

AValiação de Ferramentas para a Furação de Laminados

L. M. P. Durão¹, D. J. S. Gonçalves¹, V.H.C. de Albuquerque^{2,3}, J.M.R.S. Tavares³

¹ ISEP/CIDEM, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica

² Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT)

³ INEGI/FEUP, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial / Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica

RESUMO

A utilização crescente de materiais compósitos nos mais variados domínios coloca novos desafios no projecto de ferramentas de corte dedicadas a este tipo de materiais, ao invés da tradicional adaptação das ferramentas desenvolvidas para materiais metálicos. Neste artigo apresenta-se um estudo comparativo de geometrias de broca com o objectivo de reduzir o dano associado. Para tal, são analisadas as forças desenvolvidas durante o processo de furação, a extensão da zona delaminada em redor do furo produzido e efectuados ensaios mecânicos com o objectivo de estabelecer uma correlação entre os diversos resultados e as características mecânicas das placas maquinadas. Assim, a referida comparação permite avaliar a importância da escolha adequada da geometria de ferramenta na diminuição do dano provocado e na melhoria das características mecânicas das peças envolvidas.

1- INTRODUÇÃO

1.1 - Materiais Compósitos

Os compósitos constituem um dos mais interessantes grupos de materiais da nossa sociedade tecnológica. O baixo peso e a elevada resistência que apresentam tornam estes materiais ideais em aplicações para as quais são desejadas elevadas rigidez e resistência mecânica. Desta forma não admira que nas últimas décadas os materiais compósitos, nomeadamente os de matriz polimérica, tenham vindo a aumentar a sua importância e alargado de uma forma continuada a sua utilização. As primeiras utilizações destes materiais, designadamente os compósitos do tipo polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC), foram essencialmente relacionadas com as indústrias aeroespacial e aeronáutica. À medida que a capacidade de produção de fibra de carbono a nível mundial foi crescendo, assistiu-se a uma redução considerável do

seu preço, levando a sua utilização a outras indústrias, tais como a de construção ou competição automóvel, ferroviária, energética, construção ou produção de artigos desportivos – ténis, golfe, ciclismo.

Após a sua produção, é frequente que as placas em PRFC tenham de ser sujeitas a operações de furação com a finalidade de permitir a sua ligação mecânica com parafusos ou rebites a outras peças ou estruturas. Em regra, aceita-se que estas operações possam ser efectuadas recorrendo aos métodos e ferramentas tradicionalmente utilizadas em peças metálicas, com algumas adaptações. Contudo, a natureza não homogénea dos materiais compósitos levanta algumas dificuldades na operação de furação, sendo frequente a existência de uma orla de dano à volta da periferia do furo efectuado. Os principais danos que normalmente estão associados à furação de laminados compósitos são a delaminação, o arrancamento de fibras, o descolamento fibra-matriz e os danos térmicos (Wern,

1994). A delaminação – descolamento de camadas adjacentes do laminado – é um dos danos mais frequente e tem como consequência uma perda das propriedades mecânicas da placa à volta da zona de ligação. Tal perda de características leva a uma diminuição da resistência estática e também da resistência à fadiga (Persson, 1997). Torna-se assim evidente que a delaminação é uma consequência indesejada deste processo de maquinagem, bem como qualquer outro tipo dano, realçando a importância do seu controlo e diminuição.

1.2 - Delaminação em Compósitos

Convém notar que, usualmente, se distinguem dois tipos de delaminação na operação de furação com brocas: 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” – Figura 1; 2) se o dano ocorre quando a ponta da broca se aproxima da extremidade oposta (lado de saída), temos a delaminação à saída ou “push-down” – Figura 2 (Davim, 2007).

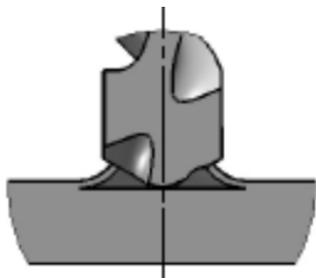


Figura 1 – Mecanismo de delaminação “peel-up”.

