



ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE DELAMINAÇÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS¹

Gigliola Salerno²

Resumo

Materiais compósitos se transformaram 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 este fator, o objetivo deste trabalho é, a partir de uma anterior identificação das propriedades à fratura do material compósito carbono-epóxi, simular numericamente o processo de delaminação através da ferramenta computacional Abaqus. 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 modo I e II. Simulações numéricas foram realizadas, estas embasadas em modelo a dano para interface, que considera a energia de deformação e a força de ativação, à partir da qual inicia-se a trinca. Resultados preliminares mostram a capacidade das simulações numéricas em representar os dados experimentais.

Palavras-chave: compósitos laminados; delaminação; dano; simulações numéricas.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL DELAMINATION ANALYSIS FOR COMPOSITE MATERIALS

Abstract

Composite materials became an advantageous option due high specific strength and stiffness; nowadays the applications grow. The unidirectional fiber composite material has 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 the finite element code Abaqus. 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 mode 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; Damage; Numerical simulations.

¹ *Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Doutora em Engenharia Estrutural pelo Politecnico di Milano. Universidade Nove de Julho, Departamento de Ciências Exatas, Engenharia de Produção Mecânica.*

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, 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 (Figura 1), tal fato caracteriza uma vantagem considerável.^(1,2) 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 um ou mais 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.

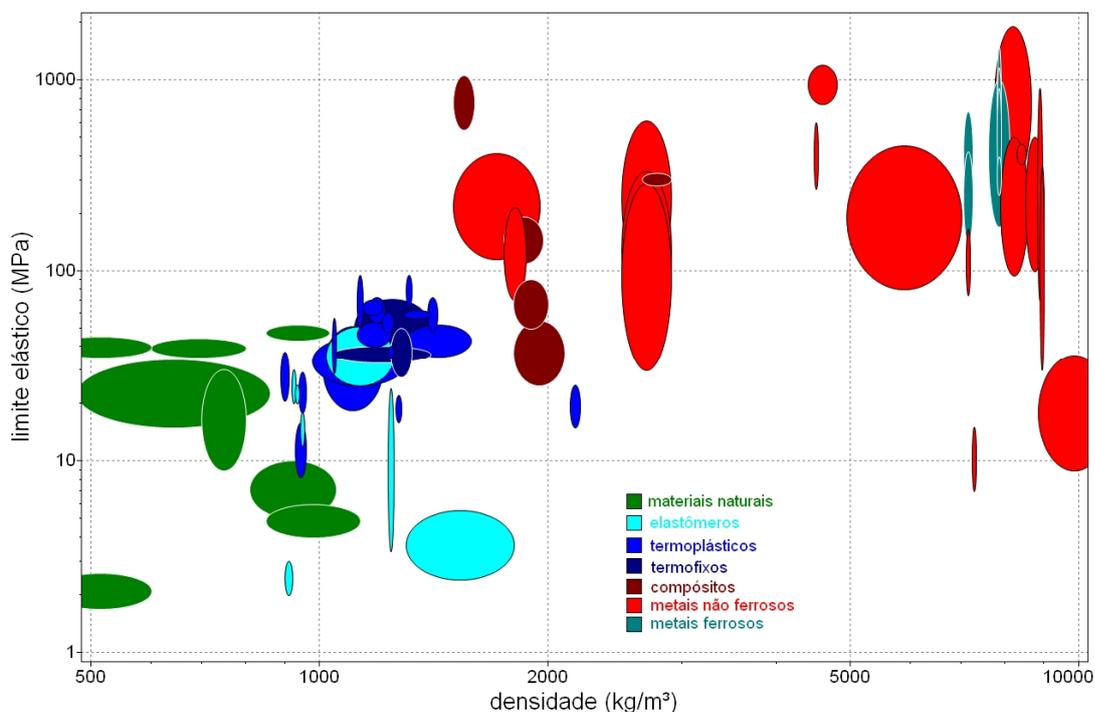


Figura 1. Diagrama resistência-densidade, criado com o software CES EduPack.⁽³⁾

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento quanto à delaminação de um material compósito MTM-57 laminado, considerado transversalmente isotrópico, simétrico e balanceado, composto de lâminas [0/90], as quais são formadas por fibras longas unidirecionais de carbono e matriz de epóxi. Ensaios de delaminação foram realizados em interfaces 0/0 e 0/90 em modo I e II de abertura, os quais forneceram as respectivas energias de fratura. A partir dos dados experimentais, um modelo de dano para interface foi implementado 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 prevê 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 macro-escala. Micro-escala considera a estrutura compósita heterogênea: a fibra, a interface matriz/fibra etc. A meso-escala define o laminado composto pela lâmina e interface associada (Figura 2). A macro-escala considera, por fim, o comportamento global do compósito laminado.^(4,5)

