

ANÁLISE NUMÉRICA DE LAMINADOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS SUJEITOS A DELAMINAÇÃO EM MODO MISTO I-II

Mariano Andrés Arbelo, arbelom@ita.br¹

Maurício Vicente Donadon, donadon@ita.br¹

Sérgio Frascino Müller de Almeida, frascino@ita.br¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronautica, CTA-ITA-IEM, Pça Mal. Eduardo Gomes, N° 50, 12228-900, São José dos Campos-SP, Brasil

Resumo: *O presente trabalho é focado no desenvolvimento de um modelo de elementos finitos que permita simular o fenômeno de delaminação em Modo Misto I-II em laminados de materiais compósitos. Uma nova técnica de modelagem foi estudada e desenvolvida para este propósito utilizando uma lógica de contacto implementada no software de elementos finitos ABAQUS/Explicit. Os resultados numéricos são comparados com resultados experimentais obtidos para três valores de mixidade, 25%, 50%, 75%. Uma boa correlação entre os valores de carga vs. deslocamento, numéricos e experimentais foi obtida utilizando a técnica de modelagem proposta nesse trabalho. Vantagens e desvantagens do modelo numérico proposto são discutidos no presente trabalho.*

Palavras-chave: *materiais compósitos, delaminação, mecânica da fratura, mecânica do dano, elementos finitos*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o estudo do fenômeno de delaminação em materiais compósitos é de importância crítica para aplicações de alto desempenho na indústria. Com o aumento da utilização dos materiais compósitos em aplicações aeroespaciais, o entendimento do processo de delaminação é essencial para a prevenção de falhas catastróficas assim como também o desenvolvimento de estruturas compósitas que sejam tolerantes ao dano.

Delaminação é um modo de falha interlaminar que acontece entre duas camadas adjacentes de um laminado devido a elevadas tensões interlaminares entre as faces superior e inferior da interface. Os modos de falha por delaminação podem ser classificados em Modo I, Modo II, Modo III e Modo Misto de acordo com a tensão predominante atuando na interface. Por exemplo, no Modo I, o fenômeno de delaminação acontece exclusivamente devido à tensão normal atuando na interface, gerando o descolamento. Modo II e Modo III são relacionados a tensões de cisalhamento fora do plano resultado do “escorregamento” relativo entre as fases da camada superior e inferior. O Modo Misto é uma combinação dos modos I, II e III.

Diferentes técnicas para a modelagem do fenômeno de delaminação têm sido propostas por muitos pesquisadores nos anos recentes. Critérios baseados nas tensões máximas como as propostas por (Lee, 1980; Kim e Soni, 1984; Brewer e Lagace, 1988) são apropriados para a modelagem da iniciação da delaminação. Por outro lado, estes modelos não conseguem reproduzir de maneira realista a propagação da delaminação. Ainda, estes modelos requerem um cálculo preciso das tensões que geralmente apresentam singularidades na ponta da trinca ou nas bordas livres. Portanto, se utilizados elementos finitos para o cálculo das tensões, estes modelos tornam-se dependentes da malha utilizada.

Aproximações numéricas baseadas na mecânica da fratura requerem uma imperfeição inicial e são utilizadas em conjunto com técnicas como *Virtual Crack Closure (VCC)* para a determinação da taxa de liberação de energia de deformação.

Mi et al. (1998), propuseram um elemento de interface para a modelagem de delaminação em materiais compósitos. O elemento de interface é confinado entre dois elementos de oito nós isoparamétricos de deformação plana. Uma relação tensão – deslocamento relativo bi-linear foi utilizada para a interface do material e critérios de interação linear e quadrático foram utilizados para a predição do Modo Misto. Para o descarregamento, um modelo de dano linear foi adotado, onde se assume que o material descarrega diretamente na direção da origem da curva tensão-deslocamento relativo. Boas correlações foram obtidas entre os resultados de simulações, experimentos e resultados analíticos para Modo I, Modo II e Modo Misto.

