

AVALIAÇÃO DO DANO EM LAMINADOS CARBONO/EPÓXIDO APÓS FURAÇÃO

Durão, L. M. P. – lmd@isep.ipp.pt

Magalhães, A. G. – agm@isep.ipp.pt

Centro de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Marques, A. T. – marques@inegi.up.pt

Tavares, J. M. R. S. – tavares@fe.up.pt

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dept de Eng. Mecânica e Gestão Industrial

Resumo: *A furação de placas em plásticos reforçados com fibras de carbono – PRFC – causa danos típicos tais como a delaminação e outros. Tais danos não são detectáveis numa inspeção visual e podem causar o colapso prematuro de estruturas. A detecção da existência de danos é normalmente efectuada através de ensaios não-destrutivos como a radiografia e a inspeção ultrassónica com varrimento (C-Scan). A extensão do dano pode ser avaliada através do uso de critérios adequados, tais como o Factor de Delaminação – um quociente de diâmetros - e o Rácio de Dano – uma razão entre áreas. Ambos os critérios permitem estabelecer comparações entre diferentes estratégias de furação. Neste trabalho as imagens obtidas por radiografia de peças furadas utilizando três diferentes geometrias de broca num caso e três diâmetros de pré-furação no outro, são processadas e analisadas através da aplicação de técnicas usuais na Visão Computacional conjugadas com o uso de uma plataforma de processamento anteriormente desenvolvida. Os resultados da aplicação destas técnicas na avaliação das diversas estratégias de furação, tendo em vista a obtenção de valores para os critérios atrás referidos, são apresentados.*

Palavras-chave: *Compósitos, Furação, Delaminação, Processamento e análise de imagem, Visão computacional.*

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos constituem um dos mais interessantes grupos de materiais da nossa sociedade tecnológica. O seu baixo peso e elevada resistência tornam-nos ideais em aplicações em que elevadas rigidez e resistência mecânica são desejadas. Embora o desenvolvimento e aplicações iniciais destes materiais estivesse relacionada com as indústrias aeronáutica e aeroespacial, nos últimos anos temos assistido a um alargamento do seu uso noutras ramos tais como o automóvel, desporto, construção ferroviária e naval, aparelhos domésticos e muitos outros. O aumento de produção levou a que a barreira inicial constituída pelo alto custo tenha vindo a ser esbatida. No entanto a sua aplicação ainda se encontra limitada por alguns aspectos relacionados com a maquinaria das peças e sua ligação a outros componentes numa estrutura. As operações de maquinaria por arranque de aparas – furação, fresagem ou outros – costumam causar diversos danos nas peças, rápido desgaste das ferramentas e elevada rugosidade superficial levando a problemas de ordem estética pouco habituais em peças metálicas.

A execução de furos em compósitos surge da necessidade de efectuar ligações entre as diversas peças de um conjunto. A selecção de processos adequados de furação é essencial. Para tal é importante identificar o tipo de matriz e reforço utilizados, bem como a sequência de empilhamento e orientação das fibras, que pode diferir ao longo das diversas camadas.

A natureza dos compósitos, não-homogêneos e anisotrópicos, levanta problemas específicos nesta operação, que podem ter efeito na sua resistência a solicitações estáticas ou à fadiga (Persson et al, 1997). Os defeitos mais frequentes são a delaminação à entrada e/ou à saída, as fissuras inter-laminares, o descolamento fibra/matriz e as alterações térmicas. De todos estes problemas, o mais grave é a delaminação. Este tipo de defeito tem maior tendência a verificar-se nas regiões interlaminares, isto é, na transição entre duas camadas adjacentes.

A delaminação, por ser um defeito que ocorre não só nas últimas camadas da peça mas também nas camadas interiores, é de difícil detecção por simples inspeção visual. Assim torna-se necessário recorrer a métodos de ensaio não destrutivo para a avaliação deste tipo de dano.

Para a realização dos ensaios experimentais descritos neste trabalho foi utilizada uma placa de resina de epóxico reforçada com fibra de carbono, obtida a partir de pré-impregnado e com propriedades quasi-isotrópicas. Nos ensaios de furação foram utilizadas três geometrias de broca em carboneto de tungstênio com um diâmetro de 6 mm. Para uma dessas geometrias os furos foram efetuadas em duas etapas com pré-furação – três diâmetros – seguida de furação final. A extensão da zona delaminada foi avaliada através da radiografia das peças.

