

# ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE LAMINADOS COMPÓSITOS DE CARBONO-EPÓXIDO

R. Daniaud, P. Byrne, M. F. S. F. de Moura

DEMEGI, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Rua Dr. Roberto Frias s/n 4200-465 Porto, Portugal

## RESUMO

*Neste trabalho pretende-se estudar o comportamento de placas laminadas de compósito de carbono-epóxico submetidas a uma solicitação transversal quase-estática no centro geométrico de uma das suas faces. Os ensaios experimentais foram realizados sobre placas rectangulares com diferentes sequências de empilhamento. O modelo usado baseou-se no uso do software ESAComp [1] com o intuito de simular o comportamento das camadas e das interfaces entre camadas diferentemente orientadas nos laminados. As interfaces foram simuladas como sendo constituídas por uma fina camada isotrópica de resina com uma espessura igual a um décimo da espessura das camadas do laminado. Constatou-se que o modelo apresenta um bom desempenho na obtenção dos modos de rotura e das respectivas forças.*

## 1. INTRODUÇÃO

Os laminados compósitos são conhecidos pelo seu mau desempenho quando submetidos a solicitações de impacto de baixa velocidade. Estudos realizados [2] mostraram que este tipo de solicitação é susceptível de causar dano interno não visível a olho nu, como é o caso das delaminagens entre camadas diferentemente orientadas e da fissuração transversal das camadas. As delaminagens que ocorrem nas interfaces entre camadas diferentemente orientadas, revelam-se críticas no comportamento de estruturas de materiais compósitos sujeitos a solicitações de compressão [3-7].

O impacto é, por natureza, um fenómeno dinâmico. No entanto, uma análise estática pode substituir a análise dinâmica uma vez que, sendo muito mais simples produz, em determinadas circunstâncias, resultados similares. No entanto, o limiar que

distingue estes dois tipos de análise em termos de resultados obtidos é susceptível de ser alterado por uma série de factores como a geometria, o material e a massa, quer do impactor quer do provete. Kaczmarek et al. [8] realizaram ensaios de indentação estática e de impacto de baixa velocidade em placas de carbono-epóxico com duas sequências de empilhamento:  $(45_2, 0_2, -45_2, 90_2)_s$  e  $(0_2, 90_2)_{2s}$ . Recorrendo aos ultra-sons os autores observaram o dano obtido estática e dinamicamente, tendo concluído que as áreas delaminadas são similares, o que permite a realização de ensaios estáticos em vez de solicitações de impacto. Hong et al. [9] estudaram o efeito da orientação das fibras, espessura e sequência de empilhamento na resistência à delaminação de compósitos de carbono-epóxico. Os autores concluíram que o comportamento de uma placa fina submetida a impacto de baixa velocidade é

similar ao obtido por flexão estática. Sjöblom et al. [10] estabeleceram que o impacto é de baixa velocidade quando esta é suficientemente baixa para justificar uma solução estática. O autor não quantifica, mas adverte que esta situação é susceptível de ser influenciada pelas propriedades do material, geometria e massa quer do impactor quer do provete. Jih et al. [11] propuseram um método de previsão da delaminação induzida por impacto de baixa velocidade. Concluíram que o uso da tenacidade estática dada pela taxa crítica de libertação de energia associada ao valor da força de contacto produzia bons resultados, o que os levou a afirmar que o processo de propagação da delaminação é quase-estático. Swanson [12] estabeleceu regras simples, que permitem determinar o limite da aplicabilidade das soluções quase-estáticas. A regra desenvolvida baseia-se numa relação entre a massa do impactor e a massa do provete. Concluiu o autor que se a massa do impactor for superior a nove vezes a massa da placa, uma solução quase-estática é viável.

