

*DIA MUNDIAL DOS MATERIAIS 2010***AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS NA FURAÇÃO DE LAMINADOS COMPÓSITOS**

D. J. S. GONCALVES <sup>(1)\*</sup>, L. M. P. DURÃO <sup>(2)</sup>, V.H.C. de ALBUQUERQUE <sup>(1,3)</sup>, J.M.R.S. TAVARES <sup>(1)</sup>, A.M.BAPTISTA <sup>(1)</sup>.

(1) INEGI/FEUP, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial / Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica

(2) ISEP/CIDEM, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica

(3) UNIFOR, Universidade de Fortaleza, Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT)

\*dgoncalves@inegi.up.pt

**ABSTRACT:** The development of cutting tools becomes a challenge to the industry of composite materials to obtain high quality holes, minimizing damage. This work aims to examine the influence of various parameters such as feed rate and tool geometry on thrust forces developed during drilling operations and on the extent of damage.

In this work, a comparative study of tool geometry with the aim of reducing the associated damage during drilling process is presented. In the end a good combination of tool geometry and drilling parameters based on experimental work will be presented.

**Keywords:** Drilling, Delamination, Damage.

**RESUMO:** O desenvolvimento de ferramentas de corte torna-se um desafio à indústria de materiais compósitos, na obtenção de furos de elevada qualidade, minimizando o dano. Este trabalho visa analisar a influência de vários parâmetros, tais como o avanço e a geometria de ferramenta, nas forças desenvolvidas durante a furação e na extensão do dano.

Neste artigo é apresentado um estudo comparativo de geometrias de broca com o objectivo de reduzir o dano associado à furação, que permitirá determinar qual a melhor selecção de parâmetros de furação, atendendo às diferentes geometrias de ferramenta.

**Palavras chave:** Furação, Delaminação, Dano

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Maquinagem de materiais compósitos

Face à crescente utilização que se tem verificado nos mais variados domínios, os materiais compósitos constituem actualmente um dos mais interessantes grupos de materiais na nossa sociedade tecnológica.

As suas propriedades tais como o baixo peso e a elevada resistência específica tornam os materiais compósitos uma excelente escolha para aplicações que exijam elevadas rigidez e resistência específica. As peças em compósitos são normalmente produzidas na forma final, contudo devido à necessidade da posterior montagem de componentes é necessário recorrer a operações de furação. Normalmente estas operações são realizadas recorrendo aos métodos e ferramentas tradicionalmente utilizadas em peças metálicas, com algumas adaptações. Contudo, a natureza não homogénea dos mate-

riais compósitos levanta algumas dificuldades na operação de furação, sendo frequente a existência de uma orla de dano à volta da periferia do furo efectuado.

### 1.2 Delaminação

Durante o processo de furação de laminados compósitos ocorrem alguns danos, tais como delaminação, arrancamento de fibras, descolamento fibra-matriz e danos térmicos. O dano mais frequente consiste na delaminação, definida como o descolamento de camadas adjacentes do laminado. Este defeito afecta as propriedades mecânicas da placa à volta da zona de ligação e põem em risco a fiabilidade dos componentes, tal como a diminuição de resistência à fadiga [1]. Existem dois tipos de delaminação que podem ocorrer durante a operação de furação (figura 1). Se o dano ocorre no momento de início do contacto entre a broca e a placa, temos a delaminação à entrada ou “peel-up”, em que o material tende a ser puxado para

cima ao longo das espiras da broca em vez de ser cortado. Se o dano ocorre quando a ponta da broca se aproxima da extremidade oposta, ocorre a delaminação à saída ou “push-down”. Devido à força compressiva, exercida pela ponta da broca as camadas tendem a ser empurradas para o lado oposto da placa provocando a separação entre camadas adjacentes [2].

