 observa-se o início da delaminação (Figura 7), porém o efeito *fiber-bridging* (Figura 5) não está incluído. Este fenômeno provoca um aumento na resistência durante a propagação da delaminação, devido ao entrelaçamento das fibras que apresentam a mesma orientação na interface 0/0. Considerando a não existência de uma lei implementada que representa este comportamento, a partir do início da delaminação, a sua propagação, utilizando o modelo a dano para interface, torna-se conservativa. No entanto, os resultados do modelo a dano aproximam-se dos comprimentos de trinca obtidos experimentalmente (Figura 8). Massabò et al.<sup>(14)</sup> propõem a implementação numérica do fator de intensificação de tensões em Modo I com auxílio de funções que consideram o efeito *bridging* com ótimos resultados, sendo esta uma futura consideração para o presente estudo. Considerando a interface 0/90, esta apresenta um comportamento consideravelmente diferente daquela 0/0. O efeito *fiber-bridging* não existe, pois as fibras das lâminas adjacentes à interface estavam orientadas perpendicularmente entre si. No entanto, a delaminação tendeu a movimentar-se entre as lâminas, percorrendo caminhos diferentes, de modo

que houve uma delaminação com características intralaminar e interlaminar (Figuras 10 e 11). Desta forma o valor experimental obtido representa os dois fenômenos combinados e o modelo a dano não prevê perfeitamente o início da delaminação e consegue parcialmente prever o comportamento geral para a propagação (Figura 13) e o comprimento da delaminação pelo tempo (Figura 14).

## 5 CONCLUSÕES

Pode-se observar que o modelo a dano atende à necessidade de caracterizar a delaminação utilizando os valores das energias críticas de fratura em Modo I. No entanto, quando são verificados fenômenos especiais, características inerentes a cada interface, mostra-se necessária uma complementação. As simulações numéricas, contudo, apresentam-se confiáveis e são o primeiro passo para descrever completamente o comportamento das diferentes interfaces em relação ao processo de delaminação. Como propostas de trabalhos futuros, estão a implementação de modelos que representem estes fenômenos especiais e simulações para os ensaios ENF.

## Agradecimentos

Agradecimentos aos professores Stefano Mariani e Alberto Corigliano, do Politecnico di Milano pela orientação e apoio nos estudos referentes a materiais compósitos e às simulações numéricas durante o doutorado que me permitiram, posteriormente, desenvolver este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Herakovich CT. Mechanics of fibrous composites. New York: John Wiley; 1998.
- 2 Pedersen P. Elasticity, anisotropy, laminates with matrix formulation, finite elements and an index to matrices. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark; 1998.
- 3 Salerno G. Damage analysis of composite laminates subject to low-velocity impacts (PhD thesis). Milano: Politecnico di Milano; 2009.
- 4 Ladevèze P. A damage computational approach for composites: basic aspects and micromechanical relations. Comput Mech. 1995;17:142-150. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00356486>
- 5 Ladevèze P, Lubineau G. On a damage mesomodel for laminates: micro-meso relationships, possibilities and limits. Compos Sci Technol. 2001;61:2149-2158. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00109-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00109-9)
- 6 Ladevèze P, Le Dantec E. Damage modelling of the elementary ply for laminated composites. Compos Sci Technol. 1992;43:257-267. [http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538\(92\)90097-M](http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538(92)90097-M)
- 7 Yang Z, Sun ST. Interlaminar fracture toughness of a graphite/epoxy multidirectional composite. J Eng Mater Tech. 2000;122:428-433. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1289027>
- 8 Sun CT, Zheng S. Delamination characteristics of double-cantilever beam and end-notched flexure composite specimens. Compos Sci Technol. 1996;56:451-459. [http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538\(96\)00001-2](http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538(96)00001-2)
- 9 International Organization for Standardization. ISO 15024:2001: Fibre-reinforced plastic composites - Determination of mode I interlaminar fracture toughness,  $G_{Ic}$ , for unidirectionally reinforced materials. Geneva; 2001.

- 10 American Society for Testing And Materials. ASTM D5528-01(2007): Standard test method for Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. West Conshohocken; 2007.
- 11 American Society for Testing And Materials. ASTM 790-07: Standard test method Flexural properties of unreinforced and reinforces plastics and electrical insulating materials. West Conshohocken; 2007.
- 12 Massabò R, Brandinelli I, Cox BN. Mode I weight functions for an orthotropic double cantilever beam. *International J Eng Sci.* 2003;41:1497-1518. [http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7225\(03\)00029-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7225(03)00029-6)
- 13 Laksimi A, Benzeggagh ML, Jing G, Hecini M, Roelandt JM. Mode I interlaminar fracture of symmetrical cross-ply composites. *Compos Sci Technol.* 1991;41:147-164. [http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538\(91\)90025-K](http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538(91)90025-K)
- 14 Schipperen JHA, Borst R. A numerical analysis of mixed-mode delamination in carbon-epoxy prepregs. *Compos Struct.* 2001;54:445-451. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00116-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00116-7)
- 15 Allix O, Ladevèze P, Gilletta D, Ohayon R. A damage prediction method for composite structures. *Int J Numer Meth Eng.* 1989;27: 271-283. <http://dx.doi.org/10.1002/nme.1620270205>
- 16 Corigliano A. Damage and fracture mechanics techniques for composites structures. In Milne I, Ritchie RO, Karihaloo B, editors. *Comprehensive structural integrity - fracture of materials from nano to macro: numerical and computational methods.* Amsterdam: Elsevier Pergamon; 2003. p. 459-539. PMID:12768374.
- 17 Allix O, Corigliano A. Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens. *Int J Fracture.* 1996; 77:111-140. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00037233>
- 18 Lévêque L. Analyse de la tenue au d'elaminage des composites stratifi'es: identification d'un mod`ele d'interface interlaminaire (PhD thesis). Cachan: École Normale Supérieure de Cachan; 1998.
- 19 American Society for Testing and Materials ASTM D 3039/3039M (2008). *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, 2008.

Recebido em: 16/03/2012

Aceito em: 30/04/2013