Conclui-se assim que, dentro de certos limites, o impacto de baixa velocidade pode ser estudado como uma solitação quase-estática. Nesse contexto, foram realizados ensaios experimentais de indentação transversal em placas de carbono-epóxico com diferentes sequências de empilhamento, com a finalidade de estudar o seu comportamento à flexão. Recorreu-se também ao software ESAComp com o objectivo de identificar o modo de rotura e tentar prever as respectivas cargas observadas experimentalmente. Os resultados obtidos permitem concluir que o modelo de simulação prevê com rigor o

comportamento à flexão das placas laminadas.

## 2. EXPERIMENTAÇÃO

As placas de dimensões 50x50 mm foram fabricadas a partir de um rolo de pré-impregnado de carbono-epóxico (Texipreg HS 160 REM), cujas propriedades mecânicas foram determinadas experimentalmente (ver tabela 1).

As sequências de empilhamento usadas foram (0, 45, -45, 90)<sub>s</sub> e (0, 45, 90, -45)<sub>s</sub>, com o objectivo de averiguar a influência do posicionamento da camada a 90° ao longo da espessura do laminado. As placas foram simplesmente apoiadas em duas das suas extremidades (vão de 45 mm) e a velocidade de solitação foi de 0.2 mm/min (ver figura 1). Os ensaios foram realizados até ao aparecimento da primeira descontinuidade na curva força-deslocamento que corresponderá a uma rotura de camada ou interlaminar

A figura 2 apresenta os resultados obtidos para o laminado (0, 45, -45, 90)<sub>s</sub>. Como se pode constatar, existe uma descontinuidade na curva força-deslocamento que corresponderá a uma rotura interlaminar ou a uma rotura de camada. Um comportamento similar pode ser observado para o laminado (0, 45, 90, -45)<sub>s</sub>, como se pode ver na figura 3. Os valores das cargas para a rotura observada foram de 147 N para o laminado (0, 45, -45, 90)<sub>s</sub> e de 138 N para o laminado (0, 45, 90, -45)<sub>s</sub>. A diferença pode ser explicada pela posição da camada a 90°, que no segundo caso se encontra mais perto da superfície do laminado contribuindo assim para uma menor resistência à flexão.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas da camada.

$E_{11}$ (GPa)	$E_{22}=E_{33}$ (GPa)	$\nu_{12}=\nu_{13}$	$G_{12}=G_{13}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$Y_t$ (MPa)	$S_i$ (MPa)
100.4	7.67	0.35	2.8	3.2	40	44

$E_{ij}$ ,  $G_{ij}$ ,  $\nu_{ij}$  - Propriedades elásticas

$Y_t$  - Resistência à tracção na direcção transversal

$S_i$  - Resistência ao corte interlaminar

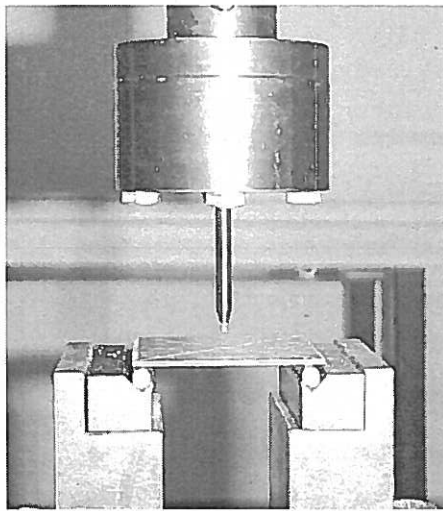


Fig 1 - Sistema utilizado nos ensaios realizados.

### 3. MODELO

Com o intuito de modelar o comportamento observado nos referidos laminados, recorreu-se ao software ESAComp. Para simular os dois tipos de rotura típicas nas solicitações de flexão (rotura de camada e rotura interlaminar), foram consideradas as oito camadas com as respectivas orientações e as interfaces entre camadas diferentemente orientadas. As interfaces foram consideradas como sendo constituídas por finas camadas de resina com espessura igual a um décimo da espessura da camada laminada (ver figura 4). Assumiu-se ainda que as propriedades mecânicas da resina, considerada como um

material isotrópico, são as mesmas da camada laminada na direcção transversal às fibras. A carga, de carácter pontual, é aplicada no centro geométrico de uma das faces da placa. A figura 5 apresenta o campo de deslocamentos obtido numericamente. São considerados valores sucessivamente crescentes da carga até que uma primeira rotura (interlaminar ou intralaminar) seja detectada, utilizando o critério de rotura de Tsai-Hill para as camadas laminadas [13] e o critério de Von Mises para as interfaces consideradas isotrópicas.

