

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRÉ-FURAÇÃO NO DANO EM LAMINADOS CARBONO/EPÓXIDO

L. M. Pereira Durão¹, João Manuel R. S. Tavares², A. Torres Marques², A. Gonçalves Magalhães¹, M. Freitas³

¹ Centro de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto
R. Dr. António Bernardino de Almeida, 431 – 4200-072 PORTO
e-mail: lmd@isep.ipp.pt

² Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial,
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, s/n – 4200-465 PORTO

³ Departamento de Engenharia Mecânica
Instituto Superior Técnico
LISBOA

RESUMO

Na furação de placas em materiais compósitos é corrente o uso de técnicas tradicionais de furação adaptadas. O defeito mais grave é a delaminação, que nem sempre é visível à superfície e pode causar o colapso prematuro das estruturas. Para a avaliação dos danos provocados nas peças utilizam-se meios de controlo não-destrutivo. Neste artigo são analisados os resultados obtidos através do recurso à pré-furação em placas carbono/epóxico e de duas técnicas de controlo. Os resultados obtidos permitem estabelecer a influência da pré-furação na delaminação. Neste trabalho, utilizam-se técnicas de Visão Computacional no processamento e análise das imagens obtidas nos ensaios experimentais.

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

1. INTRODUÇÃO

A utilização de compósitos laminados em estruturas tem permitido uma considerável redução de peso e uma melhoria das suas características dinâmicas, nos casos da aeronáutica, construção naval, ferroviária ou automóvel, entre outros. São conhecidos alguns casos de aplicação deste tipo de materiais no desporto com resultados muito interessantes, casos do ténis, ciclismo ou desportos motorizados. A execução de furos em compósitos surge da necessidade de efectuar ligações entre as diversas peças de um conjunto, pelo que se torna numa operação utilizada com bastante frequência neste tipo de materiais.

A furação é uma operação complexa que se caracteriza pela existência de

mecanismos de extrusão e corte, o primeiro efectuado pela ponta da broca, cuja velocidade é nula ou quase nula, e o segundo pelas arestas cortantes em movimento de rotação a uma dada velocidade.

A natureza dos compósitos, não-homogéneos 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 interlaminares, o descolamento fibra/matriz e alterações térmicas. De referir, ainda, o desgaste excessivo das ferramentas, causando a sua substituição mais frequente. 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, pelo que se pode considerar que é um defeito dependente não só da natureza das fibras, mas igualmente do tipo de matriz/resina e respectivas propriedades aglomerantes. A delaminação pode ocorrer na zona de entrada da broca na peça, por efeito de descascamento ou por efeito de punção da ponta da broca sobre as camadas inferiores da peça, abaixo da ponta da broca (Hocheng, 1995). As tensões térmicas que se desenvolvem durante a furação, ao provocarem um certo amaciamento da matriz, também podem facilitar a ocorrência de delaminação. O desgaste das ferramentas é consequência da natureza abrasiva destes materiais e da sua baixa condutividade térmica causando um maior aquecimento da ferramenta. O arrancamento das fibras ocorre ao longo da parede do furo e caracteriza-se pela existência de fibras arrancadas pelas arestas cortantes da broca, durante a execução do furo.

O principal mecanismo responsável pela ocorrência da delaminação é a força axial exercida pelo centro estacionário da broca, cuja acção mecânica é mais próxima de uma extrusão do que de uma furação. A minimização desta força permite reduzir a probabilidade de se verificar este defeito após furação. Diversas técnicas de furação têm vindo a ser desenvolvidas com o objectivo de minimizar a delaminação, tendo como base a escolha adequada dos parâmetros de maquinagem e a geometria das ferramentas. O principal objectivo das diferentes técnicas é sempre a minimização da força axial exercida sobre as camadas inferiores da peça (Piquet, 2000). A análise experimental da furação de placas carbono/epóxico com disposição quasi-isotrópica recomenda que a broca deve ser em carboneto de tungsténio, principalmente por razões económicas, quando comparados com as brocas em diamante.

Won e Dharan (Won, 2002) analisaram a furação de compósitos com fibras aramidadas e de carbono utilizando brocas em carboneto de tungsténio. Durante a furação

executaram a monitorização de forças axiais em furos executados de uma vez só e furos em duas fases, isto é, com pré-furação tendo observado que a redução da força axial obtida com recurso à pré-furação pode chegar aos 60%.

