

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE MAQUINAGEM NO DANO DE PLACAS COMPÓSITAS

L. M. P. Durão¹, A. G. Magalhães¹, A. T. Marques², J. M. R. S. Tavares²

¹Centro de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica, DEM, ISEP

²Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, FEUP

RESUMO

Os materiais compósitos têm-se tornado cada vez mais importantes em virtude das suas características específicas, tais como o baixo peso e uma boa relação peso/resistência. As operações de furação são habituais neste tipo de peças, devido à necessidade de posterior montagem em conjuntos. Devido à não-homogeneidade dos compósitos, a furação pode causar alguns danos, de que podem resultar perda de propriedades mecânicas da peça. Uma escolha adequada da ferramenta e dos parâmetros pode diminuir estas consequências. Neste artigo são comparados os resultados obtidos com três diferentes velocidades de corte, três avanços e três geometrias de ferramenta. As conclusões apontam para a importância duma adequada selecção dos parâmetros de maquinagem na redução do dano.

1- INTRODUÇÃO

O uso crescente de materiais compósitos em estruturas tem permitido uma significativa redução de peso e uma melhoria das suas características dinâmicas relacionadas com uma relação resistência-peso favorável. É possível encontrar exemplos da sua utilização nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, automóvel, construção naval ou ferroviária. Outras aplicações para esta família de materiais incluem a utilização desportiva tal como em carros de competição, ciclismo, ténis ou mesmo o golfe. As operações de furação são necessárias em placas compósitas para permitir a posterior montagem a outras peças da mesma estrutura através de parafusos ou rebites. A furação é assim a operação de maquinagem mais frequente e pode ser causadora de diversos danos nas placas que podem ter como principal

consequência a perda de propriedades mecânicas das peças na zona de ligação. Tais danos podem inclusivamente levar à rejeição da peça após maquinagem. De facto, tem sido mencionado que, na indústria aeronáutica, cerca de 60% das peças rejeitadas são devidas a problemas causados pela maquinagem [Stone & Krishnamurthy (1996)]. A furação pode causar diferentes tipos de dano, como a delaminação, descolamento fibra/matriz fractura interlaminar ou danos térmicos.

A delaminação é uma consequência da força compressiva exercida pela broca sobre as camadas não cortadas do laminado. Estas camadas, localizadas por baixo da broca, tendem a ser empurradas para fora da placa, forçando a quebra das ligações entre as diversas camadas. À medida que a ponta da broca se aproxima do final da placa, a espessura não cortada diminui e a

resistência à deformação é menor. Num certo momento, a força exercida pela broca excede a resistência interlaminar da placa, antes que a broca penetre completamente a placa. Nesse instante, ocorre a delaminação (figura 1).

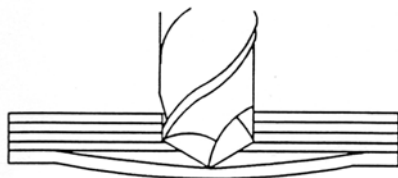


Fig 1 – Mecanismo de delaminação

Qualquer um destes danos é indesejável, podendo levar à necessidade de maquinagem adicional na peça ou mesmo a sua rejeição, tal como já foi referido. Este tipo de dano é de difícil detecção numa inspeção visual e pode reduzir a capacidade de suporte de carga da placa, nomeadamente sob esforços de compressão [Abrate (1997)].

Têm sido apresentadas várias abordagens para a redução da delaminação, vista como o mais importante tipo de defeito causado pela furação. Numa análise experimental [Piquet et al (2000)] sobre o uso de brocas de tipo especial em laminados carbono/epóxico, os autores concluíram que a utilização de brocas com pequeno ângulo de ataque, grande número de arestas cortantes e um ângulo de ponta de 118° pode reduzir o dano. A redução da largura do lábio da broca pode igualmente diminuir a ocorrência de delaminação. Outro estudo [Persson et al (1997)] debruçou-se sobre o efeito da delaminação na resistência à fadiga das placas laminadas. Neste trabalho, os autores propuseram um novo método de geração de furos, em que se combinam os movimentos axiais e radiais da ferramenta. Assim elimina-se o centro estacionário da broca, o que reduz a força axial de corte. Outro trabalho experimental [Dharan & Won (2000)] permitiu a proposta de um método de maquinagem ‘inteligente’ em que o avanço seria reduzido nos pontos críticos da furação, para assim reduzir o risco de dano na placa. A identificação de um domínio