Wisnom e Chang (2000), modelaram delaminação em laminados *cross-ply* utilizando um conjunto de molas não lineares. Um modelo de material elasto – perfeitamente plástico foi assumido para as molas. De acordo com esta aproximação, as molas são definidas com uma alta rigidez inicial no regime elástico até um ponto onde determinado valor de força tem sido atingido, a partir deste ponto, novos deslocamentos são permitidos com um valor de força

constante até a falha da mola. A área definida na porção inferior da curva tensão – deslocamento relativo do elemento de mola fornece a tenacidade a fratura interfacial. Uma boa correlação entre os valores numéricos e experimentais foi obtida.

Baseado no trabalho proposto por Mi et al (1998), Camanho e Dávila (2002), propuseram um elemento coesivo de interface para modo misto para a modelagem de delaminação em materiais compósitos. Os autores obtiveram uma boa correlação entre os valores numéricos e os resultados experimentais para ensaios com corpos de prova DCB, ENF e MMB. Este elemento de interface está disponível atualmente no software de elementos finitos ABAQUS® e também no LS-DYNE3D® Explicit mediante o uso de sub-rotinas do tipo *user-defined material models* e elementos hexagonais por Pinho et al. (2005). Uma versão alternativa deste modelo para a modelagem dinâmica do fenômeno de delaminação em materiais compósitos foi proposto por Iannucci, 2006.

O presente trabalho utiliza uma técnica de modelagem para delaminação em Modo Misto I-II-III com uma lógica de contato desenvolvida por Donadon e Almeida (2009). Os resultados numéricos são comparados com resultados experimentais obtidos do ensaio MMB com três graus de mixidade, 25%, 50% e 75%.

2. FORMULAÇÃO DO MODELO DE INTERFACE

A formulação apresentada a seguir foi utilizada para a modelagem via elementos finitos dos corpos de prova de delaminação em Modo Misto I / II

2.1. Lei constitutiva

A lei constitutiva utilizada para definir o comportamento do material na interface é definida por Donadon e Almeida (2009), e denominada linear-polinomial. A vantagem deste tipo de comportamento é que se apresenta numericamente mais estável nos pontos de iniciação do dano e de falha total.

O modelo coesivo para a simulação do efeito de delaminação foi implementado no ABAQUS® 6.5-1 (2005), via rotina *VUMAT (User Defined Material Model)*.

2.2. Delaminação em Modo I

O comportamento da interface para o Modo I de abertura é dado pela Eq. (1):

$$\sigma_I = K_{\omega\omega} (1 - d_I(\omega)) \omega \quad (1)$$

onde a lei de evolução do dano é definida em termos do deslocamento relativo normal, é dada pela Eq. (2):

$$d_I(\omega) = 1 - \frac{\omega_o}{\omega} [1 + k_I^2(\omega)(2k_I(\omega) - 3)] \quad (2)$$

onde

$$k_I(\omega) = \frac{\omega - \omega_o}{\omega_f - \omega_o} \quad (3)$$

com $\omega_o = \sigma_I^o / K_{\omega\omega}$ e σ_I^o é a resistência da interface ao longo da espessura. $K_{\omega\omega}$ é a rigidez da interface ao longo da espessura dada em termos do modulo de elasticidade do adesivo ao longo da espessura, esta é, $K_{\omega\omega} = E_{zz} / h_0$ onde h_0 é a espessura inicial elemento associado com a configuração não deformada.

A taxa de energia de deformação liberada associada a delaminação em Modo I é definida pela área abaixo da curva tensão deslocamento relativo como:

$$G_I = \int_0^{\omega_f} \sigma_I d\omega \quad (4)$$

2.3. Delaminação em Modo II e III

Analogamente ao Modo I, o comportamento da interface é definido em termos do deslocamento resultante pelas tensões de cisalhamento. Para ambos Modos II e III, as equações são:

$$\sigma_{II} = K_{uu} (1 - d_{II}(u)) u \quad (5)$$

$$\sigma_{III} = K_{vv} (1 - d_{III}(v)) v \quad (6)$$

A lei de evolução do dano em termos da lei constitutiva utilizada respectivamente é:

$$d_{II}(u) = 1 - \frac{u_o}{u} [1 + k_{II}^2(u)(2k_{II}(u) - 3)] \quad (7)$$

onde

$$k_{II}(u) = \frac{u - u_o}{u_f - u_o} \quad (8)$$

$$G_{II} = \int_0^{u_f} \sigma_{II} du \quad (9)$$

$$u_f = \frac{2G_{IIc}}{\sigma_{II}^o} \quad (10)$$

e

$$d_{III}(v) = 1 - \frac{v_o}{v} [1 + k_{III}^2(v)(2k_{III}(v) - 3)] \quad (11)$$

onde

$$k_{III}(v) = \frac{v - v_o}{v_f - v_o} \quad (12)$$

$$G_{III} = \int_0^{v_f} \sigma_{III} dv \quad (13)$$

$$v_f = \frac{2G_{IIIc}}{\sigma_{III}^o} \quad (14)$$

com $u_o = \sigma_{II}^o / K_{uu}$ e σ_{II}^o é a resistência da interface ao cisalhamento transversal na direção X-Z. K_{uu} é a rigidez da interface ao cisalhamento dada em termos do modulo de cisalhamento do adesivo, esta é, $K_{uu} = G_{xz} / h_0$ onde h_0 é a espessura inicial elemento associado com a configuração não deformada. Semelhantemente, $v_o = \sigma_{III}^o / K_{vv}$ e σ_{III}^o é a resistência da interface ao cisalhamento transversal na direção Y-Z. K_{vv} é a rigidez da interface ao cisalhamento dada em termos do modulo de cisalhamento do adesivo, esta é, $K_{vv} = G_{yz} / h_0$.

2.4. Delaminação em Modo Misto

Para detectar a iniciação do dano para delaminação em Modo Misto o modelo é baseado no critério das tensões quadráticas:

$$\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_I^o} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{II}^o} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{III}}{\sigma_{III}^o} \right)^2 = 1 \quad (15)$$

A Eq. (15) é valida para $\sigma_I > 0$. A formulação é combinada com o critério de propagação do dano apresentado por Donadon e Almeida (2009) para Modo Misto I/II. O critério é baseado em termos da interação entre a energia de deformação liberada e a tenacidade à fratura interlaminar.

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}} \right)^\lambda + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}} \right)^\lambda + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIc}} \right)^\lambda = 1 \quad (16)$$

onde G_{Ic} e G_{IIc} são as tenacidades a fratura interlaminar associadas aos Modos I e II respectivamente. G_I é a taxa de energia de deformação liberada associada ao Modo I. Neste trabalho, assume-se que $G_{IIIc} = G_{IIc}$, devido a que o estudo do fenômeno de delaminação em Modo III está fora do escopo apresentado.

As equações de evolução do dano resultantes são apresentadas a seguir:

$$d_m(\bar{\delta}) = 1 - \frac{\bar{\delta}_o}{\bar{\delta}} \left[1 + k_m^2(\bar{\delta})(2k_m(\bar{\delta}) - 3) \right] \quad (17)$$

onde

$$k_m(\bar{\delta}) = \frac{\bar{\delta} - \bar{\delta}_o}{\bar{\delta}_f - \bar{\delta}_o} \quad (18)$$

onde $\bar{\delta}_o$ é o vetor de deslocamento no ponto de iniciação do dano e $\bar{\delta}_f$ é o deslocamento final resultante associado com a descolagem total da interface.

Finalmente, para Modo Misto, a relação tensão – deslocamento é dada pela Eq. (19):

$$\{\sigma\} = K(d_m(\bar{\delta}))\{\delta\} \quad (19)$$

3. DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO MODELO DE DELAMINAÇÃO EM MODO MISTO I-II

Para o estudo dos efeitos de delaminação em Modo Misto, desenvolvimento e verificação do modelo de elementos finitos adota-se o padrão de ensaio denominado *Mixed Mode Bending* (MMB) seguindo as recomendações da norma ASTM D6671-06 (2009).