Num outro estudo (Won, 2002), os mesmos autores realizaram uma série de ensaios de furação para determinar quantitativamente o contributo da ponta da broca para a força axial total. Para tal, em cada condição de corte ensaiada, subtraíram o valor da força axial obtido na furação sem pré-furação ao valor obtido na furação após realização do pré-furo. Os valores observados permitiram concluir que o recurso à pré-furação permite reduzir a força axial cerca de duas a cinco vezes.

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.

Para placas sem pré-furação, o modelo de formulação mais simples para determinar tal força axial, foi proposto por Hocheng e Dharan, (Hocheng, 1995):

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

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 o módulo de elasticidade do material, h a espessura não cortada e ν o coeficiente de *Poisson*.

Para placas em que foi executada a pré-furação, e baseado igualmente em modelos de Mecânica da Fractura, Won e Dharan (Won, 2002) e também Tsao e Hocheng (Tsao, 2003) apresentam um modelo cuja formulação é mais complexa:

$$F_c = \frac{4\pi}{1-\nu} \left\{ \frac{G_{Ic} E h^3 [(1-\nu) + 2(1+\nu)\zeta^2]^2}{3(1+\nu)[2(1-\nu)(1+2\nu^2) - (12-4\nu+3\nu^2+3\nu^3)\zeta^2 - 8(1+3\nu)\zeta^2 \ln \zeta]} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

em que $\zeta = 2b/d$, sendo b a largura da

ponta e d o diâmetro da broca. Em (Won, 2002), Won e Dharan indicam um valor para o pré-furo de cerca de 0.18 do diâmetro da broca. Neste modelo, os valores da força crítica são inferiores aos dados por (1), mas a redução de forças axiais pela utilização da pré-furação compensa tal redução.

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. Torna-se necessário recorrer a métodos de ensaio não destrutivo para a avaliação do dano existente numa peça compósita antes da sua entrada em serviço, ou mesmo em situações de avaliação de progressão de danos devido ao funcionamento em condições de solicitação. O recurso a radiografias é um dos métodos utilizados, mas podemos igualmente referir a aplicação de inspeção ultra sónica com varrimento, mais geralmente conhecida por *C-Scan*, e o recurso à utilização de tomografia axial computadorizada – *TAC*. Qualquer um destes três métodos permite a detecção de defeitos não superficiais nas peças. Tal avaliação pode ser realizada quer em peças que sofreram maquinagem quer em peças que se destinem a ser instaladas sem qualquer transformação adicional.

A utilização de critérios de avaliação da qualidade dos furos torna-se importante ao permitir a comparação da extensão da zona delaminada. Um parâmetro que pode ser utilizado com este fim é o *Rácio de Dano*, D_{RAT} , proposto por Mehta et. al (Mehta, 1992):

$$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{D_{AVG}}, \quad (3)$$

em que D_{MAR} é a área delaminada e D_{AVG} é a área nominal do furo.

A extensão da zona delaminada pode ser ainda avaliada através de um outro parâmetro proposto por Chen (Chen, 1997), designado *factor de delaminação*, F_d :

$$F_d = \frac{D_{max}}{D}, \quad (4)$$

em que D_{max} é o máximo diâmetro delaminado e D é o diâmetro do furo. Neste caso em vez de ser medida a área delaminada, procura-se o maior diâmetro em que se verifica a existência de defeitos deste tipo.

Chen estudou a variação deste factor na furação de compósitos reforçados com fibra de carbono unidireccional, tendo concluído que havia uma relação aproximadamente linear entre a força axial durante o corte e o valor do factor de delaminação.

2. ENSAIOS REALIZADOS

2.1. Materiais e ferramentas

Foi utilizada uma placa de resina de epóxido 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. O laminado foi posteriormente curado 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 da placa fabricada foi de 5 mm. Foram realizados ensaios de tracção para obtenção das principais características mecânicas, de acordo com a Norma *ISO NP-EN 527* e analisado o teor de fibras de acordo com a norma *NP 2216 1988*. Nestes ensaios obteve-se uma resistência à rotura de 845 MPa, um módulo de elasticidade de 46.6 GPa e um coeficiente de Poisson igual a 0.56. O teor em fibras foi de 65%.

