

MODELAÇÃO DA FURAÇÃO DE LAMINADOS POR ELEMENTOS FINITOS

L. M. P. Durão¹, D. J. S. Gonçalves¹, M.F.S. F. de Moura², A.T. Marques²

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

² INEGI/FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica

RESUMO

O recurso ao Método de Elementos Finitos (MEF) para a simulação e estudo da maquinagem tem vindo a merecer um interesse crescente. Neste trabalho comparam-se os resultados experimentais obtidos usando diferentes brocas helicoidais com uma simulação numérica da furação usando elementos sólidos tridimensionais do software ABAQUS® Explicit. Os resultados obtidos mostram a aplicabilidade do modelo, nomeadamente no que respeita à variação do principal parâmetro de corte no processo de furação – o avanço – e da geometria da ferramenta. O desenvolvimento das forças axiais durante a furação está directamente relacionado com a selecção dos parâmetros de corte e geometria de ferramenta e contribui para a existência de danos na placa. Assim, a minimização destas forças permite reduzir o risco de delaminação. Os resultados relativos à força para o início da delaminação são comparados com modelos analíticos já conhecidos. Os resultados numéricos apresentam uma concordância apreciável com os obtidos experimentalmente.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Maquinabilidade dos compósitos

Nas últimas décadas os materiais compósitos, devido às suas excepcionais propriedades físicas, têm conhecido um alargamento do seu campo de aplicação. No entanto, os compósitos levantam problemas específicos em relação à sua maquinabilidade, quando comparados com os materiais metálicos. Por um lado, a abrasividade das fibras provoca um rápido desgaste das arestas de corte das ferramentas e deterioração das superfícies maquinadas. Por outro lado, a sua maquinagem pode provocar outros defeitos, como por exemplo delaminações,

arrancamento de fibras ou danos térmicos na matriz (Wern, 1994). Quando se analisam materiais compósitos laminados convém lembrar que, para além da fibra de reforço, também a orientação e sequência de empilhamento alteram as suas propriedades.

Dos defeitos que podem resultar da furação de um compósito, o mais grave é a delaminação pois provoca a perda de propriedades mecânicas das peças tais como a resistência mecânica (Abrate, 1997) e à fadiga (Persson, 1997). O principal mecanismo responsável pela delaminação do tipo “push-down” é a força axial exercida pelo centro estacionário da broca cuja acção mecânica se aproxima mais de

uma extrusão do que de uma furação. A minimização desta força axial reduz a probabilidade de ocorrência da delaminação. Diversas técnicas têm vindo a ser desenvolvidas para reduzir a delaminação, quer baseadas numa escolha adequada dos parâmetros de corte, quer na geometria da ferramenta ou mesmo na escolha do material desta (Piquet, 2000; Park, 1995; Murphy, 2001; Dharan e Won, 2000; Durão, 2009). Outros estudos têm sido baseados na implementação de um controlo neural da força axial através da variação do avanço (Stone e Krishnamurthy, 1996), o uso de uma placa sacrificial ou o recurso à pré-furação (Won e Dharan, 2002; Tsao e Hocheng, 2003).

1.2 - Utilização dos Elementos Finitos

A aplicação do Método dos Elementos Finitos – MEF – ao estudo da maquinagem de materiais tem vindo a conhecer um interesse crescente, especialmente a nível da modelação do corte ortogonal, mais fácil de simular. Vários aspectos relativos à maquinagem têm merecido interesse, tais como a remoção de material, os modelos de corte ortogonal e oblíquo ou o mecanismo de formação da apara. Uma extensa revisão de todas estas contribuições, contendo 372 referências, foi publicada por Mackerle (2003). No entanto, a maior parte destes estudos são dedicados à maquinagem de materiais metálicos. São escassos os casos de estudos publicados relativos à aplicação do MEF na furação de materiais compósitos. Nesses estudos pode-se incluir a proposta de um algoritmo adaptativo para a simulação do corte ortogonal (Mahdi e Zhang, 2001a) utilizando um critério de tensão máxima para iniciar o corte. Num outro artigo (Mahdi e Zhang, 2001b) os mesmos autores adoptaram o critério de Tsai-Hill para simular a formação da apara, tendo obtido uma boa correlação com os resultados experimentais. Um outro trabalho (Budán e Vijayarangan, 2002) consistiu num estudo da influência da velocidade de corte, avanço e teor em fibras da peça no acabamento superficial, variações dimensionais e forças axiais de corte que podem causar a delaminação. A

simulação da formação da apara para laminados unidireccionais de grafite/epóxico baseado no mecanismo de corte ortogonal foi desenvolvido, considerando sete diferentes casos de orientação das fibras relativamente à aresta de corte (Arola, 2002). A aplicação de um método incremental para a simulação da furação foi utilizado para a determinação de tensões residuais (Sicot, 2003). Um modelo tridimensional considerando o uso de elementos de interface que incorporam um modelo de dano de modo misto, permite simular o início e propagação da delaminação (Durão, 2006; Durão, 2008).