Os resultados obtidos dividem-se em forças observadas durante a operação de furação e avaliação do dano com o auxílio de técnicas de inspeção adequadas. A partir desses valores são calculados os resultados dos critérios de avaliação da qualidade do furo.

Finalmente, serão enumeradas as conclusões relativas à influência da pré-furação e das diferentes geometrias de broca na força axial durante a furação e na delaminação (dano mais grave) provocada pelas várias estratégias de furação utilizadas.

2. FURAÇÃO DE COMPÓSITOS

Nas operações de furação a ferramenta mais utilizada é a broca helicoidal (fig. 1). O processo de corte é complexo e pode ser dividido em duas regiões distintas: ponta da broca e arestas de corte. Numa broca convencional a região na vizinhança da ponta da broca é caracterizada por uma velocidade linear quase nula exercendo uma acção de extrusão e não de corte. Esta zona é designada por zona de indentaçao. Fora desta zona, na região designada por zona de corte secundário a velocidade de corte aumenta até atingir o valor nominal nas arestas principais de corte. A acção de corte é mais eficaz nestas regiões da broca.

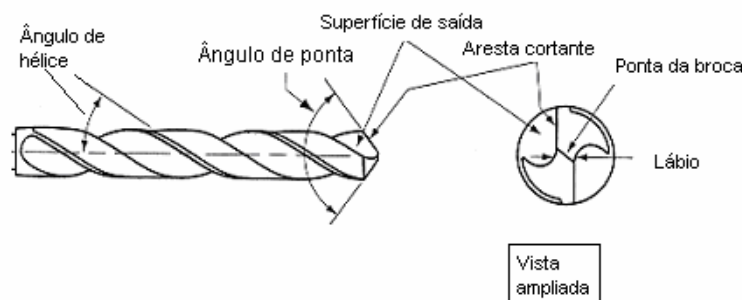


Figura 1 – Geometria de broca helicoidal

Como já foi referido, a natureza dos compósitos – não-homogêneos e anisotrópicos – levanta problemas específicos devido à furação. Para além dos danos típicos tais como a delaminação, fissuras interlaminares, arrancamento de fibras e danos térmicos pode-se ainda referir o grande desgaste das ferramentas em consequência da elevada abrasividade e baixa condutividade térmica típicas destes materiais. Tal desgaste conduz à necessidade de mudança frequente das ferramentas, afec-

tando a produtividade. Por essa razão, o uso de brocas em aço rápido é desaconselhado. No entanto, o defeito mais grave é a delaminação, pois afecta a resistência à rotura e à fadiga nas zonas de ligação dos componentes (Abrate, 1997). Este defeito ocorre no plano de contacto entre camadas adjacentes e depende não só do tipo de fibra de reforço mas também do tipo de resina e respectivas propriedades. A delaminação está dividida em dois tipos, de acordo com a região da placa em que ocorre: delaminação à entrada (peel-up) e delaminação à saída (push-down).

A delaminação à entrada é causada pela 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 (fig. 2). A redução do avanço permite solucionar este problema.

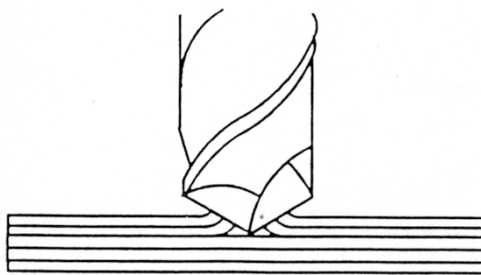


Figura 2 – Delaminação à entrada (peel-up) (Abrate, 1997)

A delaminação à saída é consequência da força compressiva que a broca exerce sobre a peça. As camadas de laminado que se encontram abaixo da broca tendem a ser separadas das camadas superiores, fracturando as ligações interlaminares na região à volta do furo. Se, num dado instante, a força se torna superior à resistência interlaminares da placa ocorre a delaminação, antes que o laminado seja totalmente penetrado pela broca (fig. 3). A escolha de uma geometria de broca ou a selecção de parâmetros de corte adequados permite reduzir a probabilidade de ocorrência deste defeito (Hocheng e Dharan, 1995).