3.1. Características do corpo de prova do ensaio MMB

Como mostrado na Fig. 1, o corpo de prova (cdp) utilizado no ensaio MMB consiste em um laminado de material compósito de geometria retangular com uma trinca artificial gerada pela colocação de um filme antiaderente no plano médio do cdp. Um conjunto de forças é aplicado no cdp pelo dispositivo de ensaio de maneira que, dependendo da distância entre os apoios do cdp e os pontos de aplicação da carga, o cdp terá uma carga de flexão no ponto médio que gera uma falha por delaminação em Modo II e uma força de abertura no extremo do cdp que apresenta uma delaminação inicial, gerando um modo de falha em Modo I.

No presente trabalho foram estudadas três configurações do ensaio, variando o grau de mixidade entre os modos de delaminação I e II em 25%, 50% e 75%.

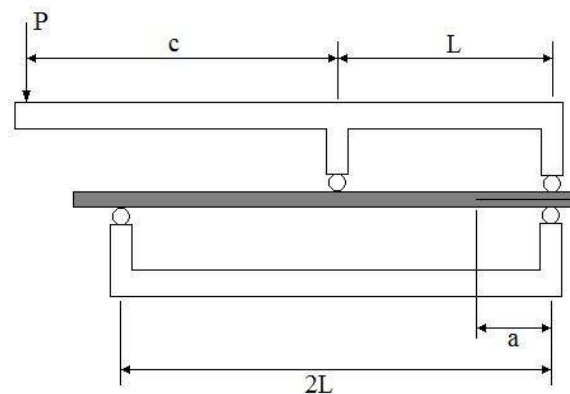


Figura 1. Esquema do cdp e dispositivo de ensaio *Mixed Mode Bending*.

O corpo de prova foi fabricado com 16 camadas de tecido de fibra de carbono pré impregnado com matriz epoxi. As propriedades mecânicas elásticas do material utilizado para a fabricação dos corpos de prova para o ensaio de delaminação em Modo Misto são apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas do tecido de fibra de carbono pré-impregnado.

Módulo de elasticidade na direção longitudinal, E_1 (GPa)	60.8
Módulo de elasticidade na direção transversal, E_2 (GPa)	58.25
Módulo de cisalhamento no plano, G_{12} (GPa)	4.55
Coefficiente de Poisson, ν_{12}	0.07

As propriedades adotadas para a modelagem da interface dos cdp's por onde a trinca deve propagar são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas da interface.

h interface (mm)	E_3 (Pa)	$G_{13} = G_{23}$ (Pa)
0.021	$2,97 \times 10^9$	$2,97 \times 10^9$
N (Pa)	S_{13} (Pa)	S_{23} (Pa)
$2,97 \times 10^9$	$2,97 \times 10^9$	$2,97 \times 10^9$
G_I (J/m²)	G_{II} (J/m²)	G_{III} (J/m²)
585	3500	3500

Notar que o valor G_{III} foi assumido igual a G_{II} devido a dificuldade de caracterização experimental deste valor e por não ser de relevância no presente estudo.

Os valores geométricos característicos dos cdp utilizados para o estudo de delaminação em Modo Misto são mostrados na Tab. 3.

Tabela 3. Geometria do cdp utilizado para o ensaio MMB.

a_0 (mm)	37,5
Espessura (mm)	3,4
Largura (mm)	20
Comprimento (mm)	167,5

Os parâmetros L e c adotados para o dispositivo de ensaio e o modelo de elementos finitos considerando os diferentes graus de mixidade são apresentados na Tab. 4.

Tabela 4. Setup do dispositivo de ensaio MMB.

L (mm)	62,0
c para mixidade = 25% (mm)	96,8
c para mixidade = 50% (mm)	51,8
c para mixidade = 75% (mm)	35,9

3.2. Modelo de elementos finitos do ensaio MMB

O software utilizado para o desenvolvimento do modelo de elementos finitos foi ABAQUS[®] 6.5-1. Para a modelagem, foi utilizado um procedimento de análise quase estática. Utilizamos o procedimento denominado *Dynamic Explicit* para o estudo do comportamento dos cdp's sujeitos a delaminação em Modo Misto.