otimizado de parâmetros de maquinagem foi proposto num outro trabalho [Hocheng et al (1992)]. Quer a velocidade de corte quer o avanço devem ser moderados. Um aumento no avanço pode causar delaminação e rebarbas enquanto um aumento na velocidade de corte provoca um aumento na força axial de corte e no binário para além de reduzir o tempo de vida da ferramenta. Outro aspecto estudado é a influência da largura da ponta da broca na força axial de corte [Won & Dharan (2002a)]. Independentemente do diâmetro do furo, ficou determinado que a ponta da broca contribuía com 60 a 85% do total da força axial. Esta percentagem tem valores mais elevados se o avanço é mais alto. Noutro estudo levado a cabo pelos mesmos autores [Won & Dharan (2002b)], mostra-se que a influência do avanço na força exercida pela ponta da broca é o factor mais importante, mesmo se comparado com um aumento do diâmetro do furo. O início da delaminação é essencialmente influenciado pela força axial exercida pela ponta da broca. A importância da largura da ponta da broca foi analisada [Tsao & Hocheng (2003)]. O recurso à pré-furação leva a uma redução de 20 a 25% na força axial. De acordo com as conclusões deste estudo, a razão entre o diâmetro do pré-furo e o diâmetro do furo final deve-se situar entre 0.09 e 0.2. Um algoritmo de optimização indicou um valor de 0.18 para esta relação.

Outra aproximação consistiu no desenvolvimento de uma função multi-objectivo para a obtenção de furos sem dano [Enemuoh et al (2001)]. Nos resultados deste trabalho aponta-se o uso de avanços moderados, na ordem de 0.02 a 0.05 mm/rot e velocidades de corte na gama entre 40 e 60 m/min.

Uma revisão dos principais passos na procura de furos sem dano pode ser encontrada em Hocheng e Tsao [Hocheng & Tsao (2005)].

Neste artigo três geometrias de broca, todas de 6mm de diâmetro são comparadas: helicoidal, tipo Brad e bi-diametral. São avaliados os parâmetros de corte – avanços e velocidades – distinguindo-se entre baixo, médio e alto. Durante a furação as forças de

corde são monitorizadas e após a furação o dano é avaliado por intermédio de radiografias. Baseados nos resultados obtidos são seleccionadas uma velocidade de corte e um avanço. São ainda estabelecidos os efeitos das diferentes geometrias de ferramenta na ocorrência da delaminação, bem como uma comparação da rugosidade superficial das paredes dos furos maquinados.

2–DANO EM PLACAS COMPÓSITAS

2.1 Modelos de dano

A análise da delaminação na furação de placas compósitas tem vindo a ser desenvolvida por diversos autores, resultando a apresentação de diversos modelos analíticos. Desses modelos, o mais citado é o de Hocheng-Dharan [Hocheng & Dharan (1990)]. Na sua formulação, a delaminação é modelada através do uso da Mecânica da Fractura Linear-Elástica, considerando a estrutura laminar das placas. O modelo assume diversas simplificações no cálculo dos valores de E e de G_{Ic} . A força crítica para o início da delaminação resulta

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

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, E o módulo de elasticidade e ν_{12} o coeficiente de *Poisson* de uma placa unidireccional do material e h a espessura não cortada.

Outros modelos com o mesmo objectivo são apresentados noutros trabalhos [Lachaud et al (2001)], [Zhang et al (2001)] e [Tsao & Hocheng (2003)].

Em todos os modelos é referida a importância da redução da força axial durante a furação de placas para reduzir a possibilidade de delaminação. Sempre que a força axial excede um valor crítico – F_{crit} – verifica-se a ocorrência de delaminação.

2.2 Critérios de avaliação do dano

Depois da operação de furação, é importante estabelecer critérios que

permitam comparar a extensão do dano utilizando diferentes estratégias de maquinagem. A avaliação da extensão do dano pode ser efectuada através de radiografias, análise ultrassónica com varrimento (C-Scan) ou tomografia computadorizada (TAC).