Os ensaios de furação foram realizados num centro de maquinagem *OKUMA MC-40VA* e utilizadas brocas *Guhring MD732* em carboneto de tungsténio *K20* com diâmetro de 6 mm. Para a realização da pré-furação foram utilizados três diâmetros de broca: 1.1 mm, 2.3 mm e 3.5 mm. O primeiro valor corresponde a 0.183 do diâmetro de broca, de acordo com as recomendações de (Won, 2002). Todos os

pré-furos foram executados com uma velocidade de rotação de 4200 rpm e um avanço de 0.03 mm/rot. Os parâmetros de corte do furo final estão de acordo com as recomendações do fabricante.

A força axial (F_z) e o momento torsor (M_t) durante a furação foram monitorizados através de um dinamómetro *Kistler 4782* associado a um computador para recolha dos dados. Todas as peças foram furadas sem utilização de suporte inferior, o que constitui uma situação desfavorável para a ocorrência de delaminação, ao não proporcionar apoio nas camadas inferiores da peça ao serem furadas.

Tabela 1 – Condições de furação

Ident.	D pré-furo	Vel. Corte [m/min]	Avanço [mm/rot]
PF1	1.1	80	0.05
PF2	2.3	80	0.05
PF3	3.5	80	0.05
PF4	Sem	80	0.05

2.2. Radiografia

A análise por radiografia é um processo largamente utilizado em ensaios não destrutivos de materiais. O seu princípio básico é a diferença de absorção de uma radiação penetrante pelo objecto que está a ser inspeccionado. Essa diferença de absorção pode ser resultante de variações na composição da peça, da sua densidade ou até da sua espessura. A radiação não absorvida é captada numa película fotossensível, o que permite a sua posterior revelação.

A extensão da zona delaminada foi avaliada, em primeiro lugar, através da radiografia das peças. Para tal, as peças foram mergulhadas em dióxido de carbono durante cerca de 90 min e, posteriormente, radiografadas com um aparelho *Toshiba DG-073B*, com uma distância focal de 70 mm e tempo de exposição de 0.25 segundos. Estes meios estão disponíveis no laboratório do *DEMEGI* da *FEUP*. As películas assim obtidas serviram para a medição da zona delaminada, após terem sido digitalizadas.

2.3. Inspeção ultra sónica – C-Scan

Na inspeção ultra sónica uma onda sonora de determinada frequência acima do limite do audível e geralmente entre 1 e 50 MHz é feita passar através do material. A onda sonora propaga-se dentro do material a uma dada velocidade, típica desse material, e sofre modificações devido a diversas barreiras que vai encontrando, sejam do material, sejam a presença de defeitos. As delaminações, cuja orientação é perpendicular ao eixo do furo e à direcção de propagação da onda, são bem detectadas por este método, já que reflectem adequadamente os ultras sons.

Foi efectuada a avaliação do dano nas peças por intermédio de uma inspeção ultra sónica com varrimento, mais geralmente conhecida por *C-Scan*. Neste ensaio, uma sonda emite impulsos a uma determinada frequência em direcção a uma peça e um receptor recebe os sinais reflectidos por essa mesma peça, transformando-os em sinais eléctricos que são amplificados e permitem a obtenção de uma imagem em que uma escala de cores corresponde a diferentes intervalos de tempo emissão-recepção ou *time-of-flight – TOF*. Esse intervalo de tempo pode ser relacionado com a profundidade a que a onda ultra sónica encontra o *obstáculo* ou defeito que provoca a sua reflexão. Estes ensaios foram realizados com um aparelho *Ultrapac II* e uma sonda de 5 MHz, existente nos laboratórios do *DEM* do *IST*.

A imagem obtida neste ensaio é fornecida num formato electrónico, sendo a diferenciação de cores a indicação da existência de um defeito na peça. Com este método é igualmente possível estimar a profundidade a que se encontra o defeito na peça, dado que as diferentes cores mostradas correspondem a uma escala graduada, em função da sua espessura, correspondendo a zona vermelha ao eco do fundo da peça e cores entre o amarelo e o azul a profundidades cada vez menores em que se encontra o defeito.