O procedimento de análise dinâmica no ABAQUS[®] / *Explicit* é baseado na aplicação de uma regra de integração explícita juntamente com a utilização de matrizes de massa diagonais. As equações de movimento para o corpo são integradas usando a regra de integração das diferenças centrais (ABAQUS[®] 6.5-1, 2005).

O corpo de prova foi discretizado em três partes; duas semi-vigas de material elástico com a metade da espessura do laminado e uma interface entre ambas com a espessura equivalente a 1/10 da espessura de uma camada do laminado.

A modelagem do corpo de prova foi abordada utilizando uma configuração mista, considerando elementos tipo casca (bidimensionais) para as duas semi-vigas e por outro lado, uma camada de elementos sólidos (tridimensionais), com um elemento na espessura, que simula a interface entre as duas semi-vigas por onde a trinca deverá-se propagar. Em ambos casos, foram considerados um elemento ao longo da largura b do corpo de prova.

Adicionalmente o dispositivo de ensaio foi modelado utilizando equações de restrição e peças formadas por elementos infinitamente rígido bidimensionais.

O carregamento foi simulado com deslocamentos aplicados nos nós da alavanca de carga, considerada infinitamente rígida. As condições de contorno também foram idealizadas. Assume-se também contato ideal entre as faces das semi-vigas e entre a semi-viga inferior e o rolete traseiro. Já os pontos de fixação entre a alavanca de carga e a semi-viga superior assim como e o ponto de fixação na frente da semi-viga inferior foram simulados com equações de restrição.

O elemento de casca bidimensional S4R foi utilizado para a modelagem de cada uma das semi-vigas do corpo de prova. Este elemento possui quatro nós e integração reduzida. Foi adotado para a análise um ponto de integração para cada camada do laminado de cada semi-viga. Desta maneira, cada elemento têm oito pontos de integração ao longo da espessura o que permite uma representação aceitável da rigidez a flexão do laminado. O elemento sólido utilizado para a modelagem da interface entre as semi-vigas por onde a trinca deverá propagar é denominado C3D8R. O elemento C3D8R é um elemento tipo hexaedro, com oito nós e integração reduzida.

As junções entre a interface sólida e cada uma das semi-vigas foi modelada utilizando o comando *tie* entre as superfícies. Também foi considerando um off-set entre as mesmas correspondente com a metade da espessura de cada semi-viga.

O modelo do corpo de prova assim definido tem 2348 elementos.

A Fig. 2 apresenta o modelo de elementos finitos utilizado para a análise MMB onde a região da interface indicada em vermelho mostra os elementos com falha por delaminação.

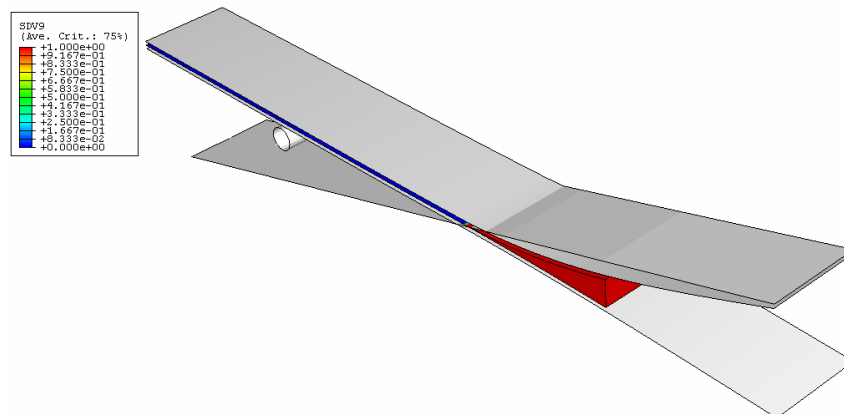


Figura 2. Modelo de elementos finitos do ensaio MMB.

3.3. Resultados obtidos

Os resultados obtidos das análises são apresentados nas Figs. 3 - 5. Note a boa correlação entre o modelo numérico e os resultados experimentais obtidos dos ensaios.