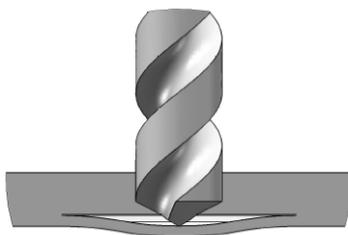


Figura 2 – Mecanismo de delaminação “push-down”.

O primeiro tipo de delaminação é uma consequência da acção de abrasão devida ao início do contacto entre a broca e a peça. Em consequência do avanço da ferramenta o material tende a ser puxado

para cima ao longo das espiras da broca em vez de ser cortado. Este efeito leva a que as camadas superiores do material se separem do resto da placa (Figura 1). Normalmente uma redução do avanço é suficiente para evitar este tipo de delaminação (Hocheng e Dharan, 1990).

O segundo tipo de delaminação é causado pelo efeito compressivo exercido pela extremidade da broca – quasi-estacionária – sobre as camadas não cortadas do laminado. Estas camadas tendem a ser empurradas para fora da placa provocando a rotura das ligações entre duas camadas consecutivas (Stuart, 1991). Se a força exercida pela broca no processo de furação exceder a resistência interlaminar da placa ocorre a delaminação, Figura 2.

A delaminação à saída torna-se mais difícil de evitar, justificando as diferentes abordagens a que se tem assistido, ver por exemplo (Piquet, 2000; Persson, 1997; Dharan e Won, 2000; Hocheng e Tsao, 2005; Won e Dharan, 2002; Tsao e Hocheng, 2005a; Durão, 2008a). Geralmente reconhece-se que a delaminação pode ser reduzida através de uma correcta selecção dos parâmetros de corte, nomeadamente o avanço, do material e geometria da ferramenta de corte – broca, ver por exemplo (Park, 1995; Stone e Krishnamurthy, 1996; Piquet, 2000; Davim e Reis, 2003; Hocheng e Tsao, 2006; Tsao e Hocheng, 2007). Uma nova broca de furação progressiva em dois diâmetros, e designada por bidiametral, foi apresentada em Durão, (2008b), com o objectivo de diminuir este tipo de dano.

1.3 - Avaliação do dano

Por ser um defeito que ocorre não só nas últimas camadas da peça mas também nas camadas interiores, a delaminação é de difícil detecção por simples inspecção visual. Assim, torna-se necessário recorrer a métodos de ensaio não destrutivo para a avaliação deste tipo de dano, tais como a utilização de análise microscópica em placas em resina epóxida reforçada com fibra de vidro (Davim, 2007) radiografia

de contraste (Durão, 2008a), varrimento ultrasónico (C-Scan) (Durão 2008b, Tsao e Hocheng, 2005) ou tomografia axial computadorizada (Tsao e Hocheng, 2005b). O recurso a qualquer uma destas técnicas de imagiologia é complementado com um processo de análise das imagens adquiridas para determinação das dimensões consideradas necessárias – diâmetros ou áreas – para a caracterização do dano envolvido.

Neste artigo é apresentada a comparação do comportamento em materiais compósitos de diferentes geometrias de broca. Os furos em análise foram realizados em placas de 4 mm de espessura fabricadas a partir de pré-impregnado de resina epóxida com fibra de carbono e configuração “cross-ply”.

Os dados experimentais de análise foram obtidos através da monitorização das forças axiais que se desenvolvem durante a operação de furação e a avaliação do dano efectuado com o auxílio de imagens de radiografia e técnicas de processamento e análise de imagem (Durão, 2009). A partir da avaliação imagiológica é aplicado um critério de avaliação da qualidade dos furos maquinados e discutidas as suas consequências recorrendo a ensaios mecânicos.

2- TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1 - Preparação das placas

O trabalho experimental dividiu-se em três fases: execução de séries de furos em placas carbono/epóxido para monitorização das forças axiais, aquisição das imagens de radiografia 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, obtidos 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 é de 3,8 mm. De seguida, as placas produzidas foram cortadas com um disco abrasivo em provetes de 165 x 96 mm² para ensaios de furação, Figura 3, e de 250 x 36 mm² para ensaios mecânicos.

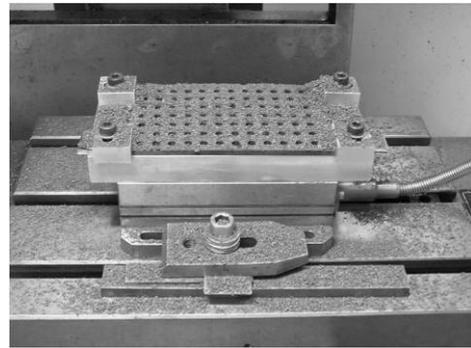


Figura 3 – Aspecto da placa furada.

2.2 - Procedimento dos ensaios de furação

Os ensaios de furação foram realizados numa máquina CNC DENFORD Triac Centre com 3,7 kW de potência, velocidade de rotação máxima de 7500 rpm e velocidades de avanço de 0 a 2000 mm/min, Figura 4.

Durante a furação, a força axial (F_z) foi monitorizada através de um dinamómetro Kistler 9257B associado a um computador para recolha de dados. As placas foram furadas sem utilização de placa sacrificial colocada por baixo da zona de saída da broca o que proporciona um maior efeito de delaminação.



Figura 4 – Montagem experimental

Considerando os objectivos deste trabalho, seis geometrias de brocas foram utilizadas. Todos os furos realizados foram de 6 mm de diâmetro e todas as brocas em carboneto de tungsténio, grau K20. As geometrias seleccionadas para a fase de ensaio de furação descrevem-se a seguir.

Tabela 1 – Parâmetros de corte.

Broca	Velocidade de corte (m/s)	Avanço (mm/rot)	
Helic. 120°	53	0,02	
Helic. 85°			
Brad			
Dagger			0,06
BidiametralD			0,12
BidiametralH			

2.3 - Brocas utilizadas

As brocas diferiam entre si na geometria, factor relevante para a diminuição da ocorrência da delaminação, uma vez que os parâmetros de corte eram os mesmos, Tabela 1. A broca helicoidal tem uma geometria padrão, comum em qualquer fabricante deste tipo de ferramentas, e é normalmente considerada a broca com mais vasto campo de aplicação. Neste trabalho são comparados dois ângulos de ponta, respectivamente 120° e 85°, uma vez que o efeito estacionário da ponta da broca é diferente em função do ângulo de ponta – Figuras 5a e b.

A broca tipo Brad apresenta uma geometria de ponta específica, em forma de foice, que provoca o tensionamento das fibras antes do seu corte, proporcionando um corte “limpo” destas, Figura 5c. Em consequência a superfície maquinada fica com menor rugosidade. Esta geometria teve a seu primeiro campo de aplicação na furação de madeira, mas o seu uso em materiais laminados tem-se revelado interessante, conferindo um bom acabamento visual às peças.

A broca Dagger tem um ângulo de ponta menor (30°) diminuindo o efeito de indentação, mas necessitando de um maior espaço para a saída da broca, prolongando o tempo de corte, Figura 5d.

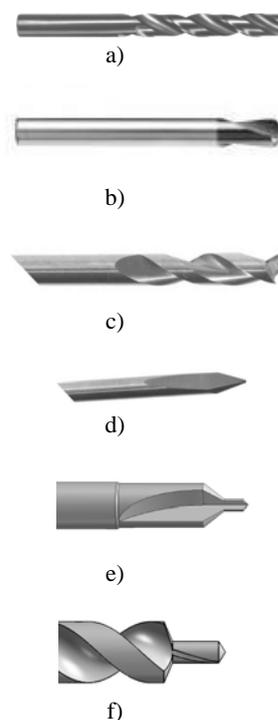


Figura 5 – Brocas consideradas experimentalmente: a) helicoidal 120°, b) helicoidal 85°, c) Brad, d) Dagger. e) bidiametral dentes direitos e f) bidiametral helicoidal.