Um dos critérios de avaliação é o *Factor de delaminação* – F_d – [Chen (1997)], definido como o quociente entre o máximo diâmetro de delaminação e o diâmetro nominal do furo

$$F_d = D_{max} / D \quad (2)$$

Outro critério é o Rácio de Dano – D_{RAT} [Mehta et al (1992)], baseado no cálculo da razão entre a área delaminada à volta do furo – D_{MAR} – e a área nominal deste – A_{AVG} :

$$D_{RAT} = D_{MAR} / A_{AVG} \quad (3)$$

Qualquer um destes critérios baseia-se na existência de imagens digitalizadas da região danificada à volta do furo. Estas imagens podem ser obtidas por fotografia, radiografia, C-Scan ou tomografia axial.

3–TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 - Procedimento dos ensaios de furação

Para a execução do trabalho experimental, foi fabricada uma placa a partir de carbono/epóxico pré-impregnado, com a seguinte sequência de empilhamento [(0/-45/90/+45)]_{4s}, resultando uma placa com propriedades quasi-isotrópicas. O laminado foi sujeito a um ciclo de cura numa prensa de pratos quentes a uma pressão de 300 kPa e uma temperatura de 140 °C durante uma hora, seguido de arrefecimento. A espessura final das placas é de 4mm. Os diferentes parâmetros de corte utilizados podem ser vistos na tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros experimentais.

	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de rotação [rpm]	Avanço [mm/rev]
Baixa	53	2800	0.025
Média	80	4200	0.050
Alta	102	5600	0.075

Durante a furação, as forças axiais foram monitorizadas por um dinamómetro Kistler 4782, ligado a um amplificador de sinal e um PC para aquisição de dados. Todos os resultados neste trabalho representam a média de cinco furações em condições experimentais idênticas. Devido à variação de sinal de força ao longo de uma rotação da broca, consequência do próprio processo de furação, o valor da força axial considerado representa a média dos valores obtidos ao longo de cada rotação.

As três brocas experimentadas eram uma broca helicoidal, uma broca tipo ‘Brad’ e uma broca experimental, bi-diametral. A broca helicoidal tem uma geometria padrão, comum em qualquer fabricante deste tipo de ferramentas, com um ângulo de ponta de 118°. Com o objectivo de diminuir o dano provocado na operação de furação, associou-se a esta broca um pré-furo de 1.1mm de diâmetro, correspondente a cerca de 18% do diâmetro final do furo. Esta opção baseou-se em trabalhos já anteriormente referidos [Won & Dharan, 2002; Tsao & Hocheng, 2003; Tsao & Hocheng, 2005]. A broca tipo Brad é uma broca com uma geometria de ponta específica, em forma de foice, inicialmente desenvolvida para o corte de madeira, e que provoca o tensionamento das fibras antes do seu corte, proporcionando um corte “limpo” destas. Em consequência a superfície maquinada fica com menor rugosidade. Nesta broca não foi associado o pré-furo. Finalmente, foi experimentada uma broca de desenho bi-diametral. A ideia para o desenvolvimento deste tipo de broca surgiu na sequência de uma conferência do Prof. H. Dharan no INEGI-Porto, em 2000 [Dharan, 2000]. Esta broca tem dois diâmetros de furação, respectivamente 1.25 e 6 mm, dividindo a operação de furação em duas fases. Tal geometria proporciona uma redução da força axial máxima atingida durante a furação. Outra vantagem desta broca é a redução do efeito de indentação causado pela ponta da broca numa furação efectuada num só passo. De lembrar que, de acordo com os modelos analíticos referidos em 2.1, a diminuição da força axial durante a furação diminui o

risco de ocorrência de delaminação. O protótipo desta ferramenta foi executado em colaboração com uma empresa especializada.

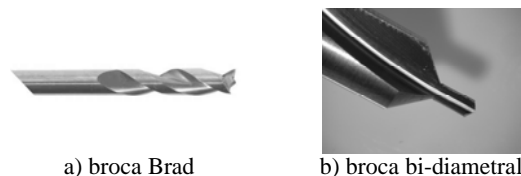


Fig 2 – Brocas Brad e bi-diametral

3.2 – Uso de técnicas de inspeção

As placas furadas foram analisadas através de radiografia após imersão em líquido contrastante. Como resultado desta inspeção obtêm-se imagens em tons de cinzento, em que a zona mais escura corresponde à área de dano e a zona mais clara à área sem dano (figura 3). A região de dano localiza-se numa zona aproximadamente circular à volta do furo.