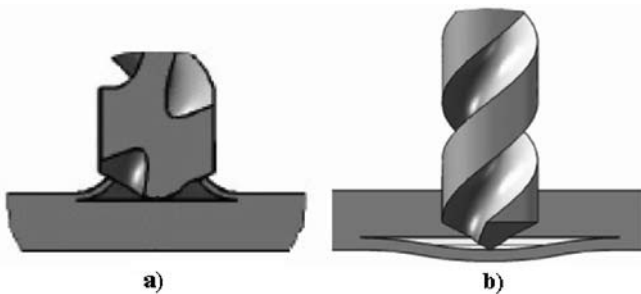


Fig. 1. Delaminação a) à entrada “peel-up”; b) à saída “push-down”.

A delaminação à saída é referenciada em diferentes estudos [3-8] devido à dificuldade em ser evitável enquanto que a delaminação à entrada “peel-up” é possível evitar recorrendo a avanços baixos a moderados.

**1.3-Referências científicas**

A operação de furação tem sido alvo de estudo de alguns investigadores. Diversos estudos [9-18] aplicando a mecânica da fractura linear elástica, demonstraram que na furação de materiais poliméricos a força axial, é considerada como a causa de delaminação. Tsao e Hocheng [19] compararam diversas geometrias de ferramenta com diferentes parâmetros de corte, concluindo pela maior importância do avanço e do diâmetro da ferramenta na delaminação. A furação de GFRP com brocas de aço rápido [20] permitiu concluir que o avanço é o principal parâmetro responsável pela intensidade e natureza dos danos causados à peça maquinada. O desempenho dos componentes e a sua maquinabilidade dependem das diferentes propriedades físicas da fibra e da matriz e da sua combinação com a orientação das fibras [21]. Durão & Gonçalves [22], com o objectivo de estabelecer uma correlação entre as forças desenvolvidas durante o processo de furação e a extensão da zona delaminada em redor do furo, realizaram ensaios mecânicos a peças após furação. O objectivo consistiu na avaliação da importância da escolha adequada da geometria de ferramenta na diminuição do dano e na melhoria das características mecânicas das peças.

**2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

**2.1 Fabrico de placas**

Na realização deste trabalho foram utilizadas placas em resina epóxida reforçada com fibra de carbono. As placas foram obtidas a partir do pré-impregnado CC160 de SEAL®. A constituição do pré-impregnado está apresentada na figura 2. As placas fabricadas são do tipo cross-ply, ou seja, são constituídas por várias camadas empilhadas, sendo que cada uma é orientada a 90 relativamente à anterior. O empilhamen-

to das placas é constituído por 24 camadas. A espessura final é de 4 mm.

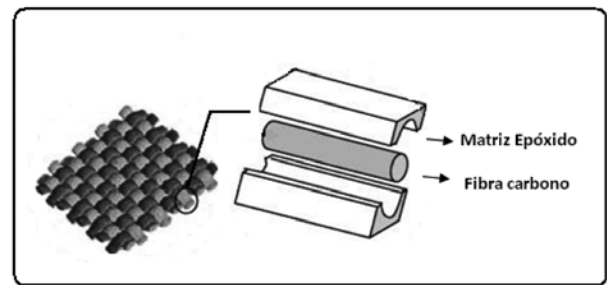


Fig. 2. Constituição do laminado composto em estudo.

Após o empilhamento o laminado foi sujeito a um ciclo de cura numa prensa de pratos quentes a uma pressão de 300 kPa e uma temperatura de 140°C durante uma hora, seguido de arrefecimento ao ar. Após o fabrico das placas estas foram cortadas numa máquina equipada com disco diamantado e refrigeração por circulação de fluido.