Finalmente, foi experimentada uma broca de desenho bidiametral com diâmetros de 1.5 e 6 mm, dividindo a operação de furação em duas fases. Tal geometria proporciona uma redução da força axial máxima atingida durante a furação e a redução do efeito de indentação causado pela ponta da broca numa furação efectuada num só passo. Esta broca foi utilizada segundo duas configurações que se distinguiam pelo tipo de corte proporcionado: 1) configuração de dentes direitos, sem ângulo de corte, (Durão, 2008c), Figura 5e; 2) existência de uma hélice de corte, criando assim a situação típica das brocas helicoidais de ângulo de corte variável ao longo de uma rotação da broca, Figura 5f.

2.4 - Procedimento do trabalho de radiografia

As placas utilizadas neste trabalho são opacas, não permitindo a simples aplicação de um microscópio óptico para a determinação da área delaminada. Assim, tornou-se necessário recorrer a um método de aquisição de imagens internas da região

do dano. A técnica de radiografia permite análise não-destrutiva que se adapta particularmente bem a defeitos que se localizam num plano perpendicular à direcção de incidência dos raios X, como é o caso das delaminações. No entanto, esta detecção só é possível mediante o uso de um líquido contrastante com características rádio-opacas. Deste modo, imagens das placas furadas foram adquiridas por radiografia após imersão durante 90 minutos em líquido contrastante. O aparelho utilizado tinha uma voltagem no tubo de raio-X de 60 kV e um comprimento de onda 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, Figura 6. As regiões de dano localizam-se em zonas aproximadamente circulares à volta dos furos respectivos.

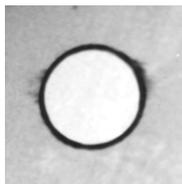


Figura 6 – Exemplo de radiografia de uma placa

2.5 - Aplicação das técnicas de processamento e análise de imagem

Para ser possível determinar-se características a partir de uma imagem, usualmente designada por análise de imagem, é inicialmente necessário realizar duas etapas: 1) pré-processamento da imagem original, 2) segmentação da imagem pré-processada. A primeira etapa consiste na aplicação de uma ou mais operações no sentido de melhorar e realçar a informação de interesse contida na imagem original, como eliminação de ruído ou de correcção de defeitos geométricos. A segunda etapa, consiste na aplicação de operações no sentido de identificar as regiões, objectos ou estruturas presentes nas imagens e das quais se pretende-se extrair características. Finalmente, são obtidas as características das regiões, objectos ou estruturas segmentadas, (Tavares, 2000).

Neste trabalho, no pré-processamento das imagens adquiridas por raio-X foi utilizado um filtro de média para diminuir o ruído presente (Schalkoff, 1989). De seguida, as imagens foram segmentadas usando uma rede neuronal artificial treinada (Albuquerque, 2009). Finalmente, das regiões obtidas pela segmentação, referentes ao furo e à zona de delaminação, foram obtidas automaticamente as medidas necessárias para as caracterizar: diâmetros e áreas (Albuquerque, 2009).

2.6 - Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos tiveram por finalidade a obtenção de resultados que permitam avaliar de uma forma objectiva o efeito da delaminação nas propriedades mecânicas de uma placa nas zonas em que são efectuados furos para posterior ligação a outras peças.

Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos com o ensaio “Open-hole Tensile Strength” de acordo com a norma ASTM D5766M – 07. De acordo com as condições estabelecidas na referida norma, as placas de 250x36 mm² foram furadas ao centro e posteriormente traccionadas sendo registado o valor da força de rotura. A tensão de rotura é o resultado da divisão da força máxima pela secção da placa, sendo esta considerada como sem furo para efeito deste cálculo. Para além dos valores da força, foi ainda registado o deslocamento do travessão superior da máquina ao qual ocorreu a rotura e o modo de rotura. Segundo a norma, são considerados três possíveis modos aceitáveis de rotura: LGM, em que a rotura ocorre perpendicularmente à direcção da solicitação ao longo de uma linha que passa pelo centro do furo; AGM, em que a rotura ocorre a partir do furo mas em direcções não perpendiculares à solicitação; e MGM em que a rotura ocorre em diversas direcções perpendiculares ou não à direcção de solicitação, mas sempre a partir da orla do furo.

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma máquina universal Shimadzu AG-X/100 kN com acessórios adequados à

execução do teste. Adicionalmente, para efeitos de comparação e validação, foram ainda realizados ensaio de tracção em placas não furadas segundo a norma ASTM D3039M-95a.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Forças durante a furação

Os resultados relativos aos valores máximos da força axial durante a furação representam a média de seis furos realizados em condições experimentais idênticas. Tendo em conta que o início da delaminação depende da força axial, foi considerado para efeitos de comparação o valor máximo atingido durante a furação. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7.

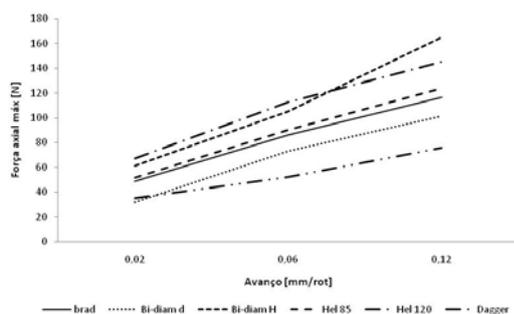
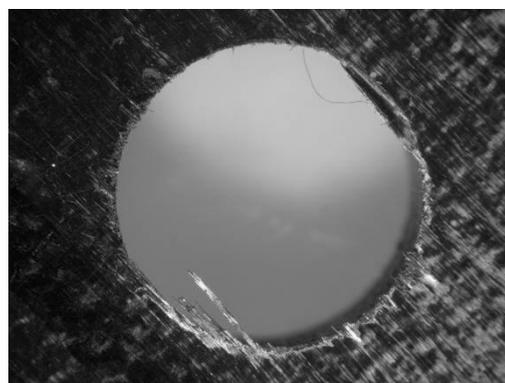


Figura 7 – Força máxima em função do avanço.

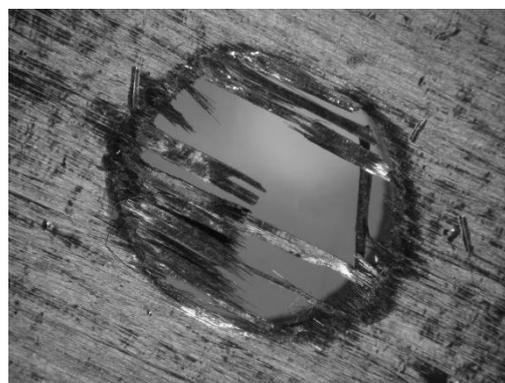
A análise dos resultados mostra que para avanços mais elevados a força axial é sempre maior, independentemente da geometria de broca utilizada. Este resultado era esperado e apenas confirma os resultados mostrados em trabalhos anteriores e referidos na secção 1.2. As diferenças entre os diversos valores obtidos relacionam-se com a geometria da broca. Assim, é possível afirmar que há uma correspondência entre a geometria da ferramenta e o valor máximo atingido pela força axial durante a furação e que esta correspondência tem uma ligação com o ângulo de ponta da ferramenta e a forma como o corte se inicia. A broca Dagger, com um ângulo de ponta de 30° e dentes diretos, bem como a broca bidiametral de dentes diretos reduzem o efeito de indentação pois o contacto entre as arestas cortantes e o laminado é quase imediato.