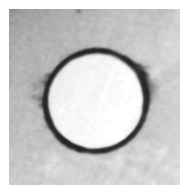


Fig 3 – Radiografia de uma placa

De forma a obter as medidas necessárias para a avaliação do dano nas peças a partir das imagens de resultados obtidas por radiografia (área delaminada, área do furo, máximo diâmetro delaminado e 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 a referida plataforma foi possível aplicar às imagens obtidas nos ensaios experimentais, técnicas usuais de processamento e análise de imagem: filtragem, segmentação e análise de regiões, [Awcock & Thomas (1995); Jain et al (1995); Schalkoff (1989)].

Assim, o método de processamento e análise considerado é constituído por uma sequência de etapas para obter o cálculo das

medidas necessárias (áreas e comprimentos). Mais detalhes sobre o método de processamento e análise aplicado podem ser encontrados em Durão et al (2005).

4–RESULTADOS

4.1 Influência dos parâmetros de corte

Ao longo do trabalho experimental, foram considerados dois tipos de dados para avaliação dos parâmetros de corte e geometria de broca: força axial máxima durante a furação, através da monitorização efectuada com o auxílio de um dinamómetro e extensão da delaminação medida através das técnicas de inspecção descritas em 3.2, utilizando a radiografia e as técnicas de Visão Computacional. A força axial máxima durante a furação pode ser considerada um bom indicador do risco de delaminação. Dos modelos analíticos descritos em 2.1, resulta que quanto menor for a força axial exercida durante a furação, menor será a probabilidade de ocorrência deste tipo de defeito nas camadas inferiores do laminado. Em qualquer dos casos, e independentemente da ferramenta utilizada, a curva força-deslocamento tem uma evolução típica. A força máxima é atingida na fase inicial da furação, correspondendo à situação de corte pleno da broca. Nessa altura, a força axial tem tendência a estabilizar. À medida que o número de camadas não cortadas diminui, a força axial decresce. Os dados experimentais confirmam que as combinações de parâmetros que apresentam maior valor de força máxima apresentam igualmente valores de força axial mais elevada nesta fase.

A figura 4 mostra que o uso de velocidades de corte mais elevadas causa valores mais altos de força axial máxima.

A mesma tendência pode ser observada no uso de avanços mais altos. Regra geral, estes resultados estão de acordo com o trabalho apresentado por Hocheng et al (1992) ao identificar um domínio óptimo de combinação de parâmetros que resulta do uso de um avanço baixo com uma velocidade

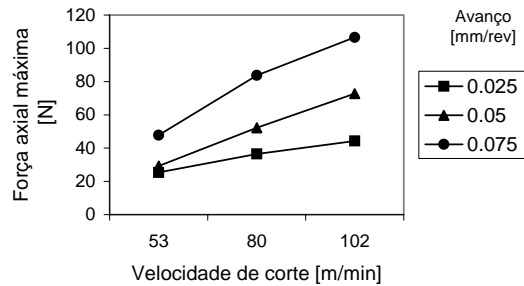


Fig 4 - Força axial máxima durante a furação para diferentes velocidades e avanços (broca helicoidal).

de de corte baixa. Velocidades de corte elevadas aumentam o risco de danos combinação de parâmetros que resulta do uso de um avanço baixo com uma velocidade de corte baixa. Velocidades de corte elevadas aumentam o risco de danos térmicos e amolecimento da matriz. Este fenómeno tem como consequência a perda de resistência mecânica das camadas não cortadas do laminado, levando à ampliação da área delaminada, como pode ser observado nos resultados apresentados na figura 5.