Neste trabalho é analisada a furação de laminados carbono/epóxico através do uso de um Modelo de Elementos Finitos. A placa é modelada considerando camadas empilhadas numa sequência que lhe confere propriedades quasi-isotrópicas, embora o modelo possa adaptar-se a qualquer outra sequência de empilhamento. A ferramenta – broca – é modelada como ‘corpo rígido’. O modelo permite comparar diferentes geometrias de ferramenta e fornecer resultados relativos às forças axiais e de início da delaminação.

Os resultados de força máxima obtidos no modelo são comparados com dados experimentais. As curvas força/deslocamento para as diferentes geometrias de ferramenta são comparadas com as obtidas experimentalmente.

2 - DELAMINAÇÃO EM COMPÓSITOS

2.1 - Mecanismo de delaminação

A furação de placas em compósitos laminados é normalmente executada com uma broca helicoidal. Dadas as características específicas dos materiais reforçados com fibras – não homogéneos, anisotrópicos e extremamente abrasivos – a utilização deste tipo de brocas necessita de uma cuidadosa selecção do seu material de forma a minimizar os danos, já anteriormente referidos.

Considerando os diferentes tipos de dano que podem ocorrer em consequência da

furação de um compósito laminado, a delaminação é o mais grave, pois provoca a perda de características mecânicas da placa laminada. Este tipo de dano pode ser provocado quando a ponta da broca se encontra próximo do lado oposto ou inferior da placa, causando o descolamento das camadas inferiores – delaminação “push-down”, Figura 1.

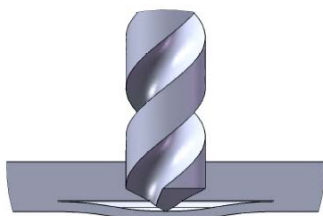


Fig 1 – Mecanismo de delaminação “push-down”.

2.2 - Modelos analíticos

A força crítica para o início da delaminação tem sido objecto de diversos estudos baseados na Mecânica da Fractura Linear-Elástica, fornecendo modelos para a sua determinação. Um dos mais simples na sua formulação é apresentado por Hocheng e Dharan (1990)

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

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 da delaminação), E_1 o módulo de elasticidade e ν_{12} o coeficiente de *Poisson* de uma placa unidireccional do mesmo material e h a espessura não cortada.

Outra abordagem foi sugerida por Lachaud (2001) considerando a existência de uma tensão perpendicular à superfície da placa e uma pequena espessura não cortada. Partindo de duas hipóteses distintas – carga concentrada e carga distribuída – os autores encontraram diferentes expressões para o valor da força crítica para o início da delaminação:

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

considerando o modelo de carga distribuída, e

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

considerando o modelo de carga concentrada. Os coeficientes D e D' resultam da aplicação de relações da teoria dos laminados.

Numa verificação experimental, os autores observaram um melhor ajustamento da equação (2) aos dados obtidos com uma placa quasi-isotrópica.

Outros modelos têm sido apresentados desde então, analisando casos particulares tais como o efeito da pré-furação (Tsao e Hocheng, 2003), uma geometria específica de broca (Hocheng e Tsao, 2005) ou a influência da sequência de empilhamento (Jung, 2005). Outros estudos partem de diferentes pressupostos quanto à forma da área delaminada (Zhang, 2001).

2.3 - Modelo de Elementos Finitos

Uma análise por elementos finitos baseia-se na substituição de um meio contínuo, no qual é possível determinar com exactidão o valor das diferentes variáveis, por um meio descontínuo formado por elementos finitos no qual é possível o cálculo dessas variáveis em pontos pré-estabelecidos, os nós. O valor de qualquer variável entre nós é assim obtido por interpolação. Os nós são os vértices dos elementos que podem ser bi ou tridimensionais e estes podem ter diferentes números de nós. Num problema que envolve maquinaria, como o que aqui se apresenta, acresce ao modelo a definição de um critério de remoção de material que permita simular a formação e remoção da avara. O principal objectivo de qualquer método de elementos finitos é o de permitir oferecer uma alternativa rápida e económica ao método experimental que, como se sabe, pode tornar-se não só demorado mas também caro devido ao consumo de materiais.

O objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo numérico que seja capaz de simular o processo de furação de placas de compósitos laminados. Para tal foi utilizado o software de elementos finitos ABAQUS®, sendo a placa modelada com o formato de um quadrado. Para tal foram considerados elementos prismáticos de 8 nós disponíveis na biblioteca do ABAQUS®, criando uma placa de dimensões 100 x 100 mm². Os elementos estão distribuídos num total de 14 camadas numa sequência de empilhamento quasi-isotrópica correspondente a uma espessura final de 4 mm. A espessura de cada camada está relacionada com a espessura do pré-impregnado usado no trabalho experimental – 0.125 mm. Numa primeira fase, foi utilizada uma malha grosseira que permitiu afinar rapidamente o processo de simulação e numa segunda fase, a malha foi refinada, tornando as simulações mais lentas mas permitindo uma melhor aproximação aos resultados experimentais que serviram de base para a comparação e validação do modelo.

Para as simulações pretendidas, em que a broca adquire um movimento cuja velocidade corresponde à velocidade de avanço da ferramenta, foi utilizada a opção ABAQUS®/Explicit. Esta opção permite uma modelação do dano com múltiplos mecanismos que concorrem para a perda da resistência mecânica. Este modelo de degradação de propriedades baseia-se na mecânica do dano.

Para simular a degradação e separação do material foram utilizadas as funções “Damage initiation”, “Damage evolution” e “Element deletion”, todas disponíveis no ABAQUS®.

O primeiro critério estabelece uma condição que deve ser atingida para que ocorra a degradação progressiva do material. O segundo critério baseia-se na perda progressiva da rigidez do material até à sua completa rotura. Nesse momento é efectuada a remoção do material através da instrução “Element deletion”. Das duas opções disponíveis no programa Abaqus, foi escolhida a remoção de elementos com base na acumulação da energia necessária

para a rotura, critério que nos pareceu mais realista que a remoção baseada num deslocamento até à rotura.

Para a ferramenta – broca – foi usada a opção ‘corpo rígido’ disponível no ABAQUS®, com o respectivo nó de referência localizado na sua ponta. A broca actua sobre as camadas não cortadas do laminado, tal como nos modelos analíticos referidos em 2.2, de uma forma semelhante ao trabalho experimental descrito por Lachaud (2001), Figura 2.

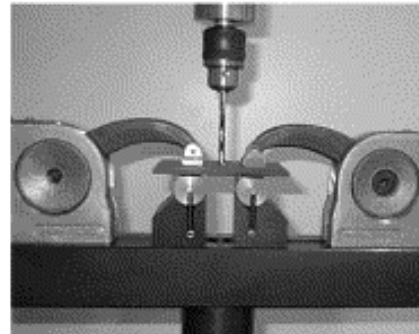


Fig 2 – Modelo experimental de furação (Lachaud, 2001)

3 - TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 - Furação de placas

Com o objectivo de obter dados experimentais comparativos, foram produzidas placas com uma matriz em resina epóxida reforçada com fibra de carbono, obtidas através de uma sequência de empilhamento do pré-impregnado CC160 ET443 com a orientação [(0/90)]_{6s}. Posteriormente o laminado foi curado numa prensa de pratos quentes a uma pressão de 300 kPa com um ciclo de aquecimento até aos 130°C, estágio durante uma hora e arrefecimento. A espessura final da placa é de 3,8 mm. De seguida, as placas foram cortadas com um disco abrasivo em provetes de 165 x 96 mm² para ensaios de furação. Os ensaios de furação foram realizados numa máquina CNC DENFORD Triac Centre com 3,7 kW de potência, velocidade de rotação máxima de 7500 rpm e velocidades de avanço de 0 a 2000 mm/min.

A força axial (F_z) durante a furação foi monitorizada através de um dinamómetro

Kistler 9257B associado a um computador para recolha de dados. As placas foram furadas sem utilização de placa sacrificial. Detalhes do processo podem ser encontrados em Durão (2010).