**2.2 Ensaio de Furação**

Para realizar os ensaios de furação foi utilizado em centro de maquinagem DENFORD TRIAC CENTRE de 3.7 kW, com uma velocidade de rotação máxima de 7500 rpm e que permite operar com avanços entre 0,001 a 2m/min sendo o aperto pneumático (cone BT- 30). A utilização da máquina CNC (Computer Numerical Controller) permitiu uma enorme versatilidade na selecção dos parâmetros (avanço e velocidade da ferramenta), assim como um bom aperto da ferramenta (aperto pneumático). Durante a realização da furação, quando ocorria a mudança de ferramenta ou de alguma condição experimental, a excentricidade do corpo da broca foi verificada, tendo sido obtido resultados nunca superiores a 0,01 mm para o cone e 0,02 mm para a broca. Durante o processo de furação, as forças axiais foram monitorizadas através de um dinamómetro KISTLER 9257B (figura 3) associado a um computador que fez a recolha dos dados para posterior tratamento.

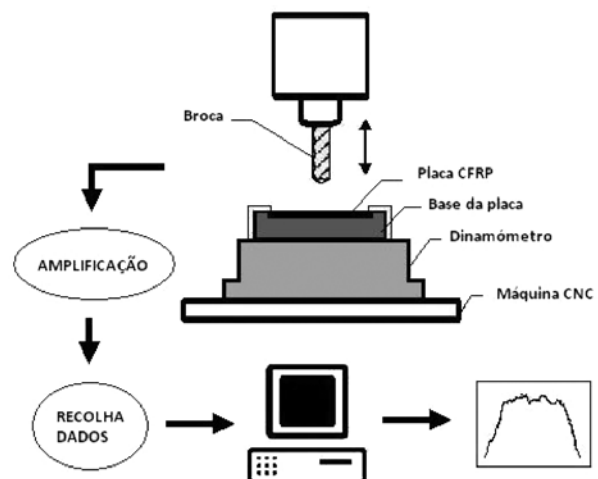


Fig. 3. Representação esquemática do set-up experimental.

### 2.3 Avaliação do factor de delaminação

As placas utilizadas neste trabalho são opacas, não permitindo a simples aplicação de um microscópio óptico para a determinação da área delaminada. Por este motivo foi aplicada a técnica de radiografia que permite a análise não-destrutiva.

A detecção do dano só é possível através de radiografia, sendo que a placa foi previamente mergulhada num líquido contrastante com características rádio-opacas. O aparelho utilizado tinha uma voltagem no tubo de raio-X de 60 kV e uma frequência de 300 kHz. Como resultado, obtiveram-se imagens em tons de cinzento, em que as zonas mais escuras correspondem às áreas de dano e as zonas mais claras às áreas restantes. As regiões de dano localizam-se em zonas aproximadamente circulares à volta dos furos respectivos. Posteriormente as películas foram digitalizadas para aplicação dos algoritmos de processamento e análise de imagem. Depois das imagens digitalizadas é seleccionada a zona de interesse (zona do furo) para aplicação das etapas subsequentes. Foi aplicado um filtro de suavização (filtro de média com uma máscara de 3x3 pixéis), de forma a reduzir o ruído presente no processo de aquisição das imagens originais. Após este processo de suavização, foi aplicada uma técnica de binarização automática baseada em limiares adaptativos [23,24] para segmentar as áreas com interesse. As imagens obtidas são constituídas por 3 regiões (fundo de imagem, área do furo e zona delaminada). Finalmente, foi aplicado um algoritmo de análise de regiões [23,24] que permite destacar cada uma das áreas presentes na imagem segmentada e calcular as medidas associadas (áreas e comprimentos).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Monitorização da força axial exercida durante a furação

Foi realizada a monitorização da força axial exercida durante o processo de furação, recorrendo a diferentes geometrias de ferramenta (figura 4) em placas CFRP com ferramentas em WC (carboneto de tungsténio) sendo que para a broca helicoidal foram testados 2 ângulos de ponta de ferramenta (85 e 120 graus).

