

DELAMINAÇÃO NA FURAÇÃO DE LAMINADOS CARBONO/EPÓXIDO

**Luís Miguel P. Durão¹, Daniel J.S. Gonçalves², João Manuel R.S. Tavares², Victor Hugo C. de Albuquerque³,
A. Monteiro Baptista²**

1- ISEP/CIDEM - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Portugal, lmd@eu.ipp.pt

2- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) / Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, dgoncalves@inegi.up.pt, {tavares, amb}@fe.up.pt

3- Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT), Brasil, victor120585@yahoo.com.br

Palavras chave: Materiais Compósitos, Dano, Forças Axiais, Ensaio não-destrutivos, Ensaio de esmagamento

Resumo

A produção de peças estruturais em materiais compósitos, nomeadamente os de matriz epóxida reforçada com fibras de carbono, tem-se tornado cada vez mais importante face à combinação das suas características específicas, como elevada rigidez e o baixo peso. Embora por um lado o custo destes materiais tenha vindo a tornar-se numa barreira cada vez menor para a sua utilização, a necessidade de operações de acabamento, incluindo a furação, aumenta o custo final das peças dificultando a sua utilização. De facto, as dificuldades e os danos associados à operação de furação, e consequentes rejeições por falta de qualidade, podem acarretar um custo final considerável. Tais dificuldades resultam da natureza não-homogénea dos compósitos, podendo resultar na ocorrência de diversos tipos de dano, sendo os mais frequentes a delaminação, o arrancamento das fibras e os danos devidos ao sobreaquecimento da matriz.

Neste trabalho são apresentados os resultados de um estudo comparativo de furação de placas carbono/epóxido, variando o diâmetro e a geometria da ferramenta e utilizando uma velocidade de corte constante e dois avanços distintos. Durante a furação foi efectuada uma medição das forças axiais para posterior comparação com a avaliação da extensão do dano. A análise de dano baseou-se na realização de ensaios não-destrutivos às placas furadas, por radiografia digital com recurso a líquidos contrastantes. Para medição da extensão do dano recorreu-se a técnicas de processamento e análise de imagem. Adicionalmente, os valores resultantes da aplicação de critérios de quantificação da extensão do dano foram comparados com os resultados do ensaio mecânico de esmagamento, "Bearing test" ASTM D5961-08.

Os resultados experimentais obtidos permitem confirmar e quantificar a importância de uma selecção adequada das ferramentas e parâmetros de corte na minimização do dano causado pela execução de furos em laminados carbono/epóxido.

1. Introdução

Os materiais compósitos definem-se como uma mistura ou combinação de dois ou mais macroconstituintes que diferem entre si na forma e/ou composição sendo insolúveis entre si. Os constituintes mantêm a sua identidade e interagem entre si de modo a que o material resultante (compósito) apresenta um conjunto de propriedades superiores às obtidas pela simples soma das propriedades independentes dos constituintes. Geralmente, os componentes podem ser identificados por análise visual ou com o auxílio de um microscópio sendo visível a interface entre os constituintes do material compósito.

Mais recentemente, os materiais compósitos, nomeadamente os de matriz polimérica, têm vindo a afirmar-se como um dos grupos de materiais de crescente aplicação em variados tipos de indústrias. As suas principais características, tais como, baixa densidade e uma relação favorável resistência / peso, tornam-nos ideais em aplicações em que se pretende combinar resistência mecânica, rigidez e baixo peso. Entre os diversos tipos de aplicação existentes, deve-se realçar a utilização intensiva deste tipo de materiais nos novos aviões de transporte da Boeing – 787 – e da Airbus – A380. Outros exemplos podem ser facilmente encontrados na indústria automóvel, de transporte ferroviário, de produção de energia, em equipamentos desportivos e em equipamento domésticos, sendo sempre relevada a resistência mecânica e o baixo peso.

1.1. Furação de Materiais Compósitos

Embora as peças em materiais compósitos de matriz polimérica sejam produzidas em forma “quase-final”, a posterior maquinagem destas peças torna-se necessária em resultado do cumprimento de tolerâncias de montagem ou da realização de furos para possibilitar a ligação de peças em estruturas. Um dos processos de maquinagem mais utilizado, para permitir a referida ligação por parafusos, rebites ou cavilhas, é a furação. Esta operação de maquinagem pode ser realizada com máquinas e ferramentas convencionais, desde que devidamente adaptadas. Tal adaptação resulta da necessidade de evitar a ocorrência de danos nas peças furadas e que podem levar à sua posterior rejeição antes mesmo da entrada em serviço ou à diminuição da sua vida útil. De notar que a maquinagem destes materiais, devido à sua heterogeneidade, não segue os mesmos pressupostos relativamente à influência dos parâmetros de maquinagem e/ou tipo de ferramenta que normalmente se encontram associados ao fabrico de peças em materiais metálicos.