### 4. RESULTADOS

Os resultados obtidos estão sintetizados nas figuras 6 e 7 e na tabela 2. Em ambos os laminados foi detectada, numericamente, uma rotura da última camada ( $0^\circ$ ) por efeitos de flexão na direcção transversal às fibras. Essa rotura ocorreu para valores de força muito próximos dos observados experimentalmente. Os erros na previsão da força correspondente a esta rotura inicial foram inferiores a 2%. A rigidez (declive da curva  $P-\delta$ ) obtida pela simulação numérica também apresentou boa concordância relativamente à curva experimental, tendo sido detectados erros de 2 a 4

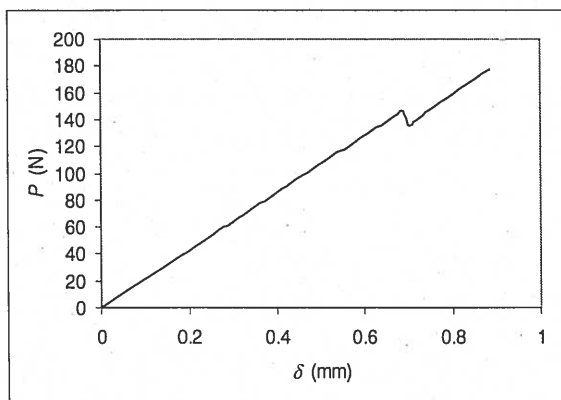


Fig 2 - Curva força-deslocamento para o laminado (0, 45, -45, 90)<sub>s</sub>.

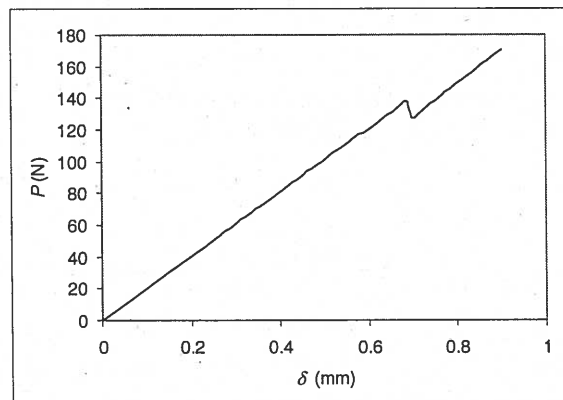


Fig 3 - Curva força-deslocamento para o laminado (0, 45, 90, -45)<sub>s</sub>.