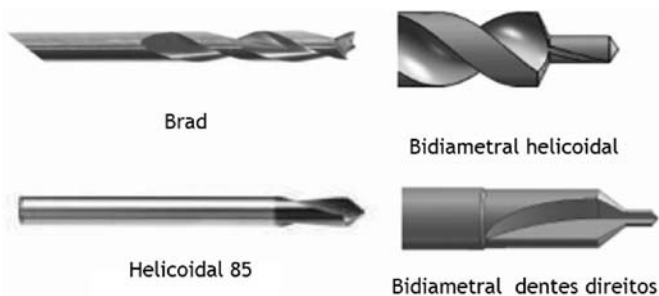


Fig. 4. Brocas utilizadas nos ensaios de monitorização da força axial

Cada geometria de ferramenta foi testada recorrendo a três avanços (0,02, 0,06 e 0,12 mm/rot) a uma velocidade constante de 2800 rpm (53 m/min). São então comparados os valores de força axial exercida durante a furação, recorrendo às diferentes geometrias de ferramentas e a diferentes avanços (figura 5)

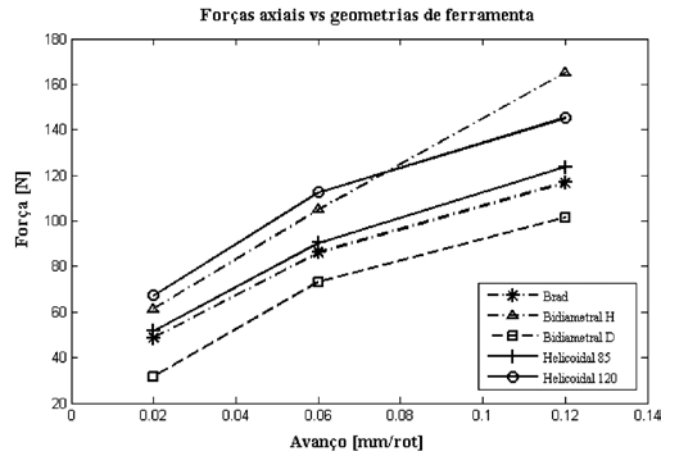


Fig. 5. Influência do avanço nas forças axiais de furação nas 5 geometrias de ferramenta

É possível verificar um aumento da força axial com o avanço independentemente da geometria da ferramenta. Verifica-se que para o valor do avanço mais baixo – 0,02 mm/rot – os valores de força máxima das diferentes brocas são aproximados. À medida que o avanço aumenta as diferenças entre as diversas geometrias tornam-se maiores. Parece existir uma relação entre o ângulo de ponta, e os valores de força encontrados. Menores valores do ângulo de ponta correspondem a menores valores de força axial. Estes resultados permitem afirmar que a escolha de um avanço baixo permite reduzir a força axial e, conseqüentemente, a delaminação à volta do furo.

### 3.2 Extensão do dano

Foi determinado o factor de delaminação para quatro geometrias de ferramentas, nomeadamente, Brad, Bidiametral D, Helicoidal 85 e Helicoidal 120. Foram analisados para cada condição experimental (4 geometrias e 3 avanços) sendo que para cada condição foram efectuados 4 furos e após a determinação do factor de delaminação foi calculada a respectiva média aritmética. A comparação entre os comportamentos das diferentes geometrias em função do parâmetro avanço está representada na figura 6.

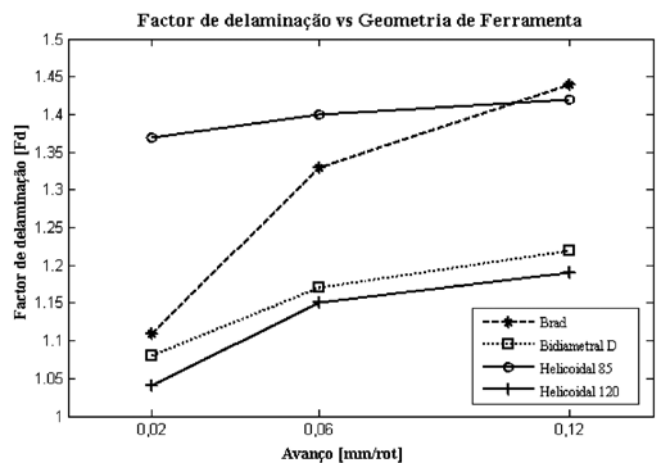


Fig. 6 -Influência do avanço no factor de delaminação nas diferentes geometrias de ferramenta