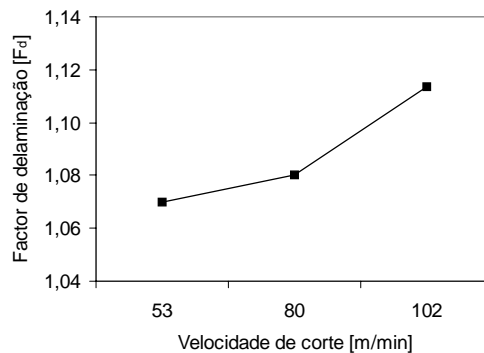


Fig 5 - Resultado do factor de delaminação – Fd – para diferentes velocidades de corte.

O uso de avanço médio ou alto leva a um aumento da força axial exercida sobre as camadas não cortadas do laminado. Esta consequência é conhecida na furação de qualquer tipo de material. No entanto, quando estão em causa placas de laminados, este aumento da força axial tem uma influência directa na ocorrência e propagação da delaminação. Com base nestes resultados, o avanço menor é o mais recomendável (figura 6).

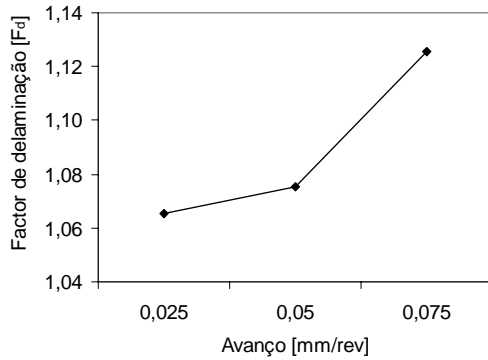


Fig 6 - Resultado do factor de delaminação – F_d – para diferentes avanços.

4.1 Estudo das geometrias de broca

Tal como referido no plano experimental, pretendia-se efectuar uma comparação entre as três geometrias de broca utilizadas: helicoidal com pré-furação, Brad e bi-diametral. O uso de pré-furo não se mostrou vantajoso no caso da broca Brad. No caso da broca bi-diametral, a operação de pré-furação está incluída ao executar a operação com esta ferramenta, diminuindo o tempo de operação.

Tal como na secção anterior, os resultados considerados para avaliação foram a força axial máxima durante a furação e a extensão da área delaminada, através do processo descrito em 3.2 e das equações (2) e (3). Como seria de esperar, a geometria da ferramenta revelou ser um factor importante nos resultados analisados. Mesmo sem qualquer variação de velocidade de corte e de avanço, é possível estabelecer uma ordenação de resultados em função da geometria da broca, entre as três utilizadas.

O menor valor da força axial foi obtido nos furos executados com a broca helicoidal. Nos furos efectuados com a broca bi-diametral, a força axial era cerca de 14% mais elevada. Da broca Brad resultaram valores de força axial máxima aproximadamente 45% mais altos do que os registados com a broca helicoidal (tabela 2).

A avaliação da delaminação mostrou resultados com uma hierarquia diferente da verificada no critério de força axial máxima. Como se pode ver nas figuras 7a e 7b, a delaminação causada pela broca Brad foi a menor, independentemente do critério

Tabela 2: Resultados da força axial na penúltima camada para um avanço de 0,05 mm/rot, velocidade de corte de 53 m/min, comparados com o modelo da eq. (1).

Broca	Força axial [N]
Helicoidal	14.7
Brad	23.5
Bi-diametral	17.8
Modelo Eq. (1)	29

utilizado. Por outro lado, a delaminação causada pela broca bi-diametral foi maior do que a verificada com as outras ferramentas. Este resultado contrariou as expectativas de redução de delaminação através do escalonamento da força de corte em duas etapas. De notar que o desenho da ponta desta broca pretendia reduzir o efeito de indentação ao iniciar o corte logo após o contacto com a placa, tal como acontece nas brocas tipo ‘Dagger’, e que o primeiro diâmetro escolhido igualava o valor do pré-furo para o qual tinham sido encontrados os melhores resultados. De realçar ainda o facto deste diâmetro se encontrar dentro da gama recomendada por Tsao e Hocheng [Tsao & Hocheng, 2003]. Este resultado menos conseguido pode ser explicado por uma geometria da aresta cortante pouco desenvolvida, com arestas direitas em vez da hélice típica das ferramentas de furação. De referir que o aspecto visual dos furos era igualmente pior, apresentando mais rebarba que os furos executados com as outras brocas deste estudo. Ficou claro que não foi possível conseguir um corte ‘limpo’ com a broca bi-diametral.