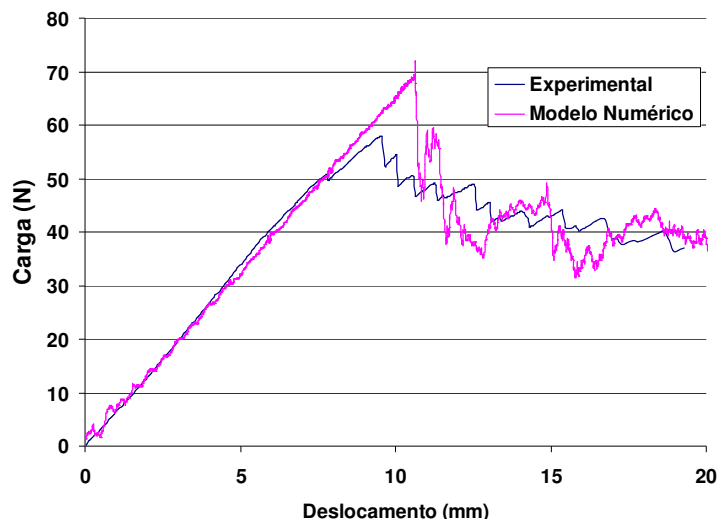


Figura 3. Curva de carga x deslocamento do modelo numérico MMB com 25% de Mixidade.

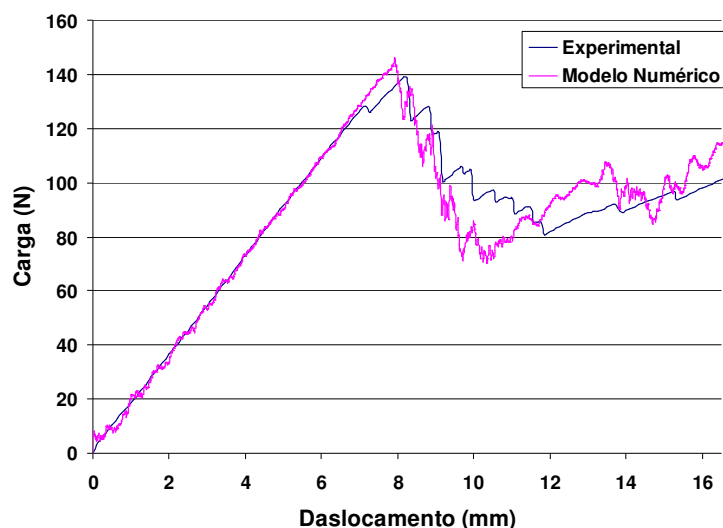


Figura 4. Curva de carga x deslocamento do modelo numérico MMB com 50% de Mixidade.

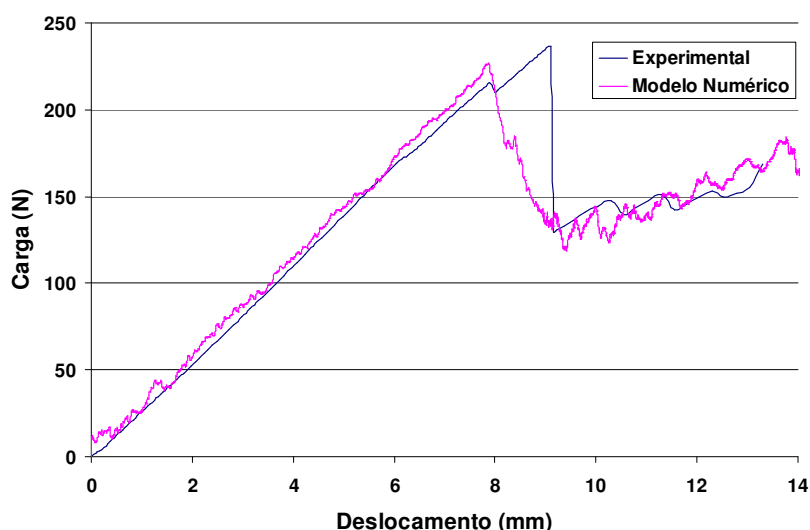


Figura 5. Curva de carga x deslocamento do modelo numérico MMB com 75% de Mixidade.