Dos diversos tipos de dano que podem resultar da furação de laminados de matriz polimérica, o mais frequente e indesejável é a delaminação, que se torna evidente através da existência de material da última ou últimas camadas separado das restantes camadas do laminado. Este tipo de dano localiza-se na orla à volta do furo maquinado, do lado correspondente à saída da broca. Outros modos de dano que podem ocorrer em consequência da furação são o arrancamento de fibras ou ainda os danos de origem térmica devidos ao sobreaquecimento da matriz. [1]. De todos estes danos, como já referido, o mais crítico é a delaminação, pelas consequências que podem resultar a

nível da perda de resistência mecânica na zona de ligação. Por exemplo, Persson et al [2,3] demonstraram que a redução da resistência estática ou à fadiga pode ser reduzida em cerca de 10%. Em [4], Durão et al mostraram que a tensão de esmagamento, que avalia a resistência mecânica na zona de ligação, pode melhorar 4% apenas pela selecção de condições de furação mais adequadas. Torna-se assim evidente que a redução deste tipo de dano é de primordial importância para a indústria relacionada com a produção de peças em materiais compósitos laminados. Contudo, tais resultados só se podem obter com um melhor conhecimento dos mecanismos que levam ao aparecimento da delaminação e dos factores que permitem evitar este tipo de dano.

1.2. Mecanismos de Delaminação

A delaminação é definida como a separação de camadas adjacentes do laminado e representa um tipo de dano em que a propagação está confinada a um plano. Nesta definição cabem dois tipos de delaminação que podem ocorrer durante a operação de furação: a delaminação à entrada e a delaminação à saída, Figuras 1a) e 1b).

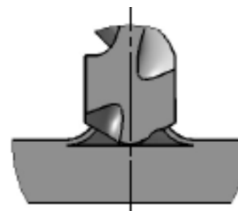


Figura 1a) Delaminação à entrada.



Figura 1b) Delaminação à saída.

O primeiro mecanismo (Figura 1a) é a consequência do contacto da extremidade da broca com as camadas superiores do laminado. Quando se inicia o corte, o material tende a ser puxado pela hélice da broca, num mecanismo semelhante a um “saca-rolhas”. Sabe-se que o uso de avanços moderados tende a diminuir ou mesmo anular este efeito [5]. O segundo mecanismo (Figura 1b), mais difícil de evitar, é causado 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 [6]. 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 [5]. Este tipo de dano pode ser minimizado através da diminuição da força axial exercida pela broca durante a furação.

Diversos estudos têm sido apresentados com o objectivo de obter furos sem delaminação (delamination-free). Assim, podem ser referidos os trabalhos de Persson et al

[2,3] em que um método de furação orbital, posteriormente patenteado e comercializado, foi apresentado, Figura 2. Neste método, o furo é efectuado através do movimento combinado de rotação da broca em torno do seu próprio eixo com um movimento excêntrico do seu eixo.

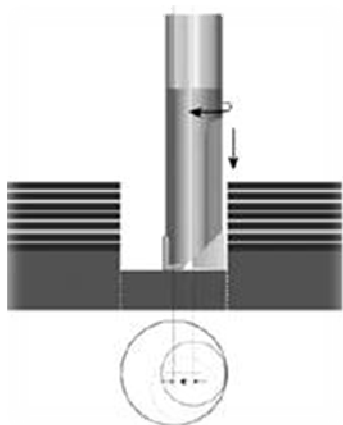


Figura 3 – Furação orbital [7].

Por outro lado, Piquet et al [8] sugere a utilização de brocas com o maior número possível de arestas cortantes, propondo três a seis, com um ângulo de ponta de 118° e uma largura de ponta tão reduzida quanto possível. Desta forma reduz-se o efeito de indentação causado pela ponta quasi-estacionária da broca. Os autores referem ainda que o recurso à furação com avanço variável permite minimizar a delaminação.

Já Stone e Khrishnamurthy [9] estudaram a implementação de uma rede neural para controlar a força axial durante a furação, de forma a otimizar o avanço em função da redução da força axial e da força crítica para o início da delaminação a cada três rotações da broca.