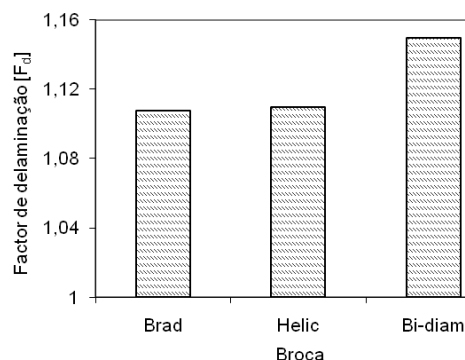


Fig 7a – Resultados do Factor de delaminação – F_d – para diferentes brocas.

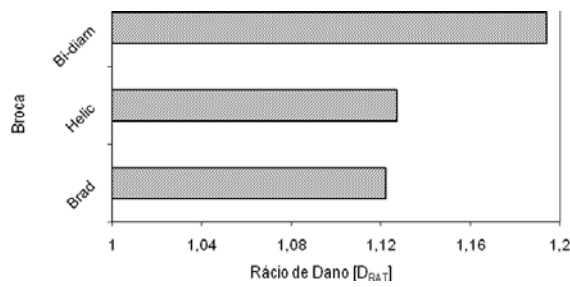


Fig 7b – Resultados do Rácio de Dano – D_{RAT} – para diferentes brocas.

Face a estes resultados torna-se necessário evoluir a ferramenta alternativa, pois a uma redução das forças axiais durante a furação deverá corresponder uma menor delaminação na região circundante do furo. Uma segunda geração da ferramenta, com o objectivo de obter um corte ‘limpo’ das fibras, um outro diâmetro da zona de pré-furo, algumas modificações no perfil e uma optimização de parâmetros de corte estão em curso. De qualquer modo, não podemos deixar de considerar estes primeiros resultados como interessantes pois foi possível atingir alguns dos objectivos propostos e recolher ensinamentos para futuras evoluções do conceito.

Outra observação está relacionada com o facto de não ser possível estabelecer uma correlação entre as forças axiais e a delaminação à volta do furo. Tal correlação só é possível de ser observada quando se comparam diferentes parâmetros de corte sem variação da geometria de ferramenta.

Tabela 3: Resultados da rugosidade R_a [μm], para uma velocidade de corte de 53 m/min.

Avanço [mm/rot]	0,025	0,05	0,075
Média	1.74	2.09	2.44
Broca Helicoidal	----	2.1	----
Broca tipo ‘Brad’	----	1.8	----
Broca Bi-diametral	----	2.2	----

Uma última observação relativa à rugosidade superficial nas paredes do furo maquinado. Com o auxílio de um

rugosímetro, foi medido o parâmetro R_a – rugosidade média – em diversos furos. De uma forma geral, mesmo considerando a existência de uma grande dispersão nos valores, é possível notar uma tendência para maiores valores de R_a quando o avanço é maior. Não foi possível estabelecer uma correlação equivalente em relação à velocidade de corte.

Os valores da tabela 3 representam uma média de diversos valores medidos em furos executados pelas três ferramentas em comparação. Sem que se pretenda apresentar resultados conclusivos no que respeita ao acabamento superficial das paredes maquinadas, parece poder afirmar-se que a broca tipo ‘Brad’ permite obter furos de menor rugosidade. Este resultado pode ser explicado pelo desenho das arestas cortantes da broca que permitem a execução de um ‘corte limpo’ das fibras de reforço do laminado.

5 - CONCLUSÕES

Foram efectuados ensaios de furação em placas carbono/epóxico com o objectivo de obter uma correlação entre os parâmetros de maquinagem e o dano. Três velocidades de corte e três avanços foram comparados, bem como três geometrias de ferramenta.

Os resultados utilizados para comparação foram a força axial máxima durante a furação do laminado, bem como a extensão da região delaminada, através da aplicação de dois critérios existentes, o factor de delaminação – F_d – e o Rácio de Dano – D_{RAT} . Para avaliar a extensão da área delaminada recorreu-se à radiografia com contraste combinada com o uso de técnicas de Visão Computacional. Dos resultados apresentados é possível retirar algumas conclusões relacionadas com os parâmetros de maquinagem e a escolha da geometria de ferramenta.