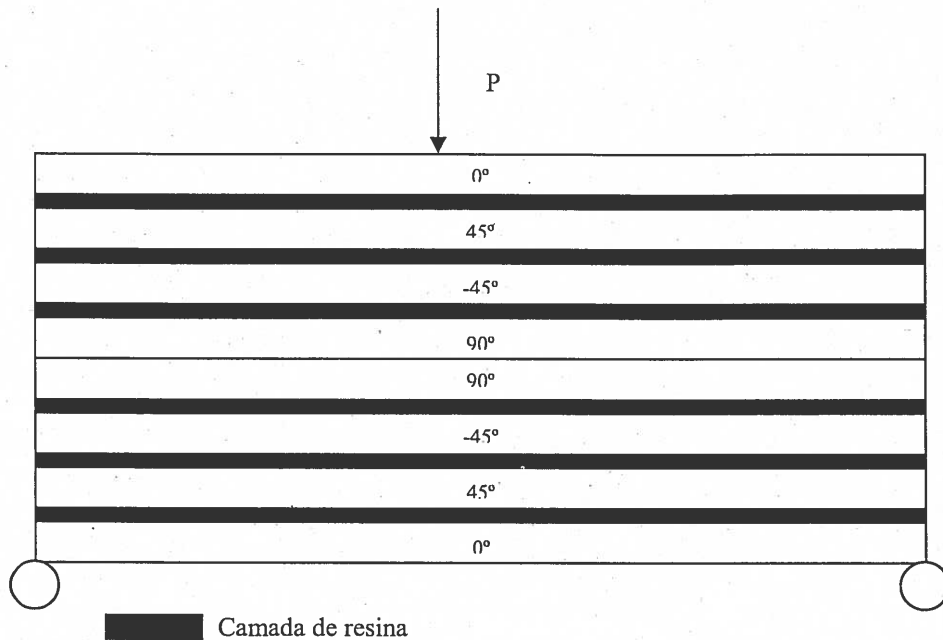


Fig 4 – Representação esquemática do modelo usado no ESAComp para o laminado (0, 45, -45, 90)<sub>s</sub>.

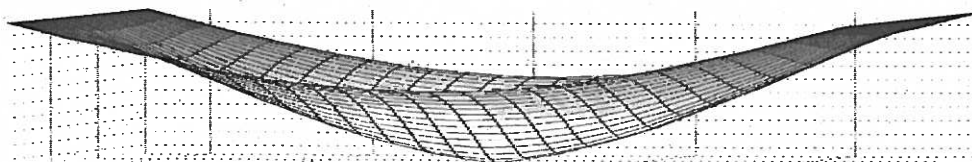


Fig 5 – Representação esquemática do campo de deslocamentos obtido.

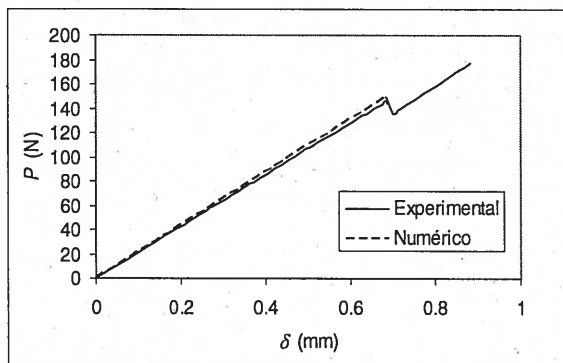


Fig 6 – Comparação das curvas força-deslocamento, numérica e experimental, para o laminado (0, 45, -45, 90)<sub>s</sub>.

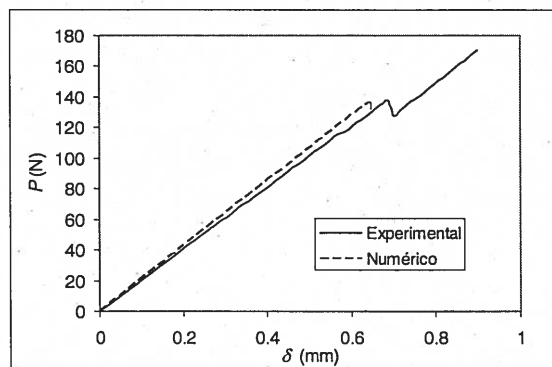


Fig 7 – Comparação das curvas força-deslocamento, numérica e experimental, para o laminado (0, 45, 90, -45)<sub>s</sub>.

Tabela 2 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais.