2.4. Processamento e análise de imagem

De forma a obter as medidas necessárias para as equações (3) e (4), a partir das imagens de resultados obtidas por radiografia e por *C-Scan*, 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, 2002). Com a referida plataforma foi possível aplicar às imagens obtidas nos ensaios experimentais, técnicas comuns do domínio da Visão Computacional de processamento e análise; nomeadamente técnicas de filtragem, de segmentação e de análise de regiões, (Awcock, 1995; Jain, 1995; Schalkoff, 1989).

Relativamente às imagens obtidas por radiografia, começou-se por seleccionar em cada imagem a respectiva zona de interesse. Esta fase de processamento foi realizada manualmente, e unicamente 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, ou seja identificar, 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. Assim obtiveram-se imagens constituídas unicamente por três regiões: fundo da imagem, área do furo e zona delaminada. A última operação realizada consistiu na análise de cada uma das imagens binarizadas pela aplicação de um algoritmo de análise de regiões. Com o algoritmo utilizado foi possível destacar cada uma das áreas presentes e, para cada uma dessas áreas, verificar uma série de medidas. Na Figura 1, é apresentado um exemplo de determinação das medidas associadas à zona delaminada presente numa imagem de ensaio obtida por radiografia, envolvendo todas as fases enumeradas.

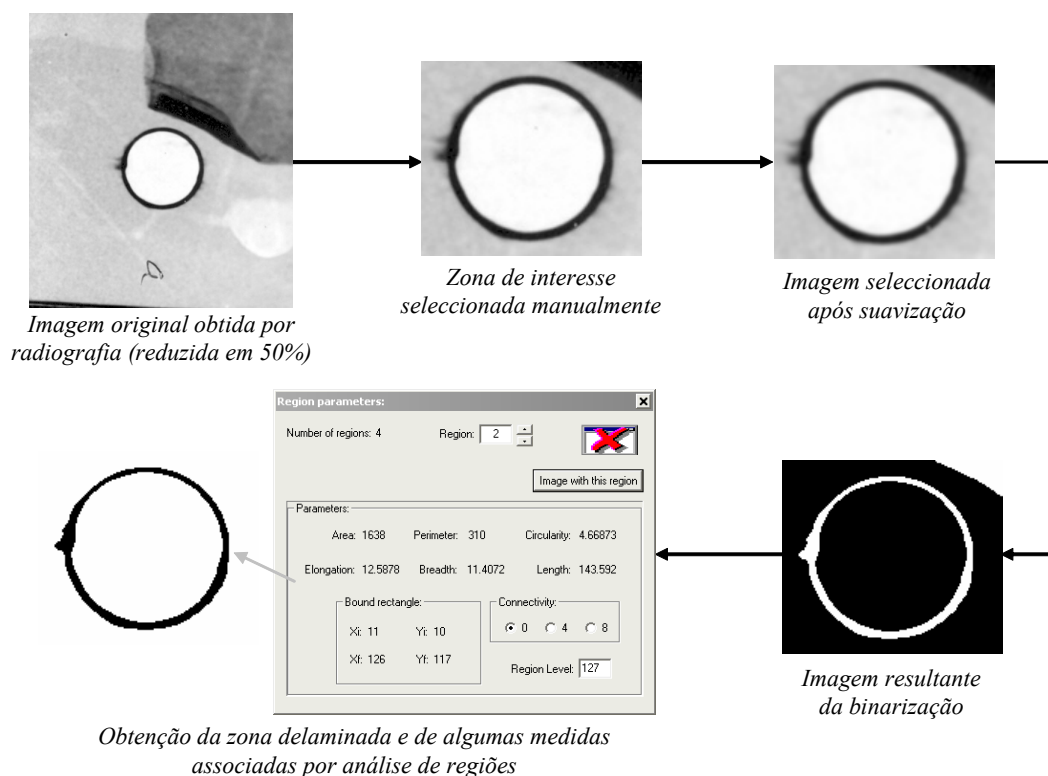


Figura 1 – Exemplo de processamento e análise de uma imagem obtida por radiografia de forma a obter as medidas associadas à zona delaminada

Para as imagens obtidas por *C-Scan*, o processamento utilizado foi semelhante.