Nas restantes brocas há uma região central, normalmente designada por lábio, que não tem qualquer efeito cortante, antes ajudando ao guiamento da ferramenta. Desta forma, não surpreende que as brocas de cortantes helicoidais com ângulos de ponta mais elevados – 118° – tenham os valores mais elevados de força axial.

Pode-se igualmente afirmar que o aspecto visual dos furos é melhor nos que são executados com brocas helicoidais, como se mostra na Figura 8, que compara um furo efectuado com uma broca helicoidal, Figura 8a, e um furo com uma broca de dentes diretos, Figura 8b.



a)



b)

Fig. 8 – Aspecto de uma placa furada: a) broca helicoidal 120°; b) broca Dagger.

3.2 - Delaminação

O passo seguinte neste estudo foi a avaliação da extensão da zona delaminada, através da sequência explicada nas secções 2.4 e 2.5. Para a avaliação e comparação do dano à volta do furo, foi utilizado o factor de delaminação (Chen, 1997), definido como o quociente entre o máximo

diâmetro delaminado e o diâmetro nominal do furo. Este critério, de aplicação simples, mostra-se adequado em casos em que a delaminação tem a forma de uma orla à volta da periferia do furo, Figura 6.

Tabela 2 – Resultados da delaminação.

Broca	Factor de delaminação (F _d)		
	0,02	0,06	0,12
Avanço (mm/rot)			
Helic.120°	1,102	1,115	1,134
Helic. 85°	1,206	1,203	1,253
Brad	1,122	1,226	1,367
Dagger	1,098	1,126	1,210
BidiametralD	1,031	1,135	1,133
BidiametralH	1,208	1,154	1,208

Os resultados desta medição, Tabela 2, mostram que, tal como esperado, a um aumento do avanço corresponde um agravamento da delaminação, tal como já acontecia com a força axial. Este efeito pode ser explicado pela indentação provocada pela ponta da broca que, com avanços maiores, resulta numa força axial mais elevada. Ao exercer uma força maior sobre a mesma área e espessura de placa não cortada, a delaminação tende a ocorrer mais cedo, pois a sua ocorrência depende essencialmente de propriedades características do laminado tal como o seu módulo de elasticidade ou resistência interlaminar.

Mais importante é a comparação dos resultados obtidos para as diferentes geometrias de placa e que mostram uma relação diversa da obtida nas forças. Assim, a menor delaminação foi obtida, nas condições experimentais descritas, com a broca helicoidal com 120° de ângulo de ponta e a maior delaminação com a broca Brad. De notar ainda alguns resultados interessantes na comparação das diferentes geometrias utilizadas. Nas duas brocas helicoidais verifica-se que a opção por um ângulo de ponta menor, embora reduzindo as forças axiais, não reduz a delaminação. Em consequência, um ângulo de ponta de 120° parece mais favorável à redução da delaminação. A broca Dagger tem uma delaminação muito mais extensa do que aquela que seria de supor com base nos resultados da força axial o que,

associado ao fraco aspecto visual dos furos obtidos com esta broca, indica que esta geometria não será a mais adequada na furação de laminados. A broca Brad só apresenta um resultado interessante para o avanço mais baixo e será desaconselhável para avanços mais elevados. Isso pode colocar alguns obstáculos ao seu uso em situações em que a produtividade seja importante. Finalmente, observando os resultados das brocas de geometria experimental, a broca bidiametral de dentes direitos parece uma melhor opção ao apresentar valores de delaminação próximos dos obtidos com a broca helicoidal de 120° de ângulo de ponta. A broca bidiametral helicoidal tem um resultado de delaminação que não era o esperado, ao ter valores mais elevados do que a de dentes direitos. Esta opção de geometria, embora reduzindo as forças de corte, não permitiu obter as melhorias esperadas.