	P (N)			P/δ (N/mm)		
	Experimental	Numérico	Erro (%)	Experimental	Numérico	Erro (%)
(0, 45, -45, 90) <sub>s</sub>	147	149	1.36	213.9	218.0	1.9
(0, 45, 90, -45) <sub>s</sub>	138	136	-1.45	203.2	211.8	4.06

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho pretendia-se estudar o comportamento de placas laminadas de compósito de carbono-epóxico submetidas a uma sollicitação transversal quase-estática no centro geométrico de uma das suas faces. Foram realizados ensaios experimentais sobre placas retangulares para duas seqüências de empilhamento diferentes. Verificou-se experimentalmente o aparecimento de uma descontinuidade na curva força-deslocamento indiciadora da existência de rotura no laminado. Numericamente foram consideradas catorze camadas, sendo que oito delas correspondiam a camadas laminadas diferentemente orientadas e as outras seis representavam as interfaces. Estas últimas tinham uma espessura igual a um décimo das camadas laminadas e comportamento isotrópico. Os resultados obtidos apresentaram excelente concordância com os experimentais quer ao nível da força máxima prevista quer ao nível da rigidez, o que demonstra as potencialidades do ESAComp na previsão do comportamento mecânico dos compósitos laminados.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] - ESAComp, The Software for Analysis and Design of Composites, Compeering Inc., 2004.
- [2] - de Moura, M. F. S. F., "Modelos de Previsão do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Carbono-Epóxico Sujeitos a Impacto de Baixa Velocidade e da sua Resistência Residual à Compressão Após Impacto", Tese de doutoramento, Porto, 1995.
- [3] - de Moura, M. F. S. F., Gonçalves, J. P. M., Marques, A. T., de Castro, P. M. S. T., "Modeling Compression Failure after Low Velocity Impact on Laminated Composites Using Interface Elements, *Journal of Composite Materials*". (31): 1462-1479, 1997.
- [4] - de Moura, M. F. S. F., Gonçalves, J. P. M., Marques, A. T., de Castro, P. M. S. T., "Prediction of Compressive Strength of Carbon-Epoxy Laminates Containing Delamination by Using a Mixed-Mode Damage Model", *Composite Structures*, 50(2), 151-157, 2000.
- [5] - Steinmetz, G., Arendts, F. Z., "Compression Failure Behaviour of CFRP Strips Containing Delaminations", *Advanced Composites 93*, International Conference on Advanced Composite Materials, Ed. by T. Chandra and A. K. Dhingra, The Minerals, Metals & Materials Society, 1993.
- [6] - Weinman, M. S., Steinmetz G. and Arendts, F. J., "Numerical and Experimental 3-D Delamination Behaviour of an Anisotropic Layered Plate Under Compression Loading", *Proceedings of the Ninth International Conference on Composite Materials (ICCM/9)*, Madrid, Ed. by António Miravete, Pub. by Univ. of Zaragoza, 12-16 Julho, 1993.
- [7] - Whitcomb, J. D., "Analysis of Delamination Growth near Intersecting Ply Cracks", *Journal of Composite Materials*, vol. 26, No. 12, pp. 1844-1858, 1992.
- [8] - Kaczmarek, H. and Maison, S., "Comparative Ultrasonic Analysis of Damage in CFRP Under Static Indentation and Low-Velocity Impact", *Composites Science and Technology*, 51, pp. 11-26, 1994.
- [9] - Hong, S. and Liu, D., "On the Relationship Between Impact Energy and Delamination Area", *Experimental Mechanics*, vol. 2, pp. 115-120, June 1989.
- [10] - Sjöblom, P. O., Hartness, J. H. and Cordell T. M., "On Low-Velocity Impact Testing of Composite Materials", *Journal of Composite Materials*, vol. 22, pp. 30-52, January 1988.
- [11] - Jih, C. T. and Sun, C. T., "Prediction of Delamination in Composite Laminates Subjected to Low Velocity Impact", *Journal of Composite Materials*, vol. 27, No. 7, pp. 684-701, 1993.
- [12] - Swanson, S. R., "Dynamic and Scalling Effects in Impact of Composite Structures", *Composites Behaviour*, *Proceedings of the Ninth International Conference on Composite Materials (ICCM/9)*, vol. V, pp. 291-298, Ed. by A. Miravete, Madrid, 12-16 July, 1993.
- [13] - Rosen, B. W. In: *Engineered Materials Handbook, Volume 1 (Composites)*. ASM International, 1987.