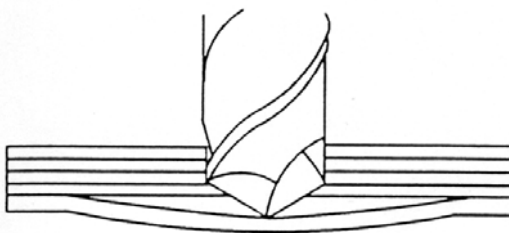


Figura 3 – Delaminação à saída (push-down) (Abrate, 1997)

Têm sido publicados diversos trabalhos tendo por objectivo a redução deste último tipo de delaminação na furação de compósitos. Piquet et al. (2000) sugeriu um desenho específico de broca em carboneto de tungsténio com um pequeno ângulo de saída – 6° – redução da largura da ponta da broca, aumento do número de arestas cortantes para três a seis e um ângulo de ponta de 118°. Refere ainda a necessidade de adoptar uma estratégia de avanço variável, recorrendo a máquinas CNC, com o objectivo de manter a força axial controlada. Um outro estudo (Park et al., 1995) propõe o uso de um movimento de avanço helicoidal com o objectivo de evitar a delaminação e as rebarbas. Um sistema mais interessante, e já patenteado, consiste na furação orbital (Persson et al., 1997) em que o método de geração do furo combina a rotação da broca em redor do seu próprio eixo com um movimento excêntrico em volta de um eixo principal ao mesmo tempo que a ferramenta avança. As vantagens deste método são a redução da força axial por via da eliminação do centro estacionário da broca, a redução do risco de encravamento da ferramenta por acumulação de aparas e possibilidade

de maquinar vários diâmetros de furo com a mesma ferramenta. A delaminação pode também ser evitada recorrendo a sistemas designados como ‘inteligentes’ em que o avanço é regulado em função da fase da furação, sendo mais lento nos momentos em que a broca entra em contacto com a placa e quando a broca fura as camadas inferiores do laminado (Dharan e Won, 2000). Com o mesmo objectivo, foi sugerida a implementação de um sistema de controlo neural para o controlo da força axial durante a furação (Stone e Krishnamurthy, 1996). Ao realizar um estudo de maquinabilidade em diferentes matrizes – epóxico, PEEK, ABS – reforçadas com fibra de carbono, Hocheng et al. (1992) encontrou um domínio preferencial de parâmetros de corte (fig. 4). O uso de valores moderados de velocidade de corte e avanço é preferível. Avanços elevados causam delaminação e rebarbas enquanto que velocidades elevadas aumentam não só a ocorrência destes defeitos mas também o desgaste das ferramentas.

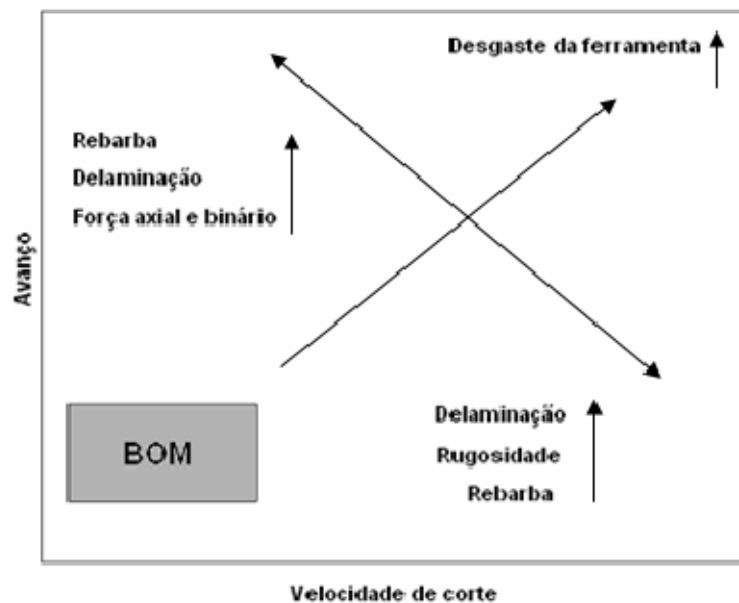


Figura 4 – Domínio de parâmetros sugerido (Hocheng et al., 1992)