3.2 - Resultados experimentais

A curva força/deslocamento obtida experimentalmente tem uma forma típica, independentemente do material. Após o contacto entre a broca e a peça verifica-se um aumento da força, que se mantém aproximadamente constante durante o tempo em que a broca está completamente imersa na placa e reduz à medida que a espessura não cortada diminui. No fim a força anula-se, dado que cessa a resistência ao movimento de avanço da broca.

Para efeitos de comparação foram utilizados os resultados obtidos com a broca helicoidal com ponta de 120° e três avanços, respectivamente 0.02, 0.06 e 0.12 mm/rot a que correspondem as velocidades de avanço de 56, 168 e 336 mm/min, respectivamente. Como é sabido, a um aumento do avanço corresponde um aumento da força axial durante a furação. Os resultados considerados relevantes para comparação com o modelo de elementos finitos aqui apresentado foram a curva força/deslocamento e o valor máximo da força axial durante a furação das placas. Dado que o valor da força de corte varia ao longo de uma rotação da broca, devido à mecânica própria do processo de furação, a força axial considerada é a média em cada rotação da ferramenta.

3.3 - Comparação com MEF

Nas figuras seguintes – Figuras 3, 4, 5 e 6 – são apresentados alguns passos do processo de simulação, estando o dano nas placas relacionado com diferentes níveis de cinzento.

De cada simulação foram retirados os dados relativos à força máxima durante a furação e a curva força/deslocamento.

A tabela 1 compara os valores de força máxima obtidos com os três diferentes

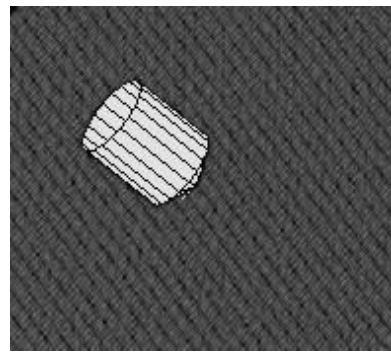


Fig 3 – Início da simulação.

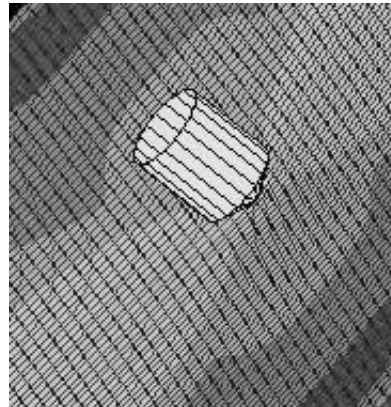


Fig 4 – Placa com alguma extensão de dano, mas sem remoção de material.

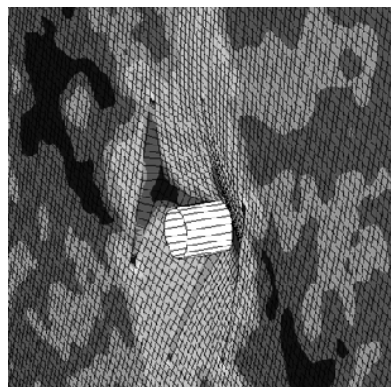


Fig 5 – Placa com dano mais extenso, imediatamente antes da remoção de material.



Fig 6 – Fase final da simulação, a ponta da broca já é visível do lado oposto da placa.

avanças experimentais e com o modelo, aplicando diferentes tempos de percurso da broca através da placa.

Tabela 1 – Comparação de resultados de força máxima durante a furação.

Avanço (mm/rot)	Experimental (N)	Mod. Elementos Finitos (N)
0.02	61	121
0.06	105	136
0.12	165	145

Como se pode observar, o modelo fornece resultados coerentes em termos do escalonamento das forças em função do avanço, crescendo a força máxima à medida que o avanço aumenta. No entanto, qualquer um dos valores está ainda um pouco afastado dos valores reais. De notar que para avanços mais elevados o valor torna-se mais próximo do experimental o que sugere uma razoável aproximação.

A figura 7 permite comparar a curva força/deslocamento obtida na furação experimental com a curva resultante da aplicação do método de elementos finitos. Neste caso foi aplicado o avanço intermédio, correspondente a 0.06 mm/rot.

De realçar a boa concordância entre a forma da curva experimental e a forma da curva obtida pelo modelo numérico. A existência de uma força positiva no fim da simulação deve-se à necessidade de não permitir a remoção total do material em contacto com a broca, uma vez que o comportamento do modelo de simulação inclui o contacto ferramenta/peça.