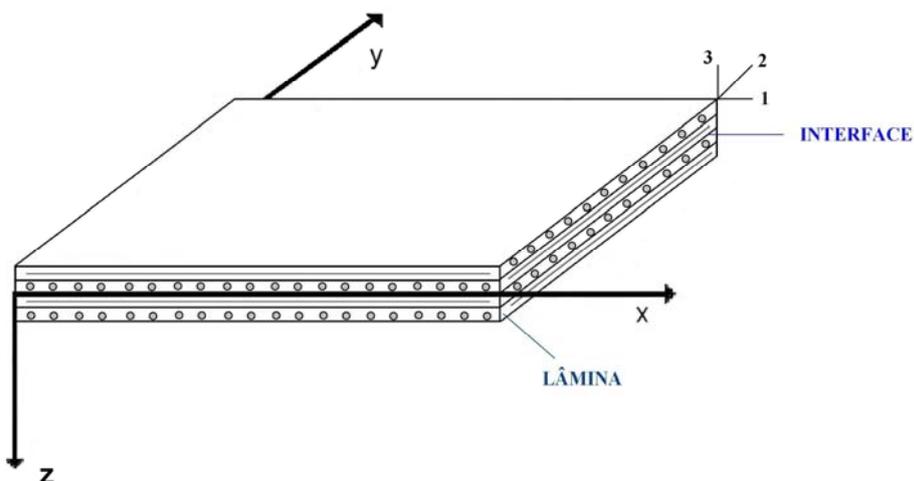


Figura 2. Sistema global de referência do material compósito (x-y-z) e sistema de referência de uma lâmina (1-2-3). Meso-escala: lâmina e interface.⁽⁶⁾

Existem vários mecanismos de fratura considerando a microestrutura, ou seja, a interação fibra/matriz.^(1,5) 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 resistência transversal é muito menor do que aquela axial que justifica o crescimento das fraturas paralelas às direções transversais das fibras.⁽⁷⁾ A fratura, denominada local, se verifica em uma ou mais lâminas antes da fratura do laminado. Estas fraturas locais se limitam entre uma lâmina e outra; quando as fraturas alcançam a interface, as tensões intralaminas provocam a propagação das delaminações (Figura 3) entre as lâminas, o processo de fratura mais catastrófico.

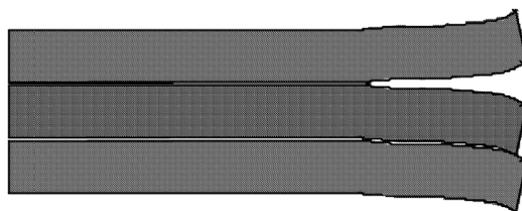


Figura 3. Delaminações entre as diversas lâminas.

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).^(8,9) Os ensaios de delaminação em modo I (abertura) são denominados DCB (Figura 4), onde a é o comprimento

total da delaminação, de acordo com a norma ISO 15024⁽¹⁰⁾ no caso de interface 0/0, quando considerada a interface 0/90 a norma ASTM D5528⁽¹¹⁾ é utilizada. Ambos são métodos que consideram a compliância da curva força vs. deslocamento. Os ensaios de delaminação em modo II (cisalhamento) são denominados ENF (Figura 5) de acordo com a norma ASTM D790⁽¹²⁾ no caso de interface 0/0, quando considerada a interface 0/90 o método utilizado é baseado na compliância e considera a teoria da laminação, a qual se refere à homogeneização do laminado.⁽⁸⁾ Para um material transversalmente isotrópico as energias críticas de fratura em modo II e modo III são consideradas iguais devido ao plano de isotropia.