Um outro método de reduzir o risco de delaminação é a utilização da pré-furação, dividindo a operação em duas etapas. Este método já é utilizado na abertura de furos de maior diâmetro e são conhecidas as suas vantagens no que respeita à redução do esforço de corte, isto é, redução da força axial necessária para efectuar a operação. O estudo das vantagens da pré-furação em laminados carbono/epóxico foi apresentado por Won e Dharan (2002). Nesse trabalho, os autores avaliaram a contribuição da ponta da broca para a força axial na furação num só passo e verificaram uma redução de cerca de 27% quando aplicavam um pré-furo. A maior redução da delaminação obteve-se com um diâmetro de pré-furo aproximadamente igual à largura da ponta da broca, ou seja 0,18 do diâmetro final. Num outro estudo, Tsao e Hocheng (2003) experimentaram vários diâmetros de pré-furação e tentaram obter uma expressão que permitisse calcular o diâmetro óptimo do pré-furo. O valor óptimo deste coeficiente deverá encontrar-se entre 0,09 e 0,2 do diâmetro final do furo, em função do coeficiente de Poisson do laminado.

A determinação analítica da força para a qual se inicia a delaminação tem sido desenvolvida a partir de equações da Mecânica da Fractura Linear-Elástica. O primeiro modelo a ser apresentado (Hocheng e Dharan, 1995) considerava algumas simplificações na sua formulação tais como a concentração da força na ponta da broca, resultando numa expressão de fácil aplicação:

$$F_{crit} = \pi \left[\frac{8G_{lc} E_1 h^3}{3(1 - \nu_{12}^2)} \right]^{1/2} \quad (1),$$

em que F_{crit} é a força crítica para a ocorrência de delaminação, G_{Ic} a taxa crítica de libertação de energia em modo I puro (isto é, em que a iniciação da fissura resulta de uma força aplicada perpendicularmente ao plano de propagação de delaminação), E_I o módulo de elasticidade e ν_{I2} o coeficiente de Poisson de uma placa unidireccional do material e h a espessura não cortada.

Um segundo modelo, igualmente de carácter genérico pressupõe o efeito da broca como uma carga distribuída sobre a área do furo (Lachaud et al., 2001):

$$F_{crit} = 8\pi \left[\frac{2G_{Ic} D}{(1/3) - (D'/8D)} \right]^{1/2} \quad (2),$$

em que os coeficientes D e D' resultam da aplicação de relações da teoria dos laminados.

Após a realização da furação nas placas, torna-se necessário definir critérios que permitam estabelecer comparações entre as diferentes estratégias de maquinagem. Deve-se sempre ter em consideração o facto que tais critérios só são aplicáveis na comparação de placas com propriedades idênticas, o mesmo tipo de reforço, sequência de empilhamento e orientação de fibras. Um desses critérios é o *Factor de Delaminação* (Chen, 1997) – F_d – que foi definido como um quociente entre o máximo diâmetro delaminado – D_{max} – e o diâmetro nominal do furo – D –:

$$F_d = D_{max} / D \quad (3)$$

Um outro critério é o *Rácio de Dano* (Mehta et al., 1992) – D_{RAT} – definido como a razão entre a área delaminada à volta do furo – D_{MAR} – e a área nominal deste – A_{AVG} –:

$$D_{RAT} = D_{MAR} / A_{AVG} \quad (4).$$

A aplicação de qualquer um destes critérios baseia-se na existência de imagens da região danificada obtidas por radiografia, C-Scan ou TAC (tomografia axial computadorizada).

3. ENSAIOS REALIZADOS

3.1 Materiais e ferramentas




Para a realização dos ensaios experimentais foi utilizada uma placa de resina de epóxico reforçada com fibra de carbono, obtida a partir de pré-impregnado e com sequência de empilhamento [(0/-45/90/45)]_{5s}, que lhe confere propriedades quasi-isotrópicas. As placas de laminado foram posteriormente curadas numa prensa de pratos quentes a uma pressão de 3 daN/cm² (bar), com aquecimento até aos 130° C, permanência a essa temperatura durante uma hora, seguida de arrefecimento. A espessura final das placas fabricadas foi de 5 mm.

Nos ensaios de furação, realizados num centro de maquinagem OKUMA MC-40VA, foram utilizadas três geometrias de broca em carboneto de tungsténio com um diâmetro de 6 mm. As geometrias comparadas foram a broca helicoidal, a broca tipo Brad e a broca Dagger. Nos furos realizados com a pré-furação foi apenas ensaiada a broca helicoidal e três diâmetros de broca: 1,1, 2,3 e 3,5 mm. De notar que o primeiro valor corresponde a aproximadamente 0,18 do diâmetro nominal do furo final, de acordo com as conclusões já referidas (Won e Dharan, 2002). As características das brocas bem como os parâmetros de corte utilizados são apresentados na tab. 1.