3.3 - Ensaio mecânicos

A comparação de características mecânicas das placas para classificação dos métodos de furação não é ainda um assunto encerrado. De uma maneira geral, é considerado que nos ensaios existentes têm mais relevância as propriedades do material do que a execução do furo. Dos ensaios normalizados foi escolhido o “Open-hole tension test” para tentar avaliar o efeito da delaminação nos valores obtidos. A sua escolha baseou-se na simplicidade do ensaio e na facilidade de comparação com valores obtidos em placas não furadas. Outros ensaios referidos na literatura são o “Open-hole compression test” ou o “Bearing test” (ASTM D5961). Tratando-se de ensaios destrutivos, o seu custo torna-se mais elevado e não permite a avaliação de peças em serviço.

Nesta fase do trabalho, foram ensaiados 4 provetes em cada condição e seleccionados apenas quatro geometrias de broca e um avanço. As brocas Dagger e bidiametral helicoidal não foram incluídas e o avanço seleccionado foi o de 0,06 mm/rot.

Avaliação de ferramentas para a furação de laminados

Tabela 3 – Resultados do Open-hole tension test.

Broca	Factor de delaminação (Fd)	Tensão rotura (MPa)	Deslocamento na rotura (mm)
Helic.120°	1,115	602	8,13
BidiametralD	1,135	617	7,90
Helic.85°	1,203	608	8,64
Brad	1,226	597	7,17

No ensaio de tracção com placas sem furo a tensão de rotura média foi de 671 MPa enquanto nas placas furadas a tensão de rotura média foi de 606 MPa. Estes valores mostram que a existência do furo provoca um abaixamento da tensão de rotura do material que pode ser explicada pela existência do furo e respectiva delaminação. Na Tabela 3 mostram-se os valores da tensão e deslocamento na rotura em placas furadas e a delaminação observada. Da análise dos resultados pode-se apontar que, embora uma correlação de valores de delaminação com a tensão de rotura pareça possível de estabelecer, alguns valores apontam na direcção contrária. Note-se o caso dos resultados com as brocas helicoidais, em que a placa furada com a broca de 85° de ângulo de ponta tem uma tensão de rotura mais elevada do que a furada com a de 120°. Desta forma, e porque os valores de deslocamento não permitem qualquer conclusão, este teste não pode ser considerado como conclusivo, mas apenas como uma indicação. De notar que o leque de resultados aqui mostrados é menos alargado do que os obtidos para a delaminação.

Pode-se dizer que serão necessários mais dados até conseguir obter uma resposta adequada à possibilidade de utilizar este ensaio como indicador da qualidade do furo.

Fica igualmente em aberto a futura realização de outros ensaios com o mesmo objectivo.

4- CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia de comparação de diferentes geometrias de broca na furação de placas em laminados carbono/epóxico através da monitorização de forças durante a furação,

avaliação da delaminação à volta dos furos e realização de um ensaio mecânico – “Open-hole tensile strength”.

Do trabalho apresentado é possível obter algumas conclusões:

- os valores de força máxima durante a furação dependem da geometria da broca e do avanço escolhido;

- os valores de delaminação dependem igualmente da geometria da broca e do avanço escolhido, embora não da mesma forma;

- o aumento do avanço faz aumentar quer o valor da força máxima durante a furação quer a delaminação observada;

- a geometria de broca tem efeitos diversos, sendo o valor mais baixo de força obtido com a broca Dagger 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;

- os valores obtidos nos ensaios mecânicos não reflectem a totalidade das situações experimentais, pelo que devem ser considerados apenas como indicadores;

- 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 um avanço baixo - 0,02 mm/rot – com uma broca helicoidal com 120° de ângulo de ponta.

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 composites structures”.

Da mesma forma, os autores agradecem às Oficinas Mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto

pela cedência do equipamento de furação e ao Eng. Victor Manuel da Costa Ribeiro por todo o apoio prestado.