Outro aspecto importante nos diversos estudos existentes, relaciona-se com a importância relativa do avanço, da velocidade de corte e da geometria da ferramenta na ocorrência de delaminação. Por exemplo, Davim e Reis [10] concluíram que a influência do avanço e da velocidade de corte variavam com a geometria da ferramenta. Já Shyha et al [11] mostraram a maior importância relativa do avanço face à velocidade de corte. Adicionalmente, Hocheng e Tsao [12] compararam diversas geometrias de broca mostrando que este factor influencia a força axial durante a furação, logo a ocorrência de delaminação. Desta forma, algumas geometrias de broca poderiam ser operadas com avanços mais elevados sem agravar o risco de ocorrência de delaminação, quando comparadas com a broca helicoidal. Incluem-se neste estudo as brocas designadas por “saw drill”, “candle stick drill”, “core drill” e “step drill”, Figuras 4a) a 4d). Por outro lado, em [13] foi demonstrado o benefício na utilização de brocas tipo “step drill”.

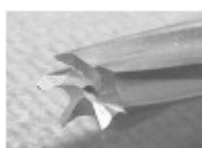


Figura 4a) – Saw drill [12];

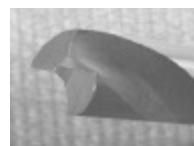


Figura 4b) Candle stick drill [12];



Figura 4c) Core drill [12];

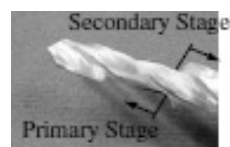


Figura 4d) – Step drill [12].

Uma outra alternativa de redução da força axial durante a furação é o recurso à pré-furação. Uma das vantagens desta estratégia de maquinagem é a redução do efeito de indentação causada pelo centro da broca [14-16].

Para além destes estudos mais focados num aspecto particular da furação e consequente dano, merecem ser mencionados os trabalhos de Hocheng e Tsao [17] bem como os de Abrão et al [18] que apresentam revisões dos contributos existentes nesta área.

1.3. Objectivos

Neste trabalho foram estudados os efeitos de duas variáveis no processo de furação de placas em laminados compósitos carbono/epóxico: material e geometria da ferramenta. A nível de materiais foram comparados os resultados obtidos com brocas helicoidais em aço rápido (HSS) carboneto de tungsténio (WC) e diamante policristalino (PCD). Ao nível de geometrias de broca foram comparadas as brocas helicoidal, Brad (semelhante à “candle stick”) e bi-diametral, que segue a mesma construção da broca “step”. A velocidade de rotação da árvore foi sempre de 2800 rpm e foram utilizados dois avanços: 0.05 mm/rot e 0.20 mm/rot. Em cada caso, foram comparados os resultados de brocas de 6 e 10 mm de diâmetro.

Os parâmetros considerados relevantes para este estudo foram a medição da força axial durante a furação, a avaliação da extensão da delaminação a partir de radiografias digitais com contraste e o ensaio de esmagamento às placas furadas, de acordo com a Norma ASTM D5961-08M [19].

2. Trabalho experimental

2.1. Produção e furação das placas

Para realizar o trabalho experimental proposto, foram fabricadas placas em carbono/epóxico a partir do pré-impregnado CC160 ET443 da SEAL® numa sequência do tipo “cross-ply” com o seguinte empilhamento: $[(0/90)_6]_s$, num total de 24 camadas. As placas foram curadas numa prensa de pratos quentes aplicando uma

pressão de 300 kPa e uma temperatura de 130 °C durante uma hora, seguido de arrefecimento dentro da prensa. A espessura final das placas foi de 4 mm. A seguir, as placas foram cortadas em provetes de dimensões adequadas, 135x36 mm², para os ensaios mecânicos pretendidos. As operações de furação foram realizadas num centro de maquinagem CNC DENFORD Triac Centre, de 3.7 kW. Como já referido, as brocas utilizadas tinham um diâmetro de 6 e de 10 mm, o que corresponde a velocidades de corte distintas, considerando que a velocidade de rotação da árvore foi mantida constante (2800 rpm). Foram considerados dois avanços, baixo e alto, sabendo à partida que a variação deste factor tem um efeito considerável no aumento da extensão do dano [9-11,17-18]. As três geometrias de broca utilizadas são mostradas na Figura 5. Detalhes adicionais sobre a sequência experimental podem ser encontrados em [20].



Figura 5a) – Broca helicoidal.



Figura 5b) – Broca Brad



Figura 5c) – Broca bi-diametral

Durante a furação procedeu-se à monitorização contínua das forças axiais, que já se sabe serem determinantes na ocorrência de delaminação, com um dinamómetro Kistler 9257B associado a um amplificador de sinal e a um computador para recolha e processamento de dados. Em nenhum caso foi utilizada placa sacrificial na furação. Nas Figuras 6 e 7 mostra-se um esquema e uma fotografia da montagem experimental utilizada.