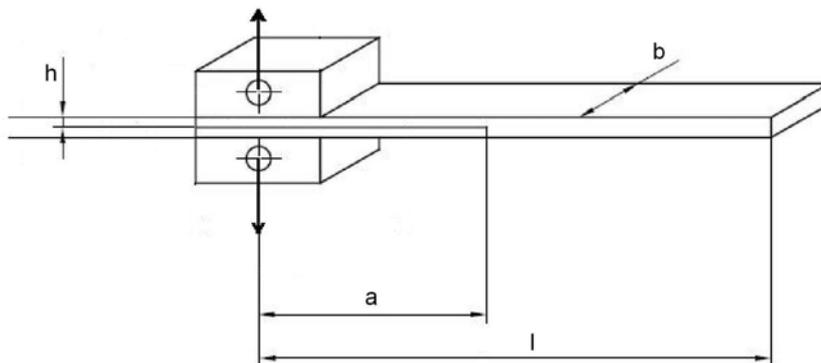


Figura 4. Esquema do ensaio DCB.⁽⁶⁾

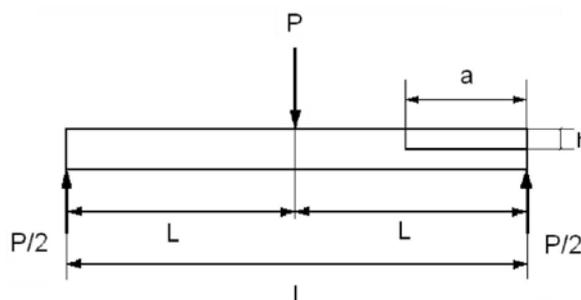


Figura 5. Esquema do ensaio ENF.⁽⁶⁾

Os modelos a dano para interface relacionam a descontinuidade de deslocamento \$[u_i]\$ com as trações \$(t_i)\$. 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 6), a qual pode ser atribuída uma lei constitutiva.⁽¹³⁾ A energia de deformação elástica por unidade de superfície é dada por \$(E_d)\$:

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

$$t_i = \left. \frac{\partial E_d}{\partial [u_i]} \right|_{d_i}; \quad Y_i \equiv - \left. \frac{\partial E_d}{\partial d_i} \right|_{[u_i]}$$

em que \$Y_i\$ são as forças de ativação em cada direção, \$d_i\$ as variáveis de dano. No modelo elasto-dano,^(14,15) a evolução do dano, \$f(Y_i)\$, é governada por uma lei não-associada:

$$f(Y_i) = \left((Y_3)^\alpha + (a_1 Y_1)^\alpha + (a_2 Y_2)^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}}; \quad \bar{Y} = \max_{\tau \leq \tau} \{f(Y_i)\}$$

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

em que α 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. Quando a interface é completamente degradada em modo I, esta é considerada degradada nos modos II e III.

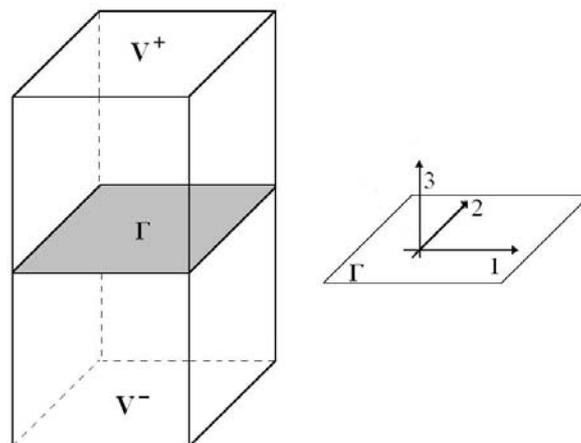


Figura 6. Interface Γ .⁽¹⁴⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Análise Experimental

O material estudado é um compósito de fibras de carbono unidirecionais e resina epóxi que as envolve, chamado MTM-57. Ensaio de tração e de torção realizados em Salerno⁽⁶⁾ conforme a norma ASTM D3039, forneceram as propriedades elásticas da lâmina do material compósito (Figura 7). No mesmo trabalho,⁽⁶⁾ foram realizados ensaios de delaminação DCB (normas ISO15024⁽¹⁰⁾ e D 5528-01⁽¹¹⁾) e ENF (ASTM D790) para as interfaces 0/0 e 0/90 (Figura 8), dos quais foram obtidas as energias críticas de fratura (G_{Ic} e G_{IIc}).