Em todas as pré-furações foi utilizada uma velocidade de rotação de 4200 rpm e um avanço de 0,03 mm/rot. Durante a furação a força axial – F_x – foi monitorizada através de um dinamómetro

Kistler 4782 associado a um computador para recolha de dados. Todas as peças foram furadas sem recurso a placa sacrificial.

Tabela 1 – Brocas utilizadas e parâmetros de corte

Geometria de ferramenta		Ângulo de ponta	Vel. corte [m/min]	Avanço [mm/rot]
Helicoidal		118°	80	0,05
Helicoidal com pré-furo		118°	80	0,05
Brad		-----	80	0,05
Dagger		30°	80	0,05

Na fase seguinte, a extensão da zona delaminada foi avaliada através da radiografia das peças. A radiografia é um processo largamente utilizado em ensaios não-destrutivos. Esta técnica baseia-se na diferença de absorção da radiação penetrante no objecto a inspeccionar. No caso dos materiais compósitos, torna-se necessário o uso de um líquido contrastante, no qual as peças são previamente mergulhadas em câmara escura. No caso deste trabalho foi usado o di-iodometano com um tempo de imersão de 90 minutos.

As películas assim obtidas foram posteriormente digitalizadas para permitir as medições das regiões delaminadas.

3.2 Processamento e análise de imagem

De forma a obter as medidas necessárias para as equações (3) e (4), a partir das imagens digitalizadas, nomeadamente os valores da área delaminada, da área do furo, do máximo diâmetro delaminado e do diâmetro do furo, utilizou-se uma plataforma de processamento e análise de imagem previamente desenvolvida para ambientes *Microsoft Windows* (Tavares, 2000; Tavares et al, 2002). Com esta plataforma torna-se possível aplicar às imagens obtidas experimentalmente, técnicas usuais do domínio da Visão Computacional de processamento e análise, técnicas de filtragem, segmentação e de análise de regiões, (Awcock e Thomas, 1995; Jain, 1995; Schalkoff, 1989).

Nas imagens obtidas por radiografia e posteriormente digitalizadas, começou-se por seleccionar em cada uma a respectiva zona de interesse. Esta fase de processamento foi realizada manualmente, com o propósito de diminuir o peso computacional nas etapas posteriores. Seguidamente, aplicou-se em cada imagem resultante da operação de selecção um filtro de suavização. Para segmentar as áreas com interesse em cada imagem suavizada (a área do furo e a área do dano), foi utilizada uma técnica de binarização. Nos casos em que esta última operação originou áreas de ruído e/ou áreas subdivididas, foram aplicados filtros morfológicos de erosão e de dilatação de forma a resultarem regiões com a topologia adequada. Assim obtiveram-se apenas três regiões: fundo da imagem, área do furo e zona delaminada. A última operação consistiu na análise de cada uma das imagens binarizadas pela aplicação de um algoritmo de análise de regiões. Com esse algoritmo foi possível destacar cada uma das áreas presentes e, para cada uma dessas áreas, o cálculo das mediadas necessárias (áreas e comprimentos). Na fig. 5, é apresentado um exemplo de determinação das medidas associadas à zona delaminada, envolvendo todas as fases enumeradas.