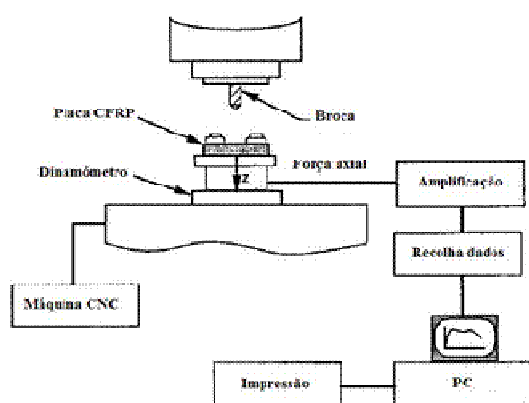


Figura 6 – Esquema da montagem experimental.



Figura 7 – Sistema experimental usado.

2.2. Avaliação da delaminação

Após furação, a avaliação da extensão da delaminação foi efectuada recorrendo a radiografia digital por contraste. Assim, as placas foram imersas em di-iodometano durante cerca de trinta minutos sendo posteriormente radiografadas usando o sistema de raio-X Kodak 2100, de 60 kV e 300 Hz, associado a um sistema de aquisição digital de imagem Kodak RVG 5100.

Seguidamente, as imagens radiográficas foram processadas e analisadas de forma a obter a segmentação e posterior caracterização das regiões de interesse [21]. Neste caso, três regiões foram segmentadas: 1) círculo central correspondente ao furo, 2) orla mais escura à volta do furo e que corresponde à zona delaminada e 3) zona exterior à zona do dano e que corresponde às áreas da placa testada sem qualquer dano deste tipo, Figura 8.

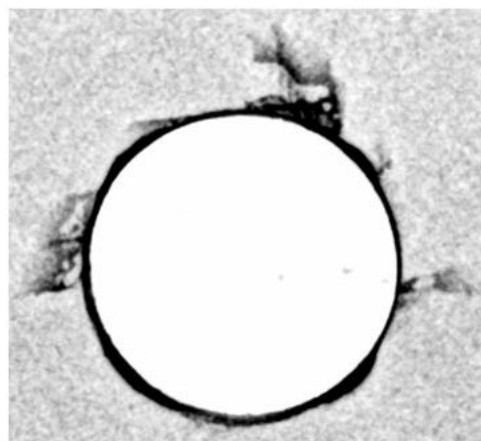


Figura 8 – Imagem obtida por radiografia digital com contraste e zonas identificadas.

O processamento e análise de imagem usado teve por objectivo obter a medição dos diâmetros e áreas considerados relevantes para a quantificação do dano à volta do furo. Para tal, foi usada na segmentação uma rede neuronal como a entrada composta por: 3 neurónios, sendo cada um correspondente a cada espaço de cor primário (vermelho/verde/azul) associado a 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 [22], 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 [23], que apresenta 3 valores da saída: 1 (um), 0 (zero) e -1 (um). Desta forma, embora a rede seja usada neste trabalho para segmentar apenas imagens em níveis de cinzento (0 a 255 níveis) e segmentar unicamente três classes (furo, regiões delaminada e não delaminada), pode ser usada na segmentação até 27 classes distintas a partir de imagens de cor.

Na abordagem desenvolvida, a rede neuronal foi inicialmente treinada a partir de um conjunto de imagens representativas da segmentação a realizar, nomeadamente pela selecção manual em cada uma dessas imagens de alguns pixels representativos de cada classe desejada. Esta operação apenas necessitou de ser realizada uma vez para segmentar o conjunto de imagens usado neste experimento, tendo sido usados 15 pixels de cada uma das 3 classes a segmentar nas imagens de treino, correspondentes a 20% do total de imagens.

O algoritmo usado no treino da rede neuronal é o *backpropagation multilayer perceptron learning algorithm* [24], 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.

Após as regiões furo e delaminada estarem segmentadas, 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 [22] ou da área de dano.

Mais detalhes sobre o procedimento e análise das imagens experimentais, podem ser encontrados em [22, 25, 26]. Um exemplo do resultado obtido pelo procedimento usado é mostrado na Figura 9.

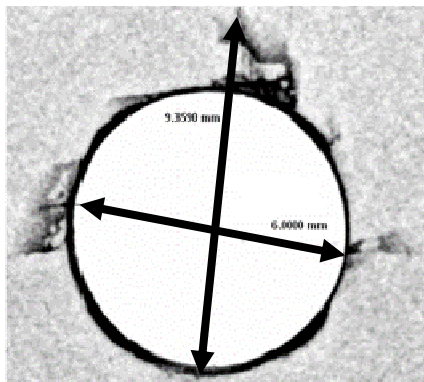


Figura 9 – Exemplo dos diâmetros obtidos para o furo e para a zona delaminada.