Através da análise destes resultados verifica-se a existência de um aumento do factor de delaminação (dano), à medida

que aumenta o avanço. Esta relação do avanço com ao dano está de acordo com Rubio et al [25] que refere que o factor de delaminação aumenta quando os parâmetros de corte são aumentados, sendo isto mais claro quando se trata do avanço.

Embora em todas as geometrias o dano associado aumente com o avanço, estas apresentam comportamentos diferentes entre si. A broca helicoidal 85 apresenta os piores resultados (valores do factor de delaminação mais altos), enquanto os melhores resultados são da broca helicoidal 120, seguidos da bidiametral D. A broca brad apresenta entre todas o comportamento mais diferente pois sofre maiores variações. A broca brad para avanços baixos aproxima-se dos melhores resultados (helicoidal 120 e bidiametral D) e para avanços altos aproxima-se dos valores de maior factor de delaminação (helicoidal 85).

#### 4. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objectivo comparar geometrias de ferramenta a nível de forças axiais e da extensão do dano. As comparações das diferentes geometrias resultam portanto, da força axial máxima durante a furação do laminado e da extensão do dano associado ao fenómeno de furação.

Foram utilizadas cinco geometrias de broca diferentes submetidas a três avanços, mantendo-se constante a velocidade de corte. Avanços baixos são claramente o parâmetro mais apropriado, perante as condições experimentais descritas pois minimiza a força axial exercida sobre o laminado. Podemos então concluir que à velocidade de corte de 53 m/min deverá associar-se um avanço de 0,02 mm/rot. Contudo, deverá esta escolha ter em atenção o aquecimento exagerado da ferramenta que pode levar ao aparecimento de danos térmicos na peça.

Relativamente à extensão do dano, neste grupo de ferramentas as que apresentaram os valores de delaminação mais baixos foram a Helicoidal 120 e a Bidiametral D. Devido ao bom comportamento em termos de forças axiais e delaminação, podemos concluir que a ferramenta Bidiametral D apresenta-se como uma geometria favorável à redução do dano para as condições ensaiadas.

Os resultados da força axial e da delaminação apresentam uma relação coerente para esta geometria de ferramenta., isto é, se a força axial máxima é mais elevada o dano é mais extenso. No entanto, esta relação não se mantém para todas as geometrias de ferramenta incluídas neste trabalho. Os resultados da delaminação obtidos não correspondem, pela mesma ordem, ao escalonamento relativo das forças axiais durante a furação. Este facto, como demonstrado na secção três, permite concluir que a geometria da ferramenta é um factor que também tem influência na delaminação provocada pela furação.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), no âmbito do projecto PTDC/

EME-TME/66207/2006 – “Drilling of polymeric matrix composite structures”.

Da mesma forma, os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e ao Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da FEUP pelo apoio prestado na realização deste trabalho.”