Assim, com o mesmo propósito de diminuição do esforço computacional,

começou-se por seleccionar em cada imagem a respectiva zona de interesse. Cada imagem seleccionada foi posteriormente convertida em níveis de cinzento. Após esta conversão, em cada imagem de cinzentos foram determinadas, por aplicação de uma técnica de binarização, as áreas presentes com interesse. De forma a obter em cada imagem binarizada uma área homogénea associada ao processo de furação, foram do

mesmo modo aplicados filtros morfológicos. Finalmente, com o propósito de obter as medidas desejadas associadas à zona em estudo, foi utilizado o já referido algoritmo de análise de regiões. Na Figura 2, é apresentado um exemplo de determinação das medidas associadas à área em estudo numa imagem de ensaio obtida por *C-Scan*, envolvendo todas as fases citadas.

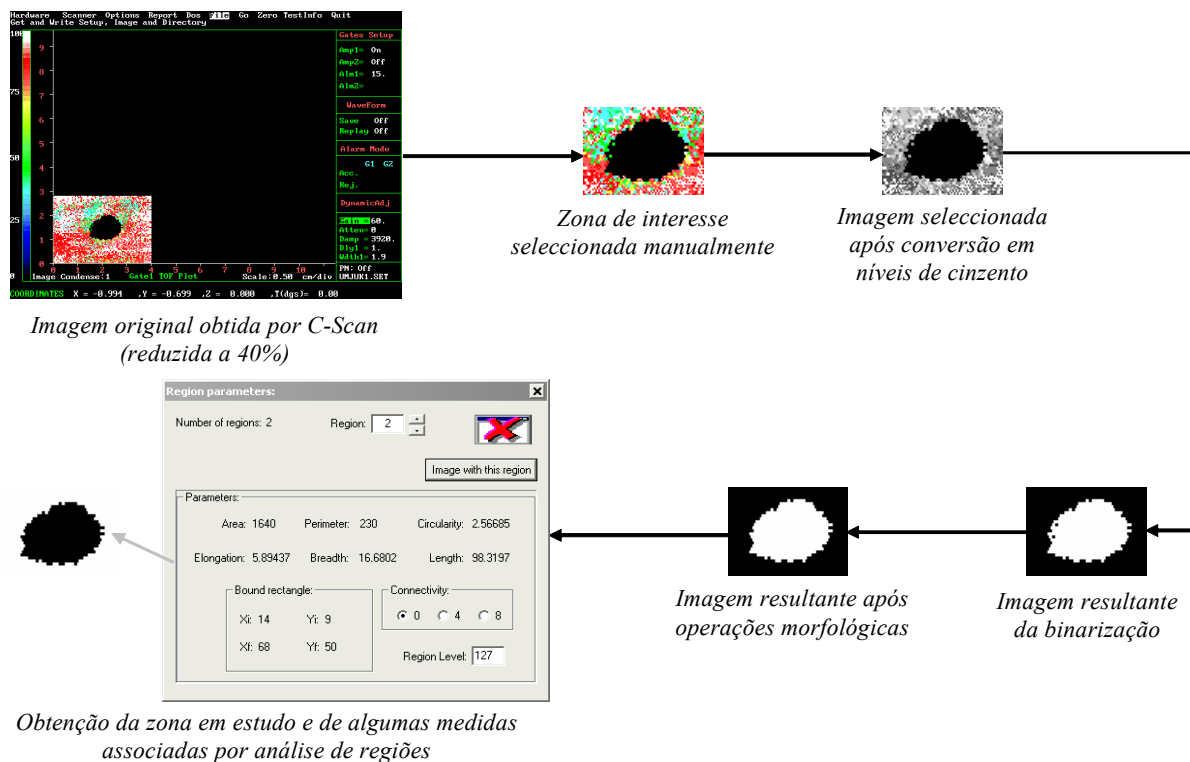


Figura 2 – Exemplo de processamento e análise de uma imagem obtida por *C-Scan* de forma a obter as medidas associadas à zona de furação