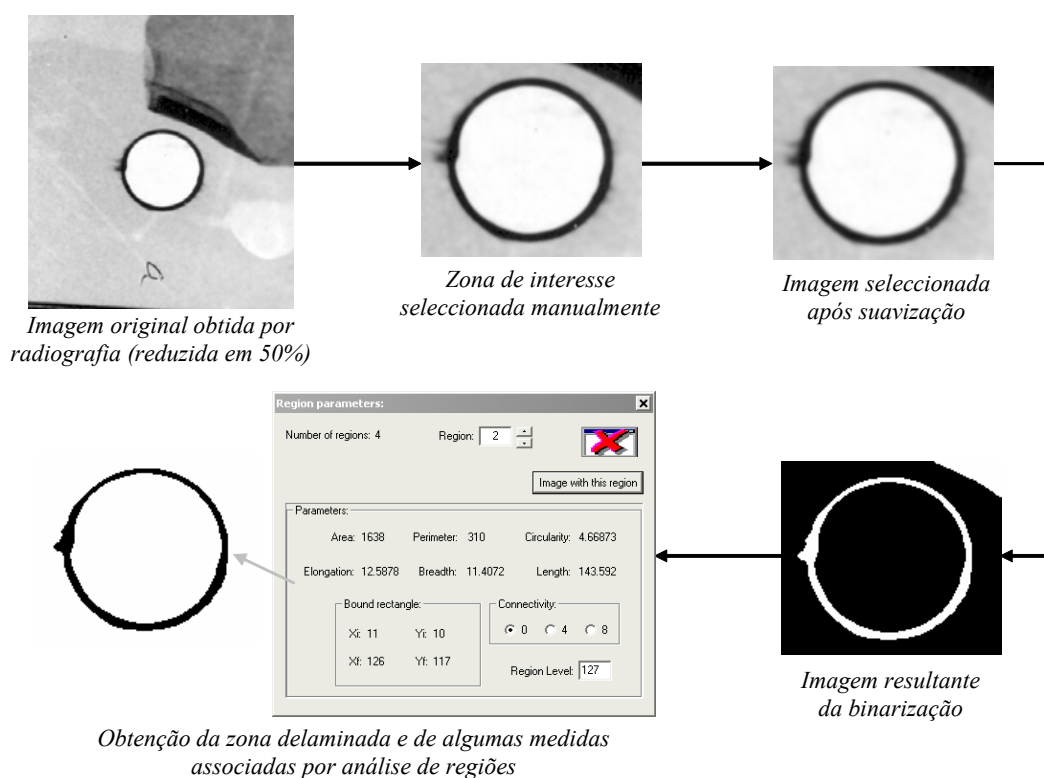


Figura 5 – Exemplo de processamento e análise de uma imagem obtida por radiografia de forma a obter as medidas associadas à zona delaminada

4. RESULTADOS

4.1 Geometria da ferramenta

Os resultados obtidos dividem-se em forças observadas durante a operação de furação, e avaliação do dano com o auxílio das técnicas de inspecção referidas. A partir desses valores são calculados os resultados dos critérios de avaliação da qualidade do furo, tais como o *Factor de Delaminação* (Chen, 1997) ou o *Rácio de Dano* (Mehta et al., 1992).

Relativamente aos valores da força axial durante a furação, o seu desenvolvimento pode ser dividido em sete fases (Won e Dharan, 2002): aproximação, contacto, furação sem delaminação, furação com início da delaminação, broca visível do lado oposto da placa, finalização do furo e, finalmente, extracção da broca. Como critério de comparação foi escolhido o valor máximo desta força (tab. 2) que é atingido rapidamente e decresce à medida que a ponta da broca atinge as camadas inferiores do laminado.

Tabela 2 – Força axial máxima durante a furação com diferentes brocas

Broca	Vel. corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	Força máxima [N]
Brad	80	0,05	83
Dagger	80	0,05	76
Helicoidal	80	0,05	114

Da análise desta tabela, pode-se concluir que a geometria da broca tem uma influência determinante nos valores de força que se obtêm durante a furação. A broca Dagger apresenta o menor valor da força máxima, o que pode ser explicado pela geometria da sua ponta, muito afiada, reduzindo a região de indentação.

Poderá ser apontado como uma desvantagem deste trabalho o facto de não terem sido optimizados os parâmetros de corte para cada broca. Na realidade, os valores de velocidade de corte e de avanço seleccionados são um compromisso entre os valores recomendados para as três geometrias, tendo em vista uma comparação em que os parâmetros não constituíssem uma variável experimental.

Em relação à aplicação dos critérios de qualidade, a fig. 6 mostra os valores obtidos para o *Factor de Delaminação* – F_d – nos furos realizados com as diferentes brocas. Neste caso nota-se que o menor valor se verifica para os furos realizados com a broca helicoidal, mostrando que a geometria da broca é um factor importante na redução da delaminação à volta do furo. De facto, embora a broca helicoidal apresente o maior valor da força máxima, o diâmetro da zona delaminada é menor do que a verificada com as outras brocas.



Figura 6 – Resultados do *Factor de Delaminação* – F_d – para diferentes brocas.

O efeito procurado pelo uso da broca Brad, cuja ponta em forma de foice pré-tensiona as fibras antes de as cortar, não mostrou qualquer vantagem, nas condições experimentais descritas.

