

FURAÇÃO COM ALTA VELOCIDADE DE CORTE EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO

JUAN C. CAMPOS RUBIO^{1*}, L.EONARDO R. SILVA², ALEXANDRE M. ABRÃO¹, PAULO E. FARIA¹, A. ESTEVES CORREIA³, J. PAULO DAVIM⁴

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31.270-901 Brasil.
juan@ufmg.br

²Departamento de Mecânica - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça - Belo Horizonte, MG, CEP: 30.410-000 Brasil

³Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Escola de Tecnologia, Instituto Politécnico de Viseu – IPV. Campus de Refeses, Viseu 3504 – 510 – Portugal

⁴Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal.

ABSTRACT: *High speed machining is an outstanding technology which allows increasing competitiveness with regard to both the quality of the machined component and machining costs. This work is concerned with high speed drilling of fiber reinforced polymeric composites. In spite of the advantages offered by this category of materials generally associated to their specific strength, fiber reinforced composites are considered difficult to machine materials owing to the accelerated tool wear rates resulting from abrasion, in addition to the fact that the fibers anisotropy affects chip formation. Therefore, the knowledge related to the machinability of metallic alloys cannot be directly applied to polymeric composite.*

Keywords: *Composite laminates, Drilling, Delamination, HSM,.*

RESUMO: *Dentre as novas tecnologias que começaram a ser empregadas na busca da competitividade, está a tecnologia de usinagem com alta velocidade de corte - HSC (high speed machining). O presente trabalho estuda a furação com alta velocidade de corte em compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro, que são conhecidos como materiais cujas propriedades e desempenho são superiores as principais propriedades dos materiais plásticos, tais como resistência mecânica, rigidez e resistência à fluência, através da adição de reforços na forma de fibras de vidro. Em contrapartida, torna-se um material de difícil usinabilidade devido à aceleração do desgaste da ferramenta, causado principalmente por abrasão, além do fato da anisotropia das fibras interferirem no mecanismo de formação de cavacos, de forma que os conhecimentos disponíveis para o corte de metais não podem ser transferidos diretamente para os plásticos reforçados.*

Palavras chave: *Compósitos laminados, Furação, Delaminação, HSM.*

1. INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem têm uma importância significativa dentro dos atuais sistemas produtivos de fabricação mecânica. A forte concorrência mundial gerou a procura por processos de usinagem econômicos, com grande capacidade de remoção de cavacos e que produzam peças com elevada qualidade. Novas tecnologias, conceitos de automação e estratégias têm sido adotados e implementados, com o objetivo de incrementar o desempenho e a eficiência dos processos produtivos.

Neste sentido, a tecnologia da usinagem com alta velocidade (HSM - *High Speed Machining*) surge como componente essencial na otimização dos esforços para manutenção e aumento da competitividade das empresas e se credencia como instrumento indispensável para o enfrentamento dos novos desafios que surgem, como novos materiais e ferramentas.

Com o desenvolvimento dos eixos-árvore de alta rotação nas últimas décadas, foi possível atingir altas velocidades, permitindo o estudo aprofundado e a disseminação da tecnologia HSM.

Muitas vantagens de HSM têm sido citadas, as mais comumente reivindicadas são altas taxas de remoção, baixas forças de corte, redução do tempo de produção, permitindo produzir peças com melhor qualidade superficial e dimensional (Dewes & Aspinwall, 1997) [01].

Consideram-se compósitos os materiais cuja composição é baseada na combinação de duas ou mais fases insolúveis e distintas quimicamente e cujas propriedades e desempenho são superiores às desses constituintes quando atuando isoladamente. Nesta situação, obtém-se uma melhoria apreciável de algumas das principais propriedades dos materiais plásticos (tais como resistência mecânica, rigidez e resistência à fluência) através da adição de reforços na forma de fibras de vidro, carbono (grafite), entre outros.

Compósitos poliméricos reforçados com fibra (CPRF) têm sido largamente utilizados na construção componentes estruturais para as indústrias aeronáutica e aeroespacial em função das suas propriedades mecânicas e físicas. Uma outra aplicação importante de CPRF, mais especificamente os reforçados com fibra de vidro, é a indústria eletro-eletrônica onde este material é usado para a produção de placas de circuito impresso (Abrão et al., 2007) [02].

Em contrapartida, tem-se uma aceleração do desgaste da ferramenta, causado principalmente por abrasão, além do fato da anisotropia das fibras interferir no mecanismo de formação de cavacos, de sorte que os conhecimentos disponíveis para o corte de metais não podem ser transferidos diretamente para os plásticos reforçados.

O processo de furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria manufatureira. A operação de furação de compósitos tem recebido a atenção de alguns pesquisadores, principalmente devido aos danos causados na entrada e saída da ferramenta, e caracterizados principalmente pela presença de trincas, delaminação da peça ou ainda descolamento das fibras da matriz.

No estudo de projeto de fuselagem de helicópteros realizado por Kassapoglou (1999) [03], mostra-se que dentre as diversas atividades necessárias para completar a manufatura de um componente estrutural, operações de furação representam cerca de 8,3 % do custo final do componente. Dessa forma, a possibilidade de reduzir custos através da utilização de HSM surge como uma importante alternativa para aumentar a produtividade.

Este trabalho estuda o uso da tecnologia HSM na furação de CPRF com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de usinagem em altas rotações..

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na indústria aeronáutica, bem como em várias outros segmentos nos quais se utilizam operações de usinagem, a furação é uma das operações freqüentemente usadas para a fixação de placas de materiais compósitos, assim como para fazer reparos estruturais.

Os principais defeitos causados pela operação de furação são: danos à entrada do furo, defeitos de circularidade,

danos causados pela temperatura na parede do furo e delaminação na saída do furo. Dentre os defeitos, a delaminação parece ser o mais crítico.

Segundo Khashaba et al. (2004) [04], a furação é geralmente um processo final, qualquer defeito durante esse processo conduz a rejeição da peça. Na indústria aeronáutica, a delaminação durante a furação é responsável por 60% de rejeição de peças. O impacto econômico é significativo, devido ao custo de processos anteriores. Além disso, de acordo com Elzenheimer et al. (2005) [05], o tempo gasto com a furação é o maior entre as operações executadas com ferramentas de arestas de corte com geometria definida.

De acordo com Lachaud et al. (2001) [06]; Hocheng e Tsao (2003) [07] e Davim et al. (2004) [08], pode-se dividir os defeitos causados pela operação de furação em: danos à entrada do furo, defeitos de circularidade, danos causados pela temperatura na parede do furo e delaminação na saída do furo, sendo a delaminação o defeito mais crítico durante o processo. Conforme mostrado na Figura 1, os fatores que influenciam em maior grau o processo de