Figura 7. Configuração dos ensaios de tração (esquerda) e torção (direita).⁽⁶⁾

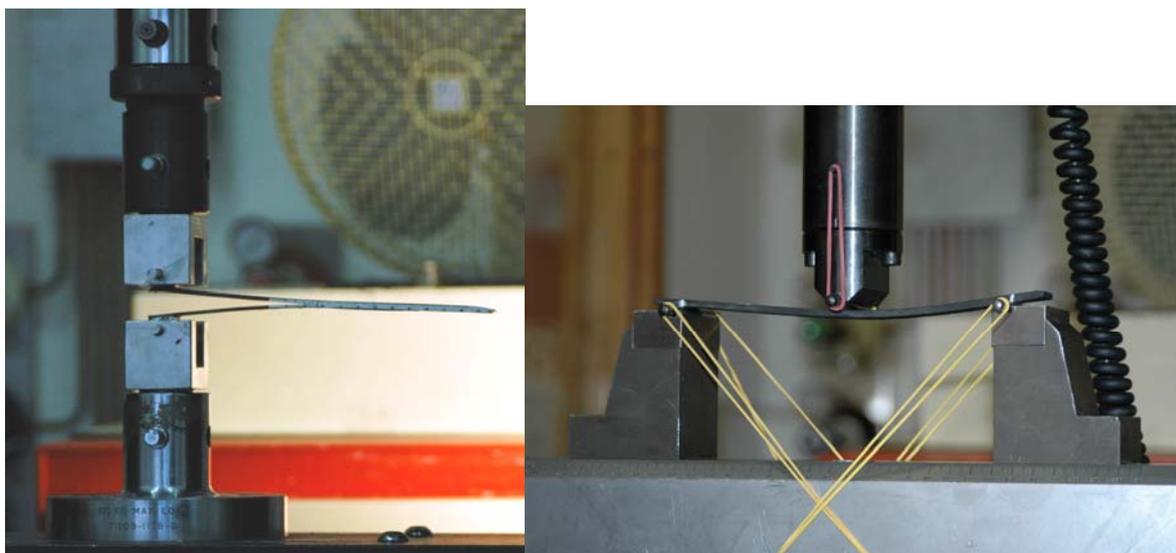


Figura 8. Configuração dos ensaios DCB (esquerda) e ENF (direita).⁽⁶⁾

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. Sendo assim, simulações numéricas realizadas em Abaqus 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 subroutine UMAT em Abaqus. 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 elasto-dano.

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.

Tabela 1. Propriedades elásticas da lâmina⁽⁶⁾

E₁₁	171430 ± 33900	MPa
E₂₂	7523 ± 1195	MPa
G₁₂	3560 ± 1022	MPa
G₂₃	3277 ± 225	MPa
ν₁₂	0.3 ± 0.09	

Tabela 2. Energias críticas de fratura⁽⁶⁾

Interface			
0°/0°	G_{Ic}	239 ± 22	J/m²
	G_{IIc}	2944 ± 182	J/m²
0°/90°	G_{Ic}	687 ± 88	J/m²
	G_{IIc}	837 ± 235	J/m²

Os resultados obtidos para cinco ensaios DCB, no caso da interface 0/0, são mostrados nas curvas força vs. deslocamento (Figura 9). Nesta configuração ocorre o processo de *fiber-bridging* (Figura 10), um fenômeno devido ao entrelaçamento das fibras na interface 0/0, pois estas estão na mesma direção. Este entrelaçamento provoca um ligeiro aumento da resistência durante o processo de propagação da delaminação (Figura 9) e a mantém praticamente constante até momentos que antecedem a ruptura total.