Observa-se uma boa correlação da rigidez inicial do sistema, o que permite afirmar que a modelagem mista, com elementos de casca nas semi-vigas, permite uma boa representação do comportamento elástico da estrutura. As pequenas variações entre os resultados experimentais e numéricos no valor da carga de iniciação da delaminação são devido a presença de imperfeições na raiz da trinca dos cdp, originadas pelo excesso de resina nessa região. Por outro lado, a previsão da propagação da delaminação apresenta uma boa correlação com os resultados experimentais para todos os casos estudados nesse trabalho.

4. CONCLUSÕES

O trabalho apresenta uma discussão detalhada da modelagem do fenômeno de delaminação em Modo Misto utilizando elementos casca e tridimensionais, incluindo uma lógica de contato desenvolvida por Donadon e Almeida (2009), com uma boa correlação tanto no regime elástico como na propagação da delaminação ao longo da interface. A formulação proposta nesse trabalho permite modelar falha por delaminação em estruturas de material compósito sujeitas a diferentes configurações de carregamento onde a razão de mixidade entre os modos I/II/III não é conhecida “*a priori*”.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido para este trabalho pela Fundação de Amparo Pesquisa de São Paulo (FAPESP), contratos 2006/06808-6, 2008/05345-8 e CNPq Grants 305601/2007-5 e 303287/2009-8.

6. REFERÊNCIAS

ABAQUS v. 6.5.1, 2005.

American Society for Testing and Materials, 2009, "Standard test method for mixed mode I-mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fibre-reinforced polymer matrix composites", ASTM standards, ASTM D 6671-06.

Brewer J. and Lagace P., 1988 "Quadratic stress criterion for initiation of delamination," J. Compos. Mater. Vol. 22(12), pp. 1141–1155.

Camanho P. P. and Davila C. G., 2002, "Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials," NASA/TM-2002-211737.

Donadon M.V., Almeida S. F. M., 2009, "A contact-logic for mixed-mode modelling in composite laminates", To be submitted to International Journal of Aerospace Engineering.

Iannucci L., 2006, "Dynamic delamination modelling using interface elements," Computers and Structures, Vol. 84, pp. 1029–1048.

Kim R. and Soni S. R., 1984, "Experimental and analytical studies on the onset of delamination in laminated composites," J. Compos. Mater. Vol. 18(4), pp. 70–84.

Lee J., 1980, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Layered Fiber-Reinforced Composite Materials," Comput. Struct. Vol. 12, pp. 319–333.

Y. Mi, M. Crisfield, and G. Davies, 1998, "Progressive delamination using interface elements," J. Compos. Mater. Vol. 32(14), pp. 1247–1271.

Pinho S., Robinson P., and Iannucci L., 2005, "Formulation and implementation of decohesion elements in an explicit finite element code," Composites Part A, Vol. 37, pp. 778-789.

Wisnom M. R. and Chang F.-K., 2000, "Modelling of splitting and delamination in notched cross-ply laminates," Composites Science and Technology Vol. 60, pp. 2849–2856.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO
DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

NUMERICAL ANALYSIS OF MIXED MODE I-II DELAMINATION GROWTH IN COMPOSITE LAMINATES

Mariano Andrés Arbelo, arbelom@ita.br¹

Maurício Vicente Donadon, donadon@ita.br²

Sérgio Frascino Müller de Almeida, frascino@ita.br¹

¹Intituto Tecnológico de Aeronáutica, CTA-ITA-IEM, Pça Mal. Eduardo Gomes, N° 50, 12228-900, São José dos Campos-SP, Brazil

***Abstract.** The present work focuses on the development of numerical models to simulate mixed mode delamination growth in composites laminates. A new modelling technique was studied and implemented for this purpose using a newly developed contact-logic, implemented as user-defined material models into ABAQUS/Explicit. The numerical predictions were compared with experimental results obtained for three mixing ratios, 25%, 50% and 75%. A good correlation between predicted and measured load \times displacement curves was obtained. Advantages and disadvantages of the numerical model proposed in this work are presented and discussed.*

***Keywords:** composites, delamination, fracture mechanics, damage mechanics, finite elements*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.