O recurso a avanços baixos e velocidades de corte baixas parece ser o mais apropriado, face às condições experimentais descritas. Considerando tais parâmetros a melhor combinação será o uso de uma velocidade de corte de 53 m/min e um avanço de 0,025 mm/rot.

A geometria de ferramenta mostrou ter grande influência quer nos resultados da força axial máxima quer nos resultados de delaminação. Considerando apenas estes últimos, a broca 'Brad' apresentou os melhores resultados nas condições experimentais descritas.

A broca bi-diametral aparenta ser uma boa solução se considerarmos a redução de forças durante a furação. Para além disso, possibilita a execução do furo numa só etapa, evitando o recurso à pré-furação do laminado, como aconteceu ao utilizar a broca helicoidal. No entanto, os resultados relativos à extensão do dano à volta do furo não foram animadores. São esperados melhoramentos no desenho desta ferramenta no sentido de vir a obter melhores resultados no que respeita à redução do dano.

6 – AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o apoio dado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) no âmbito do projecto PTDC/EME-TME/66207/2006.

REFERÊNCIAS

- R. Stone and K. Krishnamurthy, *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, 36, 1996, 985-1003.
- S. Abrate, *Composites Engineering Handbook*, Marcel Dekker, New York, 1997, 777-809.
- R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud and P. Swider, *Composites A*, 31, 2000, 1107-1115.
- E. Persson, I. Eriksson and L. Zackrisson, *Composites A*, 28, 1997, 141-151.
- C. H. K. Dharan and M. S. Won, *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 39, 2000, 415-426.
- H. Hocheng, H. Puw and K. C. Yao, *Machining Composite Materials Symp., ASM Materials Week 1992*, 127-138.
- Won, M. S. and Dharan, C. H. K., *Trans. ASME J. Manuf. Science and Eng.*, 124, 2002, 242-247.
- M. S. Won and C. H. K. Dharan, *Trans. of ASME J. of Manufacturing Science and Engineering*, 124, 2002, 778-783.
- C. C. Tsao and H. Hocheng, *Int. J. Machine Tools & Manuf.*, 43, 2003, 1087-1092.
- E. U. Enemuoh, A. S. El-Gizawy and A. C. Okafor, *Int. J. Machine Tools & Manuf.*, 41, 2001, 1795-1814.
- H. Hocheng and C. C. Tsao, *J. Materials Proc. Technology*, 167, 2005, 251-264.
- H. Hocheng and C. K. H. Dharan, *J. of Engineering for Industry*, 112, 1990, 236-239.
- F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet and L. Surcin, *Composite Structures*, 52, 2001, 511-516.
- L-B. Zhang, L-J. Wang and X-Y. Liu, *Proc Instn Mech Engrs*, 215 Part B, 2001, 135-146.
- W. C. Chen, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, 37, 1997, 1097-1108.
- M. Mehta, T. J. Reinhart and A. H. Soni, of the *Machining Composite Materials Symposium, ASM Materials Week 1992*, 113-126.
- C. C. Tsao and H. Hocheng, *Int. J. Machine Tools & Manuf.*, 45, 2005, 1282-1287.
- C. K. H. Dharan, *Communication on composites machining, INEGI, Porto, October 2000*
- J. M. R. S. Tavares, *Análise de Movimento de Corpos Deformáveis usando Visão Computacional*, PhD thesis, FEUP, 2000.
- J. M. R. S. Tavares, J. G. Barbosa and A. J. Padilha, *RESI – Revista Electrónica de Sistemas de Informação*, vol. 1, 2002.
- G.W.Awcock and R.Thomas, *Applied image process.*, McGRAW-HILL Int., NY, 1995.
- R. Jain, R. Kasturi, B. G. Schunck, *Machine Vision McGRAW-HILL International Editions*, New York, 1995.
- R. J. Schalkoff, *Digital image process. and computer vision*”, John Willey&Sons,1989.
- L. M. P. Durão, A. G. Magalhães, João Manuel R. S. Tavares and A. Torres Marques 2005, *Encontro Nacional de Visualização Científica, Espinho, Portugal, September 2005*, in CD