

Encontro Nacional de Materiais e Estruturas Compósitas  
ECMEC2010  
A. J. M. Ferreira (Editor)  
© FEUP, Porto, 2010

## AVALIAÇÃO DA DELAMINAÇÃO APÓS FURAÇÃO EM COMPÓSITOS LAMINADOS

L. M. P. Durão<sup>1</sup>, D. J. S. Gonçalves<sup>1</sup>, V.H.C. de Albuquerque<sup>2,3</sup>,  
João Manuel R.S. Tavares<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Superior de Engenharia do Porto/ CIDEM  
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Portugal  
e-mail: [lmduro@eu.ipp.pt](mailto:lmduro@eu.ipp.pt)

<sup>2</sup>Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), Núcleo de Pesquisas  
Tecnológicas (NPT)

<sup>3</sup> Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI)  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)  
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal  
e-mail: [tavares@fe.up.pt](mailto:tavares@fe.up.pt)

**Palavras - Chave:** Materiais Compósitos, furação, delaminação, dano, análise de imagem.

**Resumo.** *As características excepcionais dos materiais compósitos de matriz polimérica têm conduzido à sua crescente utilização em todos os domínios. A necessidade de ligar estas peças entre si obriga à realização frequente de operações de furação que, embora devidamente adaptada, pode provocar diferentes tipos de dano nas peças a ligar. Desses, o dano mais grave é a delaminação pelas suas consequências na perda das propriedades mecânicas. Neste trabalho é apresentado um estudo comparativo da extensão do dano em função da geometria de ferramenta utilizada. Para tal as placas foram radiografadas após furação e a imagem resultante segmentada para medição das áreas associadas. Os resultados mostram a importância de uma adequada geometria de ferramenta na redução do dano causado pela furação em compósitos laminados.*

### 1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos de matriz polimérica têm-se tornado num dos materiais mais atractivos para os projectistas devido às suas características atractivas em termos baixo peso e resistência mecânica e rigidez adequadas. Exemplos da utilização destes materiais podem ser cada vez mais encontrados nas mais diversas indústrias, desde a aviação militar ou comercial, automóvel, ferroviária, construção naval ou artigos desportivos.

Embora os processos de fabrico permitam a obtenção de peças em material compósito no seu formato final, verifica-se frequentemente a necessidade de efectuar um determinado número de furos para posterior ligação das diversas peças entre si. A indústria aeronáutica é um bom exemplo desta situação: uma asa de avião comercial pode ter milhares de furos para

promover a ligação dos componentes envolvidos. Geralmente, as furações são efectuadas com recurso a técnicas e ferramentas da indústria de materiais metálicos com as devidas adaptações. No entanto, a natureza não-homogénea dos materiais compósitos, nomeadamente dos laminados de matriz polimérica, levanta dificuldades específicas que podem resultar na existência de uma orla de dano na periferia do furo. Dos diferentes tipos de dano habitualmente identificados, como a delaminação, o arrancamento de fibras e os danos térmicos [1], o mais grave é a delaminação. Este tipo de dano, caracterizado pelo descolamento de camadas adjacentes do laminado, ocorre principalmente nas camadas inferiores do material, à medida que a ferramenta se aproxima da superfície de saída. A sua principal consequência é a perda de propriedades mecânicas, seja de resistência estática ou à fadiga [2].

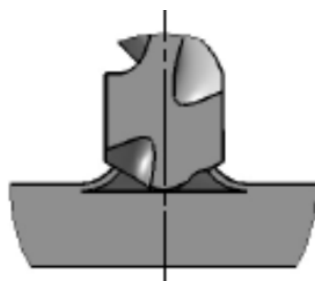


Figura 1 : Mecanismo de delaminação.

A delaminação, figura 1, é causada pelo efeito compressivo exercido pela extremidade da broca sobre as camadas inferiores do laminado, cuja espessura diminui à medida que o processo de furação vai avançando. As camadas inferiores tendem a ser empurradas para fora da placa provocando a rotura das ligações entre camadas [3]. A delaminação tem início a partir do momento em que a força de corte ultrapassa a resistência interlaminar da placa, normalmente caracterizada por um parâmetro designado como força crítica para o início da delaminação, cuja primeira formulação se deve a Hocheng e Dharan [4].