5- REFERÊNCIAS

- Albuquerque, V.H.C. de, Tavares, J.M.R.S., Durão, L.M.P. 2009. Evaluation of Delamination Damage on Composite Plates using an Artificial Neural Network for the Radiographic Image Analysis, *Journal of Composite Materials*, SAGE Publications, ISSN: 1530-793X, DOI: 10.1177/0021998309351244 (in press)
- ASTM D5766M-07, 2007. Standard test method for Open hole tensile strength of polymer matrix composite materials.
- ASTM D3039-00, 2000. Standard test method for tensile properties of fiber-resin composites.
- Chen, W. C. 1997. Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, v. 37, p. 1097-1108.
- Davim, J.P.; Reis, P. 2003. Drilling carbon fibre reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study, *Materials and design*, v. 24, p. 315-324.
- Davim, J.P., Rubio, J.C., Abrao, A.M. 2007. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates, *Composites Science and Technology*, 67, p. 1939-1945.
- Dharan, C. H. K.; Won, M. S. 2000. Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates, *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, v. 39, p. 415-426.
- Durão, L. M. P ; Tavares, J. M. R. S., Marques, A.T., Baptista, A.M., Magalhães, A.G. 2008. Damage analysis of carbon/epoxy plates after drilling, *Int. Journal of Materials and Product Technology*, v. 32, p. 226-242.
- Durão, L.M.P., Tavares, J.M.R.S., Marques A.T., Magalhães, A.G., Freitas, M. 2008. Estudo da influência da pré-furação no dano em laminados carbono/epóxido, *Mecânica Experimental, Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET)*, vol. 15, p. 73-81, ISSN 1646-7078.
- Durão, L.M.P., Magalhães, A.G., Marques A.T., Tavares, J.M.R.S. 2008. Influência dos parâmetros de maquinação no dano de placas compósitas, *Mecânica Experimental, Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET)*, vol 16, p. 45-54, ISSN 1646-7078.
- Durão, L.M.P., Marques A.T., Magalhães, A.G., Silva, J.F., Tavares, J.M.R.S. 2009. Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: evaluation of a special step drill, *Composites Science and Technology*, v. 69, p. 2376-2382.
- Hocheng, H., Dharan, C. K. H., 1990. Delamination during drilling in composite laminates *J. of Engineering for Industry*, v. 112, p. 236-239.
- Hocheng, H.; Tsao, C.C. 2005. The path towards delamination-free drilling of composite materials, *J. of Materials Processing Technology* v. 167, p. 251-264.
- Hocheng, H.; Tsao, C.C. 2006. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, v. 46, p. 1403-1416.
- Park, K.Y.; Choi, J.H., Lee, D.G. 1995. Delamination-free and high efficiency drilling of carbon fibre reinforced plastics, *J. Composite Materials*, v 29, p. 1988-2002.
- 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.
- Piquet, R.; Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P. 2000. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills, *Composites A*, v. 31, p. 1107-1115.
- Schalkoff, R.J., 1989. *Digital Image Processing and Computer Vision*. John Willey & Sons, Inc.
- Stone, R; Krishnamurthy, K. A. 1996. Neural Network Thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite-Epoxy Composites, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, v. 36 , p. 985-1003.
- Stuart, M.L. 1991. *International Encyclopaedia of Composites*, v. 2, p. 297.
- Tavares, J.M.R.S., 2000. *Análise de Movimento de Corpos Deformáveis*

Avaliação de ferramentas para a furação de laminados

usando Visão Computacional, in Faculdade de Engenharia., Tese de Doutoramento, Universidade do Porto.

Tsao, C.C.; Hocheng, H. 2005. 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.

Tsao, C.C., Hocheng, H. 2005. Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills, *Int. J Machine Tools & Manufacture*, v. 45, p. 1282-1287.

Tsao, C.C.; Hocheng, H. 2007. Parametric study on thrust force of core drill, *J. Materials Processing Technology*, v. 192-193, p. 37-40.

Wern, C.W.; Ramulu, M., Schukla, A. 1994. Investigation of Stresses in the Orthogonal Cutting of Fiber-Reinforced Plastics, *Experimental Mechanics*, p. 33 – 41.

Won, M. S; Dharan, C. H. K. 2002. Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates *Trans. ASME J. Manuf. Science and Eng.*, v. 124, p. 242-247.