3. RESULTADOS

3.1 Força axial e momento torsor

Dharan e Won (Won, 2002) dividiram o ciclo de furação em sete etapas: aproximação, contacto, furação normal (sem delaminação), início da delaminação, broca visível (do lado oposto), finalização e retirada da broca. A força axial máxima é atingida rapidamente, decrescendo à medida que a ponta da broca deixa de estar em contacto com a peça. O momento torsor mantém-se mais estável ao longo do processo de furação, já que corresponde ao esforço necessário para vencer as forças de atrito que se geram entre a broca e as paredes do furo. Este binário continua a registar-se mesmo depois da fase de finalização, pois existe atrito broca/peça até à retirada da broca. Na tabela 2 são indicados os valores médios obtidos para a força axial – F_x - e momento torsor – M_t - máximos, na realização de 4 furos em condições idênticas para cada ensaio.

Tabela 2 – Força axial e momento torsor máximos durante a furação

Ident.	PRÉ-FURO		FURO FINAL	
	F_x [N]	M_t [Nm]	F_x [N]	M_t [Nm]
PF1	33.5	0.172	83.7	0.36
PF2	63.6	0.19	60.3	0.38
PF3	106.2	0.25	30.2	0.39
PF4	----	----	113.8	0.37

De referir que na furação executada em duas fases, isto é, pré-furo e furo final, continua a ser possível observar as sete etapas atrás descritas.

Analisando os resultados, verifica-se que a existência de pré-furação permite uma redução considerável da força axial no ciclo final de furação. Esta redução torna-se mais elevada quanto maior é o diâmetro do pré-furo seleccionado, conforme se pode ver na figura 3, em que é representada a redução percentual em relação ao valor da força axial observada em furos sem pré-furação. Observa-se que esta redução é proporcional ao diâmetro escolhido para o pré-furo. Este efeito de redução de força axial deve-se à não existência do efeito de extrusão

exercido pela ponta quase estacionária da broca de 6 mm, conforme já havia sido observado em (Won, 2002).

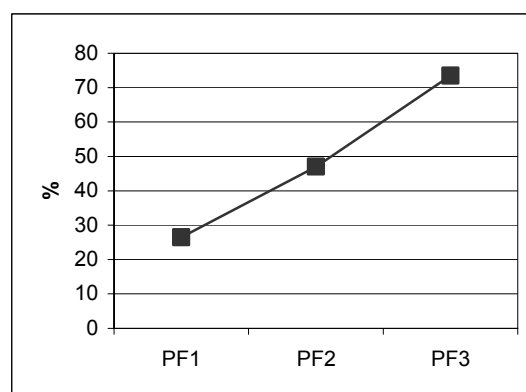


Figura 3 – Redução da força axial devido à pré-furação

Os valores de momento torsor são sempre reduzidos e não se verificam variações significativas, quer entre os vários ensaios quer pela realização da pré-furação, pelo que se pode concluir que, para este parâmetro, a pré-furação não tem qualquer influência. A comparação dos diversos valores de momento torsor mostra que o seu valor é dependente do diâmetro da broca, ou seja, quanto mais afastado do centro está o ponto de aplicação da força, maior será o binário.

Tal como esperado, a redução da força axial durante a furação foi substancial e deve ter permitido uma redução da área delaminada à volta do furo, ou mesmo evitar o seu aparecimento.

3.2. Análises radiográfica e ultra-sónica

Tal como foi descrito na secção anterior, as imagens obtidas em cada ensaio, quer as resultantes por radiografia quer as adquiridas por ultra-sons, foram sujeitas a técnicas de processamento e análise de imagem e de forma a obter-se os valores associados à área delaminada e ao máximo diâmetro delaminado. Estes valores permitiram o cálculo do *rácio de dano* e do *factor de delaminação* de acordo com (3) e (4). Os resultados dos dois factores encontram-se na tabela 3.

Relativamente às imagens obtidas por *C-Scan*, e devido ao diâmetro da sonda não permitir a leitura do furo como redondo, só se considerou o cálculo da área danificada à volta deste, e realizou-se o cálculo do *rácio de dano* em função do diâmetro nominal do furo. Assim, na tabela 3 podem-se verificar os resultados obtidos, mas apenas para este rácio. Na figura 4 podem ser observados os gráficos referentes aos diversos resultados.