A diminuição deste tipo de dano tem sido objecto de diversos estudos como, por exemplo, [5-9]. A redução da delaminação pode ser conseguida através de uma correcta selecção das condições de maquinaria envolvendo o avanço e a velocidade de corte [6, 7], o material e a geometria de ferramenta [8] ou o correcto controlo dos parâmetros durante a furação [9].

Devido à sua natureza e ao facto dos laminados carbono/epóxico serem opacos, a delaminação é de difícil detecção por inspecção visual, mesmo com recurso a microscópio. Tal facto leva à necessidade de recorrer a métodos de ensaio não destrutivo como a radiografia de contraste [10], o varrimento ultra sónico ou a tomografia axial computadorizada [11]. O recurso a qualquer destas técnicas deve estar associado a um processo de análise de imagens que permita a determinação e caracterização das áreas associadas ao dano.

Neste trabalho é apresentada a comparação do dano causado por diferentes tipos de broca, quer em termos de geometria quer em termos do seu material, na furação de placas carbono/epóxico de 2,8 mm de espessura e configuração “cross-ply”. Durante a furação foi monitorizada a força axial e após a furação utilizou-se radiografia digital de contraste para

obter imagens do dano. Finalmente, a segmentação, ou seja, a identificação das áreas do furo e da delaminação nas imagens de radiografia digital foi realizada através da aplicação de uma rede neuronal artificial do tipo *backpropagation* [12]. A partir desta avaliação foi aplicado um critério de comparação da qualidade dos furos maquinados e discutidas as suas consequências em termos de resistência mecânica recorrendo ao ensaio “Open-hole tensile test” ASTM D5766M-07, 2007.

## 2 TRABALHO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental dividiu-se em três fases: execução de séries de furos em placas carbono/epóxico para monitorização das forças axiais, aquisição das imagens por radiografia digital com contraste para posterior análise da extensão do dano, recorrendo a técnicas computacionais de processamento e análise de imagem, e realização de ensaios mecânicos para correlação das propriedades obtidas com os dados de força e dano.

As placas utilizadas nos ensaios foram produzidas numa matriz em resina epóxida reforçada com fibra de carbono, obtidas através de uma sequência de empilhamento do pré-impregnado CC160 ET443 com a orientação  $[(0/90)]_{6s}$ . Posteriormente o laminado foi curado numa prensa de pratos quentes a uma pressão de 300 kPa com um ciclo de aquecimento até aos 130 °C, estágio durante uma hora e arrefecimento. A espessura final da placa foi de 2,8 mm. De seguida, as placas produzidas foram cortadas com um disco abrasivo em provetes de 165 x 96 mm<sup>2</sup> para ensaios de furação e de 250 x 36 mm<sup>2</sup> para ensaios mecânicos.

Para este trabalho foram utilizadas cinco diferentes geometrias, todas elas em carboneto de tungsténio (WC), geralmente conhecidas como helicoidal, desdobrada em dois ângulos de ponta – 85° e 120° –, Brad e bidiametral com dentes direitos e com perfil helicoidal. Todos os furos foram realizados com uma velocidade de rotação de 6000 rpm e um avanço de 0,12 mm/rot. Os detalhes do procedimento de furação e principais características das brocas utilizadas podem ser encontrados em Durão et al [7, 10].

Para possibilitar a obtenção de imagens utilizando a radiografia digital com contraste, as placas foram previamente imersas num líquido contrastante durante cerca de uma hora. Como resultado deste processo obtiveram-se imagens em tons de cinzento como a mostrada na figura 2, em que uma orla mais escura à volta do furo identifica a região com dano, cuja área ou diâmetro se pretende obter.