Outro resultado esperado do modelo é a determinação do início da delaminação e comparação do valor da força nesse instante com os modelos analíticos apresentados em 2.2. Por agora, apenas se pode referir que a força remanescente na simulação é superior aos valores dados pelas equações (1), (2) ou (3) para o valor da força crítica na situação de uma camada não cortada ($h=0.125$ mm). Note-se que a determinação do momento do início da delaminação por via experimental não é possível, nas condições aqui referidas.

4 - CONCLUSÕES

Foi apresentado um processo de simulação da furação de laminados carbono/epóxico utilizando um modelo de elementos finitos tridimensional. Este modelo usa elementos sólidos disponíveis no programa ABAQUS[®] Explicit para a

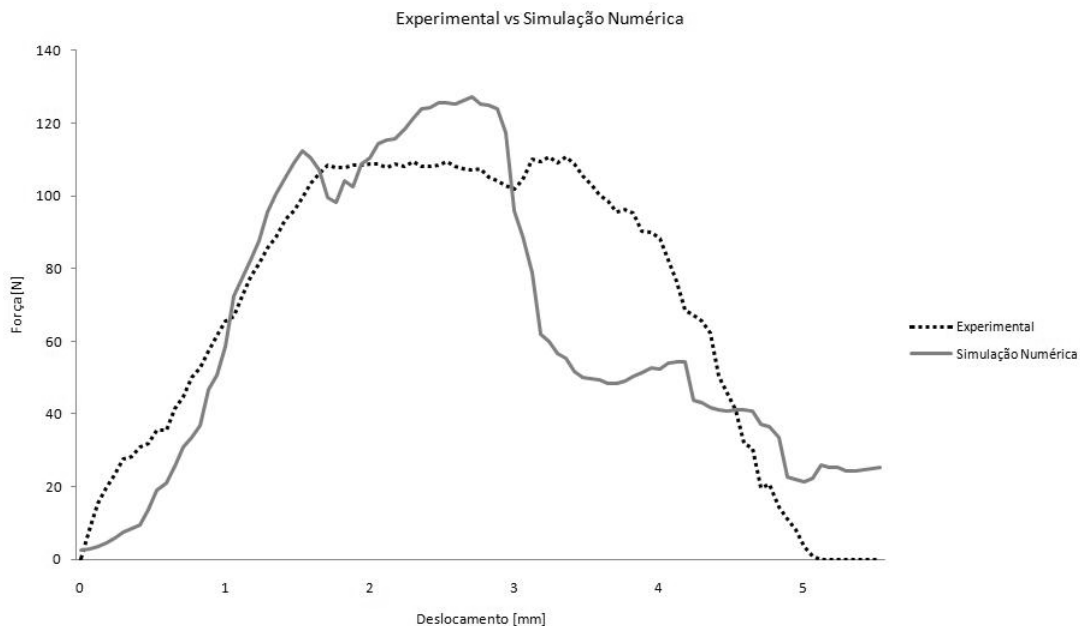


Fig 7 – Comparação das curvas obtidas experimentalmente com o modelo apresentado.

modelação das camadas do laminado, apropriados para o modelo de dano que se pretende analisar. Os resultados obtidos com o modelo numérico foram comparados com modelos analíticos existentes e com resultados obtidos experimentalmente.

Com base no trabalho aqui descrito, é possível extrair algumas conclusões:

- a forma da curva força/deslocamento obtida numericamente é similar às curvas obtidas no trabalho experimental;
- o efeito da variação do tempo para o percurso definido para a broca, e consequentemente da velocidade de avanço, tem um efeito idêntico ao esperado e verificado experimentalmente;
- os valores da força axial máxima durante a furação fornecidos pelo modelo estão próximos dos valores experimentais para os avanços mais elevados, afastando-se no avanço mais baixo;
- face aos modelos analíticos existentes e aos resultados do modelo, a delaminação deverá ocorrer nas camadas inferiores do laminado, resultado que confirma a observação experimental;
- o modelo numérico permite simular a furação de placas carbono/epóxico com propriedades quasi-isotrópicas.

Pre vemos que este modelo possa ser aplicado a outros tipos de laminados como os vidro/epóxico e os híbridos com camadas com diferentes tipos de reforço.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), no âmbito do projecto PTDC/EME-TME/66207/2006 – “Furação de estruturas em compósitos de matriz polimérica”.

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

de Engenharia do Porto pela cedência do equipamento de furação e ao Eng. Victor Manuel da Costa Ribeiro e ao Dr. Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho por todo o apoio prestado.