Tabela 3 – Resultados de *rácio de dano* e *factor de delaminação*

Ident.	D pré-furo	Rácio de dano		Factor de delaminação Radiografia
		Rádio-grafia	C-Scan	
PF1	1,1	1.21	1.04	1.10
PF2	2,3	1.15	1.19	1.07
PF3	3,5	1.18	1.30	1.09
PF4	Sem	1.27	1.37	1.18
Pré-furo		3.14	----	2.18

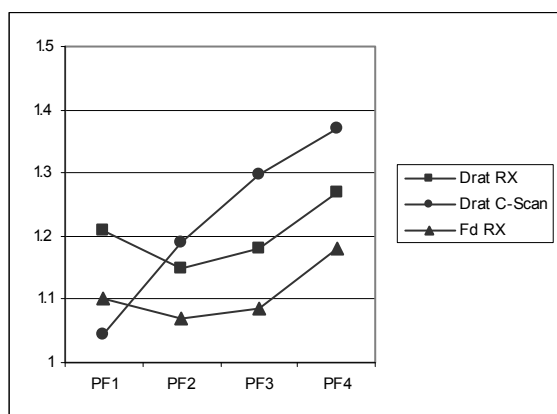


Figura 4 – Resultados do rácio de dano e do factor de delaminação

Da análise dos resultados pode-se concluir que o recurso à pré-furação permite uma diminuição da delaminação observada à volta do furo da ordem dos 10% para os diâmetros de 1.1 e 2.3 mm, ou seja, 20 a 40 % do diâmetro do furo final. Para o outro diâmetro de pré-furação utilizado, essa redução não se tornou tão evidente.

Da observação dos valores e respectiva comparação, é nítido que o método de análise por ultrassons – *C-Scan* – é geralmente mais “pessimista” do que a análise radiográfica, para além de estabelecer uma relação de resultados diferente, com clara vantagem para a pré-furação com 1.1 mm de diâmetro.

Esta diferença nos resultados, já observada em (Durão, 2004), pode ser explicada por diferenças que resultam das características do método de análise. Enquanto que na radiografia se obtém uma imagem plana que fornece a extensão da zona delaminada sem dar qualquer indicação sobre a sua localização em profundidade, no *C-scan*, devido ao eco de entrada da onda ultra sónica na peça, existe uma zona de material que não é observada por existir oclusão. Assim, a informação obtida quanto à profundidade e à existência de um defeito não poderá considerar uma determinada quantidade de camadas iniciais da peça.

A análise radiográfica parece indicar um maior equilíbrio entre os resultados de delaminação obtidos com os diferentes diâmetros de pré-furação utilizados. Por outro lado, não parece haver divergências entre os resultados obtidos pela aplicação dos diferentes critérios (3) e (4) aqui apresentados e considerados.

De acordo com (2), a força crítica para o início da delaminação será mais elevada para um pré-furo de 2.3 mm de diâmetro do que para 1.1 mm. Este aspecto poderá explicar o facto de os valores de delaminação para furos realizados com estas duas estratégias de furação serem semelhantes. Outro cenário provável é a existência de um mínimo para a área delaminada num diâmetro de pré-furo que se encontre entre os dois valores citados. Em (Tsao, 2003) mostra-se que para valores do coeficiente de Poisson mais elevados, o diâmetro óptimo do pré-furo também aumenta, sendo o valor de 0.18 do diâmetro final obtido para um material com este coeficiente igual a 0.3, ou seja, inferior ao do material por nós ensaiado.

De referir que, numa radiografia executada num ensaio com um furo prévio de 1.1 mm de diâmetro, o valor encontrado para o rácio de dano foi de 3.14. Num pré-furo de 3.5 mm seria provável que o dano provocado pelo pré-furo abrangesse uma área próxima da que iria ser retirada na execução do furo final, enfraquecendo as ligações interlaminares da peça de tal forma

que este dano provoque sempre uma delaminação.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados ensaios de furação num conjunto de placas em carbono/epóxico com recurso a três diferentes diâmetros de pré-furação e um conjunto de furos sem pré-furação, a fim de se estabelecer as necessárias comparações. Em todos os casos foram utilizadas brocas em carboneto de tungsténio e os parâmetros de corte mantidos constantes. Foram recolhidos dados de força axial e de momento torsor durante a furação e, posteriormente, as peças foram radiografadas e analisadas por ultra-sons para avaliação da extensão da área danificada associada. As imagens obtidas por estes dois processos foram processadas e analisadas com recurso a técnicas usuais do domínio da Visão Computacional, permitindo a medição das áreas e dos diâmetros danificados pela operação de furação. Deste trabalho podem ser retiradas algumas conclusões.