4.2 Pré-furação

Na fig. 7 são mostrados os efeitos da pré-furação na redução da força axial máxima durante a furação (fig. 7a) e na delaminação medida após furação (fig. 7b), tendo neste caso sido utilizado o critério de *Rácio de Dano* – D_{RAT} .

Da análise dos resultados pode-se afirmar que o recurso à pré-furação permite uma redução significativa da força axial. Tal redução é proporcional ao diâmetro de pré-furação seleccionado, desde 20% para o menor diâmetro até cerca de 70% para o maior diâmetro seleccionado. Este efeito pode ser explicado pelo facto de, na furação final, a quantidade de material que resiste ao avanço da broca ter sido reduzida na pré-furação. A redução do esforço de corte é um factor conhecido, do qual esta estratégia aproveita as vantagens. A acção de indentação exercida pela ponta da broca de diâmetro final é assim reduzida ou mesmo anulada.

Mais interessante é a análise do efeito da pré-furação na redução da delaminação. Conforme já foi anteriormente referido (2.1) o melhor valor do pré-furo deverá ser de aproximadamente 0,18 do diâmetro final, correspondendo a um diâmetro de 1,1 mm, no caso da experiência aqui descrita. Os resultados da avaliação do dano mostrados na fig. 7b confirmam esse rácio, ao mostrar uma maior redução do valor da delaminação para esse diâmetro. O resultado final obtido pode ser considerado muito bom, pois a área danificada em volta do furo é de menos de 5% da área nominal deste, significativamente inferior a todos os outros resultados aqui apresentados.

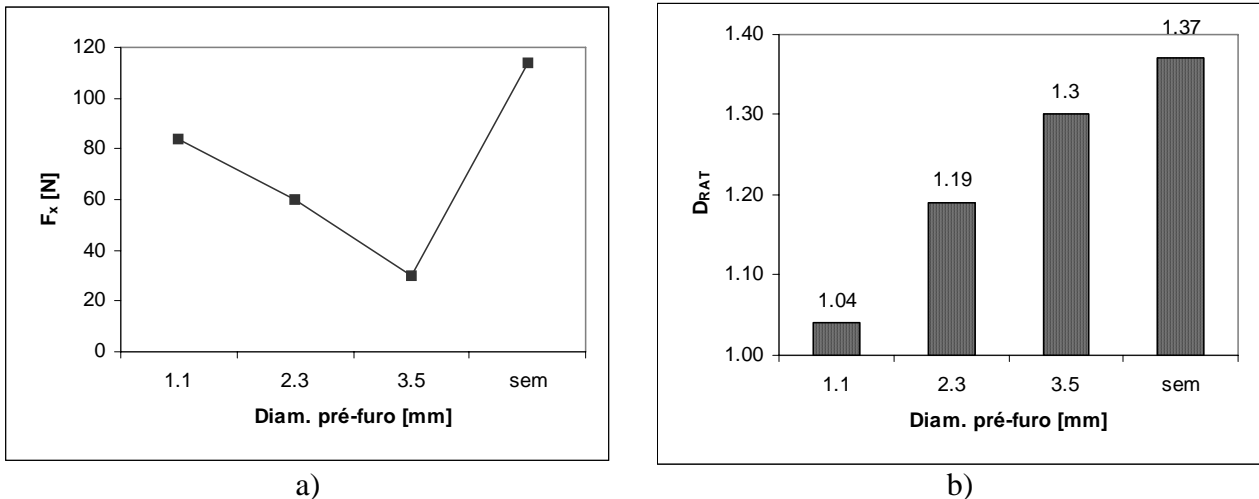


Figura 7 – Efeito da pré-furação: a) na força axial; b) na delaminação

De referir ainda que dos outros dois diâmetros utilizados, o intermédio – 2,3 mm – permite igualmente uma redução da área delaminada, embora menos expressiva. O diâmetro maior não parece constituir qualquer vantagem, tendo em conta que esta estratégia de furação implica um maior tempo de operação ao obrigar à execução do furo em duas fases. Mesmo em centros de maquinagem com mudança automática de ferramenta como o utilizado, tal resulta num aumento do tempo de trabalho.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os resultados relativos a ensaios de furação num conjunto de placas carbono/epóxico, utilizando três geometrias de broca e um outro conjunto recorrendo à pré-furação com três diferentes diâmetros. Foram recolhidos dados relativos à força axial durante a furação e, posteriormente, as peças foram radiografadas. As imagens obtidas foram processadas e analisadas com recurso a técnicas usuais do domínio da Visão Computacional, permitindo medir as áreas e os diâmetros das zonas delaminadas à volta do furo. Deste trabalho podem ser retiradas algumas conclusões.