#### REFERÊNCIAS

- [1] Persson, E., Eriksson, I., Zackrisson, L. 1997. Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates, *Composites A*, v. 28, p. 141-151.
- [2] Stuart, M.L. *International Encyclopaedia of Composites*, v. 2, p. 297, 1991
- [3] Davim, J. P., Reis, P. (2003). “Furação de laminados epóxicos reforçados a fibras de carbono (CFRP)”. VI Congr. Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, Coimbra, 1079-1084.
- [4] Persson, E. Eriksson, I. et al. “Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates”, *Composites A*, v. 28, p. 141-151, 1997.
- [5] Hocheng, H. ; Tsao, C.C. “The path towards delamination-free drilling of composite materials”, *J. of Materials Processing Technology* v. 167, p. 251-264, 2005.
- [6] Won, M. S. ;Dharan, C. H. K., “Drilling of aramid and carbon fibre polymer composites”, *Trans. of ASME J. of Manufacturing Science and Engineering*, v. 124, p. 778-783, 2002.
- [7] Tsao, C.C. ; Hocheng, H. “Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill”, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, v. 45, p. 1261-1270, 2005.
- [8] Durão, L. M. P ; Tavares, J. M. R. S. et al , “Damage analysis of carbon/epoxy plates after drilling”, *Int. Journal of Materials and Product Technology*, v. 32, p.226-242, 2008.
- [9] Stone R, Krishnamurthy K. “A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite–epoxy laminates”. *J Mach Tools Manufact* 1996; 36(9):985.
- [10] Park KY, Choi JH, Lee DG. “Delamination-free and high efficiency drilling of carbon fiber reinforced plastics”. *J Compos Mater* 1995;29 (15); 1988-2002.
- [11] Ho-Cheng H, Dharan CKH. “Delamination during drilling in composite laminates”. *J Eng Ind, ASME* 1990;112:236-9.
- [12] Zhang LB, Wang LJ, Liu HW, Zhao HW, Wang X, Luo HY. “Mechanical model for predicting thrust and torque in vibrationdrilling fiber-reinforced composite materials”. *J Mach Tools Manufact* 2001;41:641-57.

- [13] Piquet R, Ferret B, Lachaud F, Swider P. "Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills". *Composites, Part A* 2000;31:1107-15.
- [14] Nobe H, Aoyama E, Inoue H, Hirogaki T, Kitahara Y, Katayama T, et al. "Study on cause of internal damage of drilled GFRP". *Key Eng Mater* 1998;137:123-30.
- [15] Capello E, Tagliaferri V. "Drilling damage of GFRP and residual mechanical behavior"–Part II: Static and cyclic bearing loads. *J Compos Technol* 2001;23(2):131-7.
- [16] Jain S, Yang DCH. "Effects of feed rate and chisel edge on delamination in composite drilling". *J Eng Ind, ASME* 1993;115:398–405.
- [17] Jain S, Yang DCH. "Delamination-free drilling of composite laminates". *J Eng Ind, ASME* 1994;116:475-81.
- [18] Sadat AB. "Prediction of delamination load in drilling of graphite/ epoxy composites". PD-Vol.75. *Eng Syst Design Anal, ASME* 1996;3:1-27
- [19] Tsao, C. C., Hocheng, H. (2004). "Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material". *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 44, 1085-1090.
- [20] Caprino G.; Tagliaferri V. "Damage Development in Drilling Glass Fiber Reinforced Plastics". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.1995: 35 (6); 817-829.
- [21] Konig W, Graß P. "Quality definition and assessment in drilling of fiber reinforced thermosets". *CIRP* 1989;38/1:119-24.
- [22] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, V.H.C. de Albuquerque, J.M.R.S. Tavares (2010), "Avaliação de ferramentas para a furação de laminados", 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental Guimarães, 21-23 de Abril.
- [23] Tavares, J. M. R. S. (2000), Tese de Doutorado: Análise de Movimento de Corpos Deformáveis usando Visão Computacional, FEUP, Porto.
- [24] Tavares, J. M. R. S., Barbosa, J. G., Padilha, A. J. (2002), "Apresentação de um Banco de Desenvolvimento e Ensaio para Objectos Deformáveis". *RESI – Revista Electrónica de Sistemas de Informação*, vol. 1.
- [25] Juan C. Campos Rubio, Alexandre M. Abrão, Paulo E. Faria, J. Paulo Davim (2007) "Análise digital de dano na furação de materiais compósitos laminados". *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, Vol.19, nº 1/2.