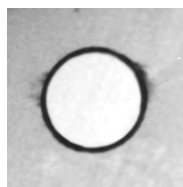


Figura 2 : Exemplo de imagem obtida por radiografia digital com contraste de uma placa compósita furada

### 3 ANÁLISE DE IMAGEM

A topologia da rede neuronal usada para segmentar as imagens de dano consiste de: uma entrada composta por 3 neurónios, sendo cada um destes correspondentes aos espaços de cor primários (vermelho/verde/azul) que constituem o valor de cada pixel da imagem a avaliar; uma camada oculta composta por 7 neurónios, tendo sido este número definido a partir da regra heurística proposta por Kolmogorov [13], em que o número de neurónios de uma camada oculta é duas vezes o número de neurónios da camada anterior mais 1 (um); e finalmente, uma camada de saída formada por 3 neurónios. Como função de activação dos neurónios empregues na rede, foi utilizada a função logística [14], que apresenta 3 valores da saída: 1 (um), 0 (zero) e -1 (um). Desta forma, embora a rede seja usada neste trabalho para segmentar imagens em níveis de cinzento (0 a 255 níveis) e classificar três classes de segmentação (furo, regiões delaminada e não delaminada), tem também capacidade para analisar imagens de cor e classificar até 27 classes.

Na abordagem desenvolvida, a rede neuronal é inicialmente treinada a partir de um conjunto de imagens representativas da segmentação a realizar e, em cada uma destas imagens, pela selecção manual de alguns pixels para cada classe a segmentar. Esta operação apenas necessita de ser realizada uma vez para segmentar um conjunto de imagens do mesmo tipo. Neste trabalho, no treino da rede foram usadas 15 pixels de cada uma das 3 classes a segmentar.

O algoritmo usado no treino da rede neuronal é o *backpropagation multilayer perceptron learning algorithm* [15], um dos algoritmos mais usados para o treino deste tipo de rede neuronal. Tendo sido adoptado como critério de paragem do treino um erro absoluto igual ou inferior a 0.01 ou a um número de iterações igual a 2.500 épocas.

Maiores detalhes sobre a rede neuronal utilizada podem ser encontrados em [16].

Após as regiões furo e delaminada estarem segmentada, as medidas características do dano imposto no laminado pela operação de furação foram obtidas a partir das mesmas, através da identificação da maior diagonal de cada uma [12].

### 4 RESULTADOS

Os resultados obtidos dividem-se em três tipos e estão indicados na tabela 1: força axial máxima verificada durante a furação, factor de delaminação de acordo com a definição dada por Chen [17] e a tensão de rotura obtida no ensaio mecânico ASTM D 5766M-07 “Open hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates” [17]. De referir que, para os diferentes valores da tabela 1, foi tomada a média de 4 observações em condições idênticas.

Os resultados obtidos permitem afirmar que, para diferentes geometrias de broca do mesmo material, se verifica uma variação da força máxima durante a furação. Esta variação tem como principal consequência a variação da extensão da delaminação e diferentes perdas de resistência do material. Valores mais elevados da força axial resultam em maiores delaminações e menor resistência do material, como é o caso da broca bidiametral de dentes helicoidais. De notar que nas outras geometrias, as conclusões não são tão evidentes, pois as forças elevadas registadas na furação com broca helicoidal 120° não resultaram em dano tão

elevado. Globalmente, a broca bidiametral de dentes direitos apresenta os resultados mais equilibrados.

<b>BROCA</b>	<b>Força Axial máxima [N]</b>	<b>Factor de delaminação [<math>F_d</math>]</b>	<b>Tensão “Open-hole” [MPa]</b>
Helicoidal 85°	124	1.21	609
Helicoidal 120°	145	1.19	602
Brad	117	1.44	597
Bidiametral dentes direitos	102	1.22	618
Bidiametral helicoidal	165	1.26	598

Tabela 1 : Resumo dos resultados experimentais.