A força axial necessária para efectuar o avanço da broca, cujo centro é quase estacionário e responsável por um mecanismo que se aproxima mais de uma extrusão, pode ser reduzida com o recurso à pré-furação. Verificou-se que essa redução era de 20% para um pré-furo de 1.1 mm e atingia cerca de 70% se fosse utilizada uma broca de 3.5 mm para a pré-furação.

Os valores de momento torsor variam muito pouco e apenas em função do diâmetro da broca utilizada em cada caso.

A delaminação provocada pela furação diminuiu sempre que foi utilizado o pré-furo, independentemente do diâmetro deste. Os melhores valores para o diâmetro do pré-furo parecem encontrar-se entre os 20 e os 40% do diâmetro final do furo, o que neste trabalho representa as brocas de 1.1 e 2.3 mm. A broca de 3.5 mm, ao não reduzir o dano de forma tão significativa, parece ser desaconselhada.

A variação de parâmetros de corte, nomeadamente o avanço, que é normalmente indicado como o factor mais influente na força axial, e o seu efeito na diminuição da área danificada deverá também ser avaliada em conjunto com a pré-furação.

A partir dos resultados obtidos pensa-se que é possível propor uma geometria de broca que minimize o efeito de delaminação em furos realizados sem placa suporte.

A realização de ensaios mecânicos que solicitem a zona do furo, poderá dar uma melhor noção da validade dos métodos e critérios aqui considerados, permitindo a escolha dos mais adequados.

Prevê-se a utilização das técnicas de avaliação de defeitos aqui demonstradas a outro tipo de materiais compósitos, nomeadamente os reforçados com fibras de vidro e os híbridos com fibra de vidro e de carbono em matriz epóxida.

REFERÊNCIAS

- E. Persson, I. Eriksson, L. Zackrisson, Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28, 2, 141-151, 1997.
- E. Persson, I. Eriksson, P. Hammersberg, Propagation of hole machining defects in pin-loaded composite laminates, *Journal of Composite Materials*, 31, 4, 383-408, 1997.
- H. Hocheng, C.K.H Dharan, Delamination during drilling in composite laminates, *Journal of Engineering for Industry*, 112, 236-239, August 1995.
- R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud, P. Swider, Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 31, 10, 1107-1115, 2000.
- M.S. Won, C.K.H. Dharan, Drilling of aramid and carbon fiber polymer composites, *Transactions of the ASME*, 124, 778-783, November 2002.

- M.S. Won, C.K.H. Dharan, Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates, Transactions of ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124, 242-247, May 2002.
- C.C. Tsao, H. Hocheng, 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.
- M. Mehta, T.J. Reinhart, A.H. Soni, 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.
- W.C. Chen, Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 37, 8, 1097-1108, 1997.
- J.M.R.S. Tavares, Tese de Doutoramento: Análise de Movimento de Corpos Deformáveis usando Visão Computacional, FEUP, 2000.
- J.M.R.S. Tavares, J.G. Barbosa, A.J. Padilha, Apresentação de um Banco de Desenvolvimento e Ensaio para Objectos Deformáveis, RESI - Revista Electrónica de Sistemas de Informação, vol. 1, 2002.
- G.W. Awcock, R. Thomas, Applied image processing, McGRAW-HILL International Editions, 1995.
- R. Jain, R. Kasturi, B.G. Schunck, Machine Vision, McGRAW-HILL International Editions, 1995.
- R.J. Schalkoff, Digital image processing and computer vision, John Willey & Sons Inc., 1989.
- L. M. P. Durão, J.M.R.S. Tavares, A. G. Magalhães, A. T. Marques, M. Freitas, Caracterização de danos de maquinagem em placas compósitas, Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia, Maio 2004, Lisboa