REFERÊNCIAS

- Abrate, S. 1997. Machining of Composite Materials, Composites Engineering Handbook, Ed. P. K. Mallick, Marcel Dekker, New York, pp. 777-809.
- Arola, D., Sultan, M. B., Ramulu, M. 2002. Finite element modelling of edge trimming fiber reinforced plastics, J. of Manufacturing Science and Engineering, v. 124, p. 32-41.
- Budan, D. A., Vijayarangan, S. 2002. Quality assessment and delamination force evaluation in drilling glass fiber-reinforced plastic laminates – a finite element analysis and linear elastic fracture mechanics approach, Proc Instn Mech Engrs, v. 216 Part B, J. Engineering Manufacture, p. 173-182.
- Dharan, C. H. K., Won, M. S. 2000. Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates”, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, v. 39, p. 415-426.
- Durão, L. M. P., de Moura, M. F. S. F., Marques, A.T. 2006. Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates, Composites A, v. 37, p. 1325-1333.
- Durão, L.M.P., de Moura, M.F.S.F., Marques, A.T. 2008. Numerical prediction of delamination onset in carbon/epoxy composites drilling Engineering Fracture Mechanics, v. 75, p. 2767-2778.
- Durão, L.M.P., Marques A.T., Magalhães, A.G., Silva, J.F., Tavares, J.M.R.S. 2009. Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: evaluation of a special step drill, Composites Science and Technology, v. 69, p. 2376-2382.
- Durão, L.M.P., Gonçalves, D.J.S., Albuquerque, V.H.C. de, Tavares, J.M.R.S., Avaliação de ferramentas para a furação de laminados, 8º CNME, 2010, Guimarães, Portugal
- Hocheng, H., Dharan, C. K. H. 1990. Delamination during drilling in composite laminates J. of Engineering for Industry, v. 112, p. 236-239.
- Hocheng, H., Tsao, C.C. 2005. The path towards delamination-free drilling of composite

- materials, *J. of Materials Processing Technology*, v. 167, p. 251-264.
- Jung, J. P., Kim, G. W. et al. 2005. Critical thrust force at delamination propagation during drilling of angle-ply laminates, *Composite Structures*, v. 68, p. 391-397.
- Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F., Surcin, L. 2001 Drilling of composite structures, *Composite Structures*, v. 52, p. 511-516.
- Mackerle, J. 2003. Finite element analysis and simulation of machining: an addendum. A bibliography (1996-2002), *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, p. 103-114.
- Mahdi, M., Zhang, L. 2001. An adaptive three-dimensional finite element algorithm for the orthogonal cutting of composite materials”, *J. Materials Processing Technology*, v. 113, p. 368-372.
- Mahdi, M., Zhang, L. 2001. A finite element model for the orthogonal cutting of fiber-reinforced composite materials, *J. Materials Processing Technology*, v. 113, p 373-377.
- Murphy, C., Byrne, G., Gilchrist, M. D. 2001. The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials, *Proc Instn Mech Engrs*, v. 216 Part B, p. 143-152.
- Park, K.Y.; Choi, J.H., Lee, D.G. 1995. Delamination-free and high efficiency drilling of carbon fibre reinforced plastics, *J. Composite Materials*, v 29, p. 1988-2002.
- Persson, E., Eriksson, I., Zackrisson, L. 1997. Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates, *Composites A*, v. 28, p. 141-151.
- Piquet, R.; Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P. 2000. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills, *Composites A*, v. 31, p. 1107-1115.
- Sicot, O., Gong, X. L., Cherouat, A., Lu, J. 2003. Determination of residual stress in composite laminates using the incremental hole-drilling method, *J. of Composite Materials*, v. 37, p.831-844.
- Stone, R., Krishnamurthy, K. 1996. 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.
- Tsao, C. C., Hocheng, H. 2003. 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.
- Wern, C.W.; Ramulu, M., Schukla, A. 1994. Investigation of Stresses in the Orthogonal Cutting of Fiber-Reinforced Plastics, *Experimental Mechanics*, p. 33 – 41.
- Won, M. S., Dharan, C. H. K. 2002. Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates, *Trans. of ASME J. of Manufacturing Science and Engineering*, v. 124, p. 242-247.
- Zhang, L-B., Wang, L-J., Liu, X-Y. 2001. A mechanical model for predicting critical thrust forces in drilling composite laminates, *Proc Instn Mech Engrs*, v. 215 Part B, p. 135-146.