## 6 CONCLUSÕES

Foi apresentada uma metodologia de comparação de diferentes geometrias de broca na furação de placas em laminados carbono/epóxico através da monitorização de forças, avaliação da delaminação e realização de um ensaio mecânico. Do trabalho apresentado é possível obter as seguintes conclusões:

- os valores de força máxima durante a furação e da delaminação à volta do furo dependem da geometria da broca;
- a geometria de broca tem efeitos diversos, sendo o valor mais baixo de força obtido com a broca bidiametral de dentes direitos e o valor mais baixo de delaminação com a broca helicoidal com ângulo de ponta de 120°;
- os valores obtidos no ensaio mecânico apontam para um melhor resultado nas placas furadas com a broca experimental bidiametral de dentes direitos;
- na selecção de geometria de broca, o factor delaminação deverá ser considerado primordial pelo que, nas condições experimentais descritas, a melhor opção será o uso de uma broca helicoidal com 120° de ângulo de ponta, disponível comercialmente;
- a broca bidiametral de dentes direitos, resultado de um projecto de investigação, apresenta-se como uma boa ferramenta para reduzir a delaminação, minimizando as perdas de propriedades mecânicas da placa.

## REFERÊNCIAS

- [1] Wern, C.W.; Ramulu, M., Schukla, A., Investigation of Stresses in the Orthogonal Cutting of Fiber-Reinforced Plastics, *Experimental Mechanics*, 33-41 (1994).
- [2] Persson, E., Eriksson, I., Zackrisson, L., Effects of Hole Machining Defects on Strength and Fatigue Life of Composite Laminates, *Composites A*, 28, 141-151 (1997).
- [3] Stuart, M.L. International Encyclopaedia of Composites, vol 2, 297 (1991).
- [4] Hocheng, H., Dharan, C. K. H., Delamination During Drilling in Composite Laminates, *J. of Engineering for Industry*, 112, 236-239 (1990).

- [5] Hocheng, H.; Tsao, C.C., The path towards delamination-free drilling of composite materials, *J. of Materials Processing Technology*, 167, 251-264 (2005).
- [6] Davim, J.P., Reis, P., Drilling Carbon Fibre Reinforced Plastics Manufactured By Autoclave – Experimental and Statistical Study, *Materials & Design*, 24, 315-324 (2003).
- [7] Durão, L.M.P., Magalhães, A.G., Marques A.T., Tavares, J.M.R.S., Influência dos parâmetros de maquinação no dano de placas compósitas, *Mecânica Experimental*, 16, 45-54, ISSN 1646-7078 (2008).
- [8] Piquet, R.; Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P., Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills, *Composites A*, 31, 1107-1115 (2000).
- [9] Stone, R; Krishnamurthy, K. A., Neural Network Thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite-Epoxy Composites, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, 36 , 985-1003 (1996).
- [10] Durão, L. M. P ; Tavares, J. M. R. S., Marques, A.T., Baptista, A.M., Magalhães, A.G., Damage analysis of carbon/epoxy plates after drilling, *Int. Journal of Materials & Product Technology*, 32, 226-242 (2008).
- [11] Tsao, C.C., Hocheng, H., Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills, *Int. J Machine Tools & Manufacture*, 45, 1282-1287 (2005).
- [12] de Albuquerque, V. H. C., Tavares, J. M. R. S., Durão, L. M: P., Evaluation of Delamination Damage on Composite Plates using an Artificial Neural Network for the Radiographic Image Analysis, *Journal of Composite Materials*, 44, 1139-1159 (2010).
- [13] Bodyanskiy Y, Kolodyazhniy V, Otto P., Neuro-fuzzy Kolmogorov's network for time series prediction and pattern classification. Springer LNCS 3698:91-202 (2005).
- [14] Elliott DL, Better A., Activation Function for Artificial Neuronal Networks, ISR Technical Report TR 93-8, Institute for Systems Research, University of Maryland (1993).
- [15] Singh V, Rao Sm., Application of Image Processing and Radial Basis Neuronal Network Techniques for Ore Sorting and Ore Classification. *Minerals Engineering*, 18, 1412-1420 (2005).
- [16] de Albuquerque, VHC, Silva, CC, Menezes, TIS, Farias, JP, Tavares, JMRS, Automatic Evaluation of Nickel Alloy Secondary Phases from SEM Images, *Microscopy Research and Technique*, DOI: 10.1002/jemt.20870 (2010) (in press)
- [17] ASTM D5766M-07, Standard test method for Open hole tensile strength of polymer matrix composite materials, ASTM International (2007).
- [18] Chen, W. C., Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 37, 1097-1108 (1997).