Os valores obtidos para os diâmetros dos furos e das zonas delaminadas podem ser utilizados na determinação da extensão do dano. Para tal, pode ser utilizado o critério do *Factor de Delaminação* apresentado por Chen [27] e que é definido pela razão entre o maior “diâmetro” da zona delaminada (D_{max}) e o diâmetro nominal do furo (D):

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (1).$$

De notar que este critério se adapta particularmente bem a situações em que a zona delaminada corresponde a uma orla circular à volta do furo. No entanto, tal situação não ocorre em todos os casos. Assim, e aproveitando as potencialidades do sistema de processamento e análise de imagem adoptado, pode ser aplicado um critério baseado na área delaminada apresentado por Mehta et al [28] e definido pela razão entre a área delaminada (D_{MAR}) e a área nominal do furo (A_{AVG}). Este factor é conhecido como *Rácio de Dano* e define-se como:

$$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{A_{AVG}} \quad (2).$$

Foi este o critério utilizado nos resultados apresentados na Secção 3.

Uma outra resposta à limitação do critério apresentado por Chen foi dada por Davim et al [29] ao sugerir uma abordagem diferente a que chamou *Factor de Delaminação Ajustado* – F_{da} – dado por:

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D} + \beta \frac{A_{max}}{A_0} \quad (3),$$

em que D_{max} e D têm o mesmo significado da equação (1), A_{max} é a área correspondente ao maior diâmetro delaminado e A_0 é a área nominal do furo. A soma dos coeficientes de ponderação α e β deve ser 1.0 (um).

2.3. Ensaio de esmagamento

Para comparar os efeitos da delaminação na resistência mecânica das placas na zona de ligação foi utilizado o ensaio de esmagamento ASTM D5961-08M “Standard test method for Bearing response of polymer matrix composite laminates” [19]. Considerando a dimensão dos provetes de 135x36 mm², apenas as placas com furo de 6 mm foram submetidas a este ensaio. De acordo com as especificações da norma deste ensaio, deve ser respeitada uma relação de 6:1 entre a largura da placa e o diâmetro do furo. Tal relação não era respeitada nos provetes furados com brocas de 10 mm de diâmetro e como tal este ensaio não foi realizado neste caso.

Os ensaios foram realizados numa máquina universal de ensaios Shimadzu AG-X/100 kN equipada com todos acessórios necessários e ligada a um computador para controlo da máquina e recolha de dados. A velocidade do ensaio de esmagamento foi de 2 mm/min.

3. Resultados e discussão

3.1. Materiais para ferramenta

Os resultados relativos às forças axiais máximas representam a média de 4 ensaios em condições idênticas. Dada a flutuação de sinal ao longo de uma rotação da broca, foi utilizada uma média móvel com um número de

parcelas igual ao recolhido durante uma rotação desta. Desta forma reduziu-se a influência de eventuais variações pontuais por não-homogeneidade do material da placa. A comparação de materiais para as brocas incluiu a medição de força axial, o cálculo do rácio de dano e a realização do ensaio mecânico de esmagamento. Pretendia-se nesta fase do trabalho confirmar a menor adequação das brocas em aço rápido (HSS) para a furação de laminados compósitos de matriz polimérica e obter uma comparação directa entre brocas em carboneto de tungsténio (WC) e em diamante policristalino (PCD). Os resultados, todos obtidos com o menor avanço considerado (0.05 mm/rot) e apenas para brocas de 6 mm de diâmetro, são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação de materiais de ferramenta.

Material	Força axial máxima [N]	Rácio de dano Eq. (2)	Tensão de esmagamento [MPa]
Aço rápido (HSS)	167	1.58	263
Carboneto tungsténio (WC)	86	1.41	324
Diamante policristalino (PCD)	102	1.46	303

Tal como esperado, as brocas em HSS apresentaram sistematicamente os piores resultados. A força máxima durante a furação foi 94% superior, a extensão do dano 12% superior e a resistência mecânica 19% inferior, quando comparada com a broca em WC. Comparando as brocas em WC e em PCD, os resultados obtidos foram semelhantes. A maior diferença encontrou-se no valor da força axial, cerca de 19%, estando os restantes resultados na ordem dos 5%. É aceite que a maior diferença deverá aparecer na realização de um número mais elevado de furos com a mesma broca, sendo neste caso a broca em PCD mais resistente. Neste caso, como foram sempre utilizadas brocas em estado novo, não foi possível verificar este efeito. Um segundo aspecto a ter em conta seria a utilização e comparação de resultados para avanços mais elevados. Embora interessante, este aspecto não foi incluído no estudo aqui apresentado.