A geometria da broca influencia, para os mesmos parâmetros de corte, os valores de força axial máxima durante a furação e os valores relativos à região delaminada à volta do furo. Nestas condições, os furos realizados com broca helicoidal apresentaram o menor dano.

O recurso à pré-furação permite uma redução apreciável dos valores de força axial durante a furação e dos valores relativos à extensão do dano. Neste caso, o uso de maiores diâmetros de pré-furação resultam numa maior redução da força axial, no entanto este resultado não se traduz em menor delaminação.

O valor mais aconselhável para o diâmetro de pré-furação, permitindo a maior redução da delaminação à volta do furo, foi o de 1,1 mm, correspondendo a cerca de 18% do diâmetro nominal do furo a executar, estando de acordo com outros resultados já publicados.

O uso da radiografia em peças opacas, como é o caso das empregues neste trabalho, permitiu a avaliação da região afectada à volta do furo.

As técnicas de processamento e análise de imagem utilizadas foram úteis na determinação dos resultados necessários à aplicação dos critérios de dano. O uso destas técnicas da Visão Computacional pode ser facilmente estendido a outros domínios de aplicação.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece ao “Programa de Desenvolvimento Educativo para Portugal (PRODEP) III” o apoio no trabalho apresentado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRATE, S., **Machining of Composite Materials**, Composites Engineering Handbook, Ed. P. K. Mallick, Marcel Dekker, New York, pp. 777-809, 1997.
- AWCOCK, G. W., THOMAS, R., **Applied image processing**, McGRAW-HILL International Editions, 1995.
- CHEN, W. C., **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, 1997.
- DHARAN, C. H. K., WON, M. S., **Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates**, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, v. 39, p. 415-426, 2000.
- HOCHENG, H., DHARAN, C. K. H., **Delamination during drilling in composite laminates** J. of Engineering for Industry, v. 112, p. 236-239, 1995.
- HOCHENG, H., PUW, H. Y. et al, **Experimental aspects of drilling of some fiber-reinforced plastics**, in MACHINING COMPOSITE MATERIALS SYMPOSIUM, ASM MATERIALS WEEK, 1992, Proceedings, p.127-138.
- JAIN, R., KASTURI, R. et al, **Machine Vision**, McGRAW-HILL International Editions, 1995.
- LACHAUD, F., PIQUET, R. et al, **Drilling of composite structures**, Composite Structures, v. 52, p. 511-516, 2001.
- MEHTA, M., REINHART, T. J. et al, **Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates**, in MACHINING COMPOSITE MATERIALS SYMPOSIUM, ASM MATERIALS WEEK, 1992, Proceedings, p.113-126.
- PARK, K. Y., CHOI, J. H. et al **Delamination-free and high efficiency drilling of carbon fiber reinforced plastics**, J. of Composite Materials, v. 29, p. 1988-2002, 1995.
- 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.
- PIQUET, R., FERRET, B. et al, **Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills**, Composites Part A, v. 31, p. 1107-1115, 2000.
- SCHALKOFF, R. J., **Digital image processing and computer vision**, John Willey & Sons, Inc., 1989.
- STONE, R., KRISHNAMURTHY, K., **A Neural Network Thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite-Epoxy Composites**, Int. J. Machine Tools and Manufacture, v. 36, p. 985-1003, 1996.
- TAVARES, J. M. R. S., **Análise de Movimento de Corpos Deformáveis usando Visão Computacional**, FEUP, 2000. Tese de Doutoramento em Engenharia Electrónica e Computacional.
- TAVARES, J. M. R. S., BARBOSA, J. G. et al, **Apresentação de um Banco de Desenvolvimento e Ensaio para Objectos Deformáveis**, RESI - Revista Electrónica de Sistemas de Informação, v. 1, 2002.
- TSAO, C. C., HOCHENG, H. **The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials**, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, v. 43, p. 1087-1092, 2003.
- WON, M. S., DHARAN, C. H. K., **Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates**, Trans. of ASME J. of Manufacturing Science and Engineering, v. 124, p. 242-247, 2002.