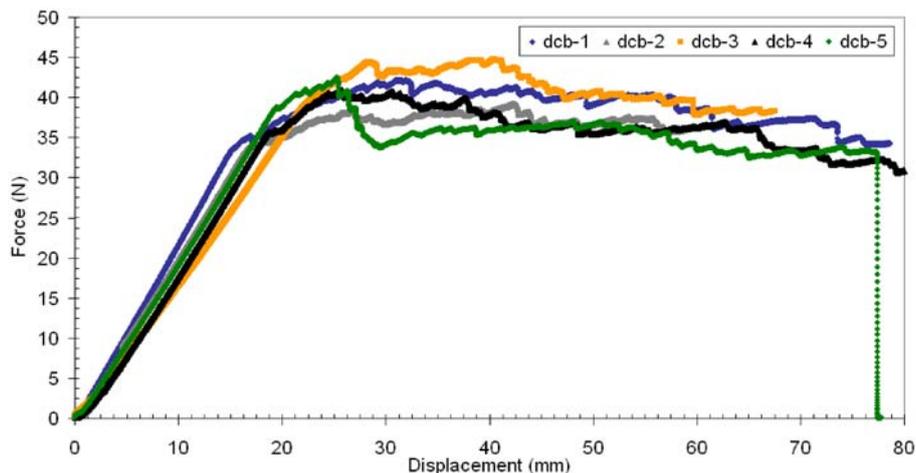


Figura 9. Ensaio DCB para interface 0/0: curvas força vs. deslocamento.⁽⁶⁾

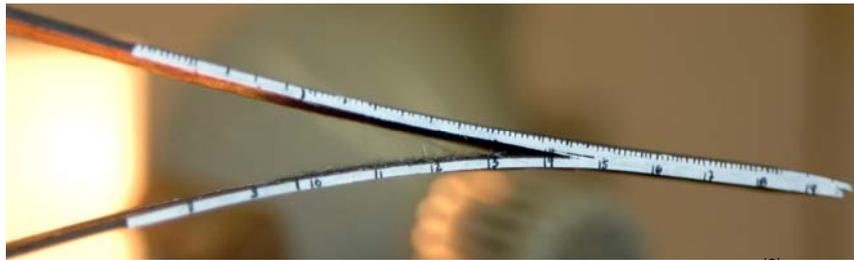


Figura 10. Ensaio DCB para interface 0/0: fiber-bridging.⁽⁶⁾

A simulação numérica realizada para o ensaio DCB interface 0/0, tende a reproduzir as condições do ensaio experimental, utilizando o modelo a dano para interface. Deste modo, o dano na interface é computado (Figura 11). Comparando os resultados em termos da curva força vs. deslocamento (Figura 12) observa-se que a curva numérica caracteriza o comportamento até o início da delaminação, a partir do momento em que esta começa a propagar e o efeito *fiber-bridging* se manifesta, as curvas divergem. Considerando o comprimento da delaminação em função do tempo (Figura 13), tem-se uma curva atípica (dcb1); os resultados experimentais e numéricos são similares nos 40 mm iniciais da propagação, passado este limite, as curvas divergem significativamente. Observa-se que após 140 mm, a delaminação tende a propagar-se rapidamente, caracterizando um processo instável.

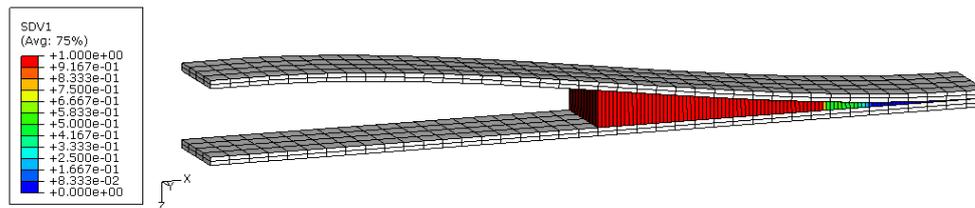


Figura 11. DCB para interface 0/0: dano computado na interface ao final da simulação.

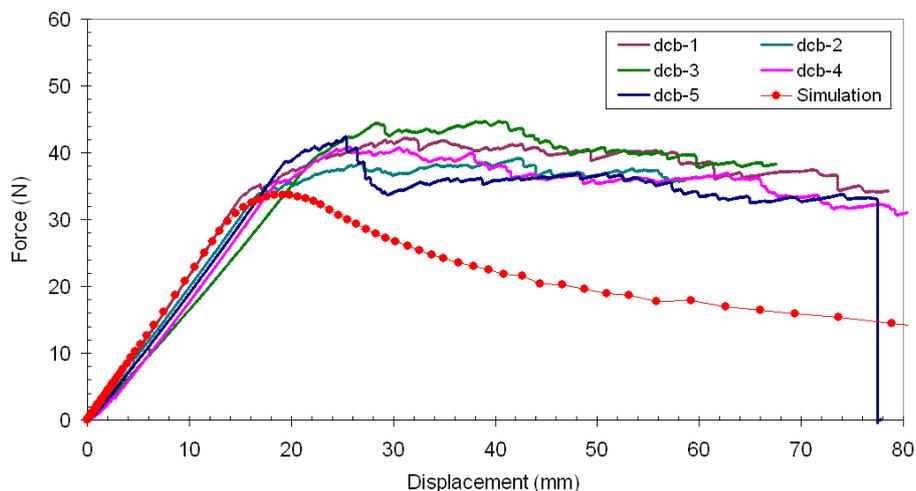


Figura 12. DCB para interface 0/0: curva força vs. deslocamento. Comparação entre dados experimentais e numéricos.