3.2. Comparação de geometrias de broca

Numa segunda fase, foram utilizadas diferentes geometrias de broca, todas em carboneto de tungsténio, tal como descritas na secção 2.1. A sequência experimental foi idêntica à já descrita anteriormente, tendo sido utilizadas três geometrias de broca para o diâmetro de 6 mm e duas para o diâmetro de 10 mm. Por se tratar de uma ferramenta em fase experimental, não estavam disponíveis brocas de 10 mm de diâmetro na geometria bi-diametral.

Os resultados obtidos permitiram diversos tipos de análise. Em primeiro lugar, verificou-se a influência da geometria da broca, comparando resultados obtidos com o mesmo diâmetro e os dois avanços (0.05 mm/rot e 0.20 mm/rot), Figuras 10a), 10b) e 10c), relativas à força axial, rácio de dano e tensão de esmagamento, respectivamente.

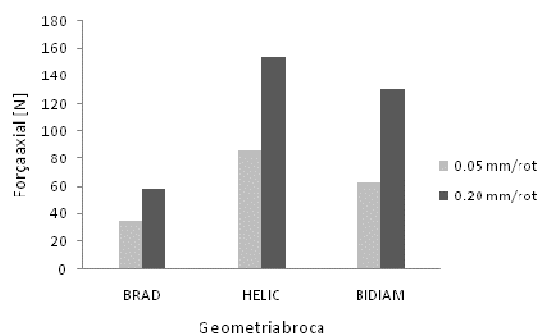


Figura 10a – Variação da força axial máxima em função da geometria da broca e do avanço.

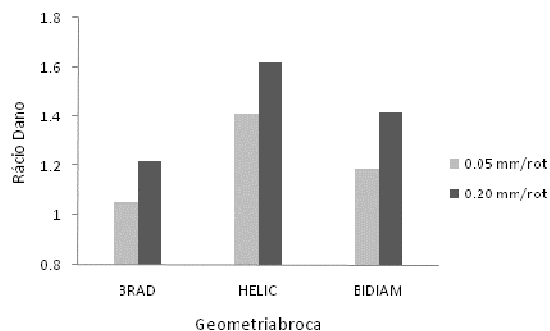


Figura 10b – Variação do Rácio de Dano em função da geometria da broca e do avanço.

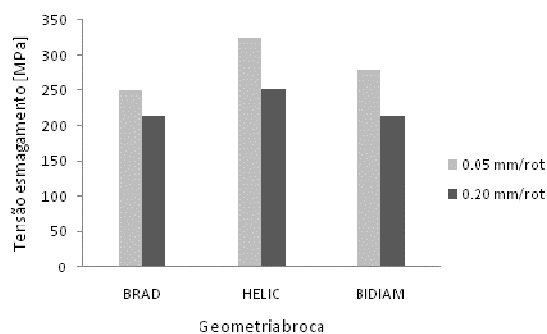


Figura 10c – Variação da tensão de esmagamento em função da geometria da broca e do avanço.

Em primeiro lugar, destacou-se o efeito da variação do avanço. Independentemente da geometria de broca, para a situação de avanço mais elevado a força axial máxima foi superior em cerca de 33%, a extensão do dano aumentou em média 12% e a resistência mecânica apresentou uma diminuição à volta de 20%.

Para cada geometria de broca, os resultados obtidos variaram e nem sempre o melhor resultado teve correspondência com o menor valor da força axial. Assim, a broca Brad, com uma geometria que permite o tensionamento das fibras antes do seu corte, permitindo a obtenção de arestas mais regulares, teve o menor valor da força axial e da extensão da delaminação, traduzido pelo menor valor do rácio de dano. No entanto, as placas furadas com esta broca foram as que apresentaram menor resistência mecânica. Esta tendência verificou-se em ambos os avanços seleccionados. O melhor resultado no ensaio mecânico foi obtido com as placas furadas com broca helicoidal, o que leva a afirmar existe uma influência da geometria de broca nos valores relativos à resistência e extensão da delaminação. A broca bidiametral apresentou

um comportamento intermédio, em que o valor da força axial é dividido pelas duas etapas de furação, reduzindo o risco de delaminação, mas apresentou uma delaminação ainda superior à obtida com a broca Brad.

3.3. Comparação de diâmetros de broca

Finalmente, e apenas para as brocas Brad e helicoidal em carboneto de tungsténio, foi efectuada a comparação para dois diâmetros de broca considerados (6 e 10 mm). Os parâmetros de corte foram iguais e foram considerados nesta comparação a força axial máxima, Figura 11a), e o rácio de dano, Figura 11b). Tal como já foi explicado na secção 2.3, os provetes não tinham as dimensões adequadas para o ensaio de esmagamento com placas furadas com brocas de 10 mm de diâmetro.

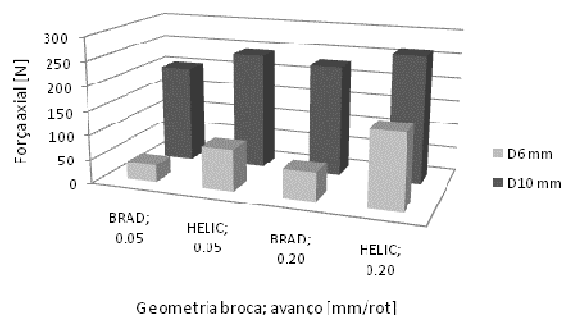


Figura 11a – Variação da força axial máxima em função do diâmetro da broca, geometria da broca e avanço.

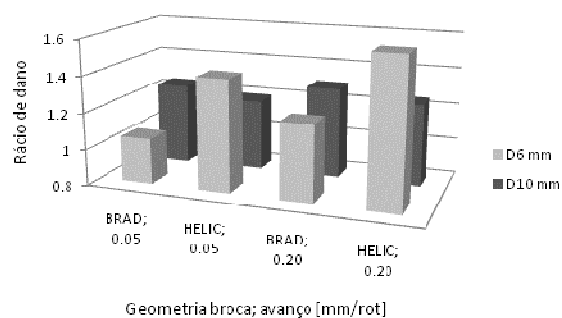


Figura 11b – Variação do Rácio de Dano em função do diâmetro da broca, geometria da broca e avanço.

Tal como seria de esperar, a maior dimensão da broca conduziu a forças axiais mais elevadas. O valor da força máxima mais do que duplicou, o que pode ser explicado pela maior secção do círculo de 10 mm. De notar que, para os dois diâmetros de broca ensaiados, os menores valores de força e de rácio de dano foram obtidos com a broca Brad. Este resultado leva a afirmar que o factor geometria de broca tem mais importância do que o diâmetro desta. Por outro lado, a dimensão do furo será sempre uma consequência do projecto da peça, enquanto a selecção do material e geometria da ferramenta bem como os parâmetros de corte vão depender de definições a nível do processo de obtenção da peça final.

Curiosamente os resultados a nível do rácio de dano, definido de forma a ser uma quantidade adimensional, parecem não depender do diâmetro do furo executado. Neste caso, os resultados parecem ter variado em função da combinação geometria de ferramenta/ avanço. No

caso das brocas Brad, verificou-se um aumento da extensão do dano com o aumento do diâmetro. Nos furos realizados com broca helicoidal, a situação inverteu-se e os furos de maior diâmetro tiveram uma menor extensão da zona delaminada, quando comparada com a área nominal do furo. Estes resultados, que podem depender largamente das condições experimentais adoptadas, permitem dizer que a escolha de geometria da ferramenta não pode ser vista de uma forma isolada, devendo ser devidamente combinada com parâmetros de corte adequados para obter o melhor valor possível a nível da extensão da delaminação e resistência mecânica das placas nas zonas de ligação.

4. Conclusões

Foi apresentado um trabalho realizado com o objectivo de comparar diferentes materiais para o fabrico de brocas e diferentes geometrias desta. Nesta análise foram utilizados dois diâmetros de broca, a velocidade de rotação foi mantida constante e foram seleccionados dois avanços, respectivamente 0.05 mm/rot e 0.20 mm/rot. Foram monitorizadas as forças durante a furação de placas em laminados carbono/epóxico, avaliada a extensão da zona delaminada em consequência da furação e realizado um ensaio mecânico de esmagamento com o objectivo de avaliar a perda de resistência mecânica das placas na zona furada. Do trabalho apresentado foi possível obter as seguintes conclusões:

- os materiais mais adequados para a furação de placas em carbono/epóxico foram o carboneto de tungsténio e o diamante policristalino;
- a geometria de broca teve uma influência directa nos resultados da força axial, extensão da zona delaminada e resistência mecânica;
- os melhores resultados a nível da força axial e do rácio de dano foram obtidas, nas condições experimentais aqui descritas, com a broca Brad em carboneto de tungsténio;
- o melhor valor de resistência mecânica foi obtido, nas condições experimentais aqui descritas, com a broca helicoidal em carboneto de tungsténio;
- o aumento do diâmetro da broca conduziu a maiores forças axiais, como seria de esperar, mas a extensão da zona delaminada, quantificada em relação à área do furo não aumenta proporcionalmente;
- a broca bidiametral de dentes direitos, resultado de um projecto de investigação, apresentou-se como uma solução de compromisso, equilibrando os diversos resultados experimentais;
- os resultados aqui mostrados evidenciam a necessidade de uma selecção adequada da geometria da broca e dos parâmetros de furação para minimizar a delaminação.

Agradecimentos

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.

O quarto autor gostaria de agradecer a FUNCAP/CNPq pelo suporte financeiro através da bolsa DCR número 35.0053/2011.1 para UNIFOR.

Referências

- [1] Wern CW, 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] Persson E, Eriksson I, Hammersberg P., “Propagation of hole machining defects in pin-loaded composite laminates”, *Journal of Composite Materials*, 31, 383-408, 1997.
- [4] Durão L M P, Magalhães A G, Marques A T, Baptista A M, Figueiredo M., “Drilling of fibre reinforced plastic laminates”, *Materials Science Forum*, 587-588, 706-710, 2008.
- [5] Hocheng H, Dharan CKH., “Delamination during drilling in composite laminates”, *Journal of Engineering for Industry*, 112: 236-239, 1990.
- [6] Stuart, ML. *International Encyclopaedia of Composites*, vol. 2: 297, 1991.
- [7] In http://www.novator.nu/Orbital_Drilling_Concept.asp, Maio de 2011
- [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”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36, 985-1003, 1996.
- [10] Davim J P, Reis P., “Drilling carbon fibre reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study”, *Materials & Design*, 24, 315-324, 2003.
- [11] Shyha IS, Aspinwall DK, Soo SL, Bradley S., “Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 1008-1014, 2009.
- [12] Hocheng H, Tsao CC. “Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1403-1416, 2006.
- [13] Gonçalves DJS, Durão LMP, Tavares JMRS, de Albuquerque VHC, Marques AT., “Evaluation of tools and cutting conditions on carbon fibre reinforced laminates”, *Materials Science Forum*, 638-642, 944-949, 2010.
- [14] Tsao C C., “The effect of pilot hole on delamination when core drilling composite materials”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1653-1661, 2006.
- [15] Won M S, Dharan CHK., “Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates”, *Transactions of ASME Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 124, 242-247, 2002.
- [16] Tsao CC, Hocheng H., “The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 1087-1092, 2003.
- [17] Hocheng H, Tsao CC., “The path towards delamination-free drilling of composite laminates”, *Journal of Materials Processing Technology*, 167, 251-264, 2005.
- [18] Abrão AM, Faria PE, Campos Rubio JC, Reis P, Davim JP., “Drilling of fiber reinforced plastics: A review”, *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 1-7, 2007.
- [19] ASTM D5961M-08, Standard test method for Bearing response of polymer matrix composite laminates, *ASTM International*, 2008.
- [20] Marques AT, Durão LMP, Magalhães AG, Silva JF, Tavares JMRS., “Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: evaluation of a special step drill”, *Composites Science & Technology*, 69, 2376-2382, 2009.
- [21] de Albuquerque VHC, Tavares JMRS, Durão LMP., “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.
- [22] Bodyanskiy Y, Kolodyazhnyi V, Otto P., *Neuro-fuzzy Kolmogorov's network for time series prediction and pattern classification*, Springer LNCS 3698:91-202, 2005.
- [23] Elliott DL, Better A., “Activation Function for Artificial Neuronal Networks”, *ISR Technical Report TR 93-8*, Institute for Systems Research, University of Maryland, 1993.
- [24] 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.
- [25] 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*, 74, 1, 36-46, 2011.
- [26] Luís Miguel P. Durão, Daniel J. S. Gonçalves, João Manuel R. S. Tavares, Victor Hugo C. de Albuquerque, A. Torres Marques, “Drilling Process Of Composite Laminates – A Tool Based Analysis”, *Proceedings of ECCM-14*, Budapest, Hungary, 7-10 June 2010.
- [27] Chen WC., “Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37, 1097-1108, 1997.
- [28] Mehta, M., Reinhart, T. J., Soni, A. H., “Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates”, *Proceedings of the Machining Composite Materials Symposium*, ASM Materials Week, 113-126, 1992.

- [29] Davim JP, Campos Rubio JC, Abrão AM, “A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates”, *Composites Science and Technology*, 67, 9, 1939-1945, 2007.