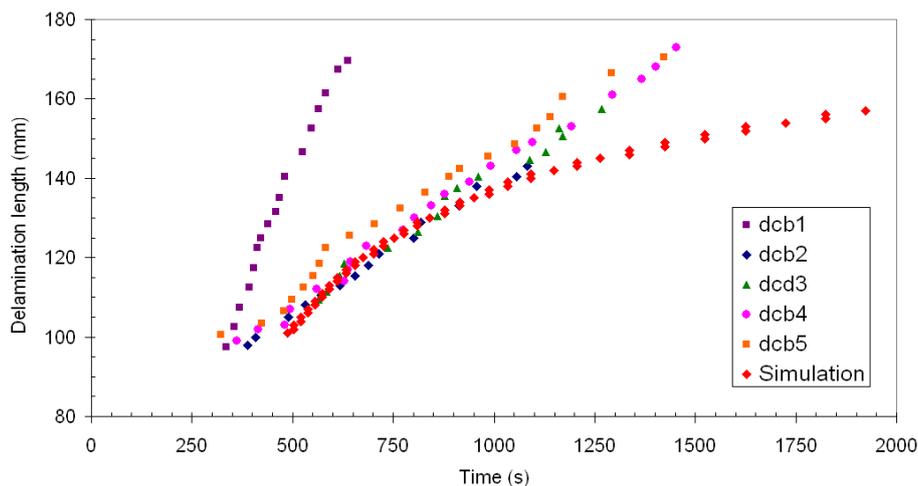


Figura 13. DCB para interface 0/0: curva comprimento da delaminação vs. tempo. Comparação entre dados experimentais e numéricos.

As curvas força vs. deslocamento (Figura 14) 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 15), desta forma, combinam-se os efeitos de fratura interlaminar e intralaminar. Este efeito pode ser observado na fractografia realizada em MEV (Figura 16).

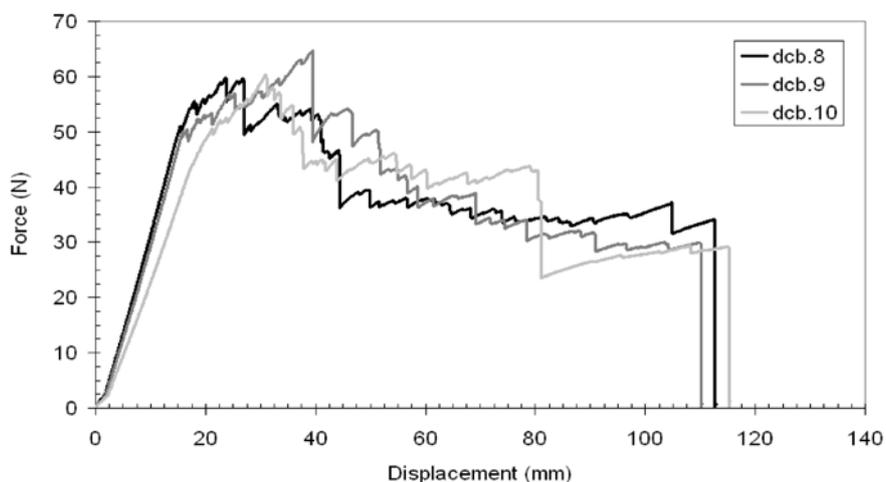


Figura 14. Ensaio DCB para interface 0/90: curvas força vs. deslocamento.⁽⁶⁾



Figura 15. Ensaio DCB para interface 0/90: a delaminação muda caminho preferencial.⁽⁶⁾

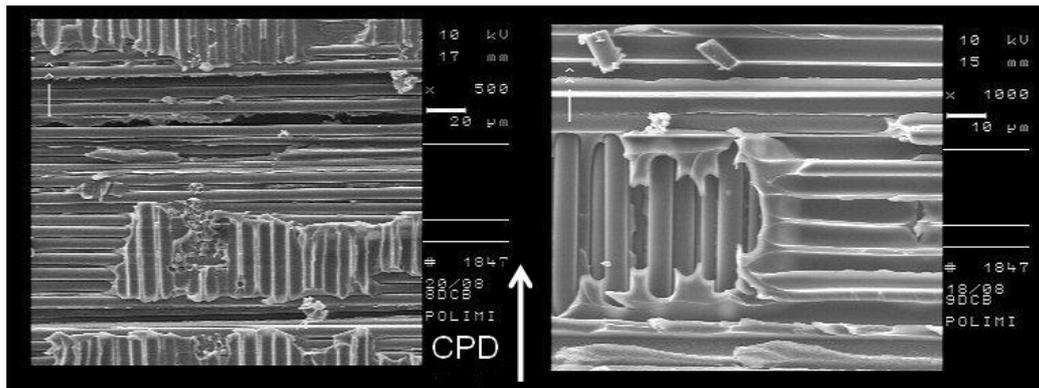


Figura 16. Ensaio DCB para interface 0/90: fractografia em MEV da área fraturada.⁽⁶⁾

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, o dano na interface é computado (Figura 17). Comparando os resultados em termos da curva força vs. deslocamento (Figura 18) 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 19), 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.

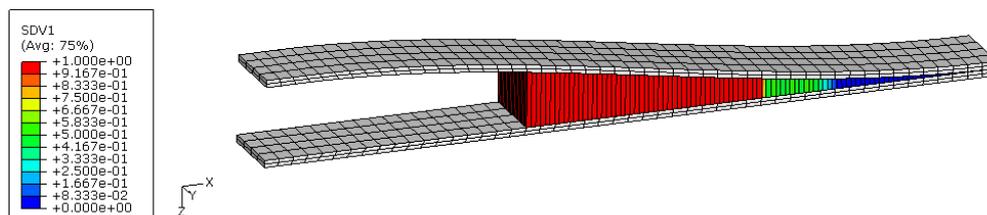


Figura 17. DCB para interface 0/90: dano computado na interface ao final da simulação.

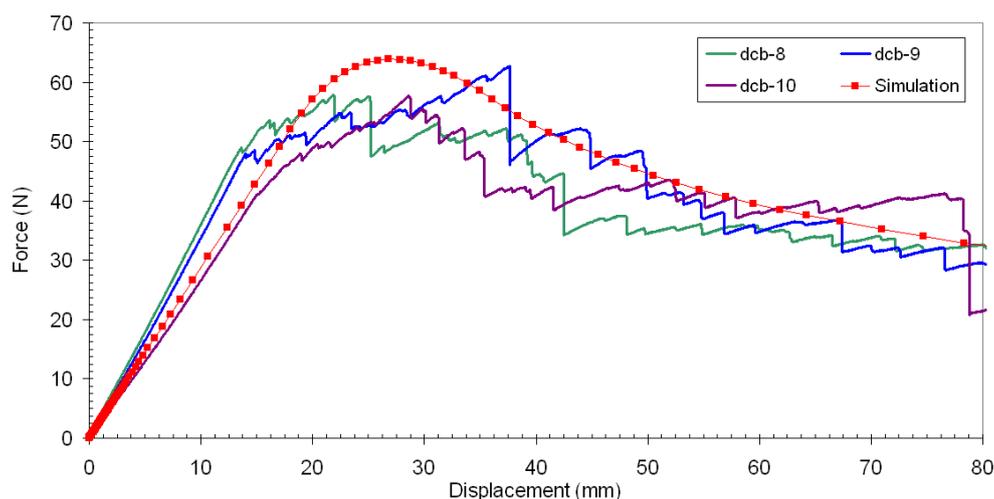


Figura 18. DCB para interface 0/90: curva força vs. deslocamento. Comparação entre dados experimentais e numéricos.

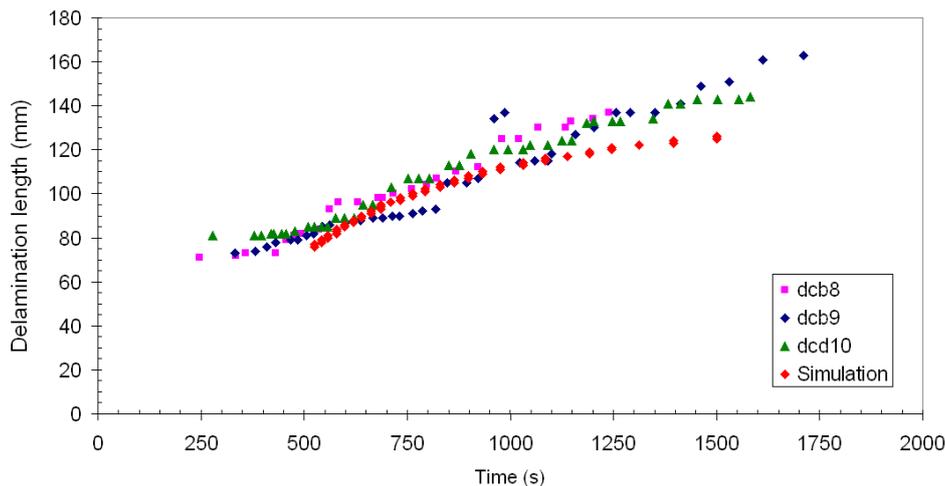


Figura 19. DCB para interface 0/90: curva comprimento da delaminação vs. tempo. Comparação entre dados experimentais e numéricos.

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, o principal mecanismo de dano. Com os resultados obtidos utilizando o modelo a dano proposto na seção 1.2 para a interface 0/0 observa-se o início da delaminação (Figura 12), porém o efeito *fiber-bridging* (Figura 10) não está incluso. 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 represente este comportamento, a partir do início da delaminação, a propagação desta, utilizando o modelo a dano para interface, se torna conservativa. No entanto, os resultados do modelo a dano aproximam-se dos comprimentos de trinca obtidos experimentalmente (Figura 13). Considerando a interface 0/90, esta tem um comportamento consideravelmente diferente daquela 0/0, o efeito *fiber-bridging* não existe, pois as fibras das lâminas adjacentes à interface estão orientadas perpendicularmente entre si. No entanto, a delaminação tende a movimentar-se entre as lâminas, percorrendo caminhos diferentes, de modo que se tenha uma delaminação com características intralaminar e interlaminar (Figuras 15 e 16), 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 18) e o comprimento da delaminação pelo tempo (Figura 19).

5 CONCLUSÃO

Pode-se observar que o modelo a dano atende a necessidade de caracterizar a delaminação utilizando os valores das energias críticas de fratura, no entanto quando fenômenos especiais, características inerentes a cada interface, são verificados, mostra-se necessária uma complementação. As simulações numéricas, contudo, se apresentam 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 a Stefano Mariani, Alberto Corigliano e Politecnico di Milano pela orientação e apoio nos estudos referentes às simulações numéricas e materiais compósitos.

REFERÊNCIAS

- 1 C.T. HERAKOVICH. Mechanics of fibrous composites. First edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1998.
- 2 P. PEDERSEN. Elasticity, anisotropy, laminates with matrix formulation, finite elements and an index to matrices. Technical University of Denmark, Denmark, 1998.
- 3 CES EduPack. <http://www.grantadesign.com/education/index.htm>, 2009.
- 4 P. LADEVÈZE. A damage computational approach for composites: basic aspects and micromechanical relations. Computational Mechanics, v. 17, p. 142–150, 1995.
- 5 P. LADEVÈZE, G. LUBINEAU. On a damage mesomodel for laminates: micro-meso relationships, possibilities and limits. Composites Science and Technology, v. 61, p. 2149-2158, 2001.
- 6 SALERNO, G. Damage analysis of composite laminates subject to low-velocity impacts. PhD thesis. Politecnico di Milano. Milano. April 2009.
- 7 P. LADEVÈZE, E. LE DANTEC. Damage modelling of the elementary ply for laminated composites. Composites Science and Technology, v. 43, p. 257–267, 1992.
- 8 Z. YANG AND S.T. SUN. Interlaminar fracture toughness of a graphite/epoxy multidirectional composite. Journal of Engineering Materials and Technology, v. 122, p. 428–433, 2000.
- 9 C.T. SUN, S. ZHENG. Delamination characteristics of double-cantilever beam and end-notched flexure composite specimens. Composites Science and Technology, v. 56, p. 451–459, 1996.
- 10 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). Fibre-reinforced plastic composites - Determination of mode I interlaminar fracture toughness, G_{Ic} , for unidirectionally reinforced materials. Standard E, 15024 edition, 2001.
- 11 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test method for Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. Standard D, 5528-01 edition, 2007.
- 12 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test method Flexural properties of unreinforced and reinforces plastics and electrical insulating materials. Standard D, 790-07 edition, 2007.
- 13 O. ALLIX, P. LADEVÈZE, D. GILLETTA, R. OHAYON. A damage prediction method for composite structures. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 27, p. 271–283, 1989.
- 14 A. CORIGLIANO. Damage and fracture mechanics techniques for composites structures. In I. Milne, R.O. Ritchie, and B. Karihaloo, editors, Comprehensive Structural Integrity - Fracture of Materials from Nano to Macro: Numerical and Computational Methods, p. 459–539, Amsterdam, 2003. Elsevier Pergamon.
- 15 O. ALLIX, A. CORIGLIANO. Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens. International Journal of Fracture, v. 77, p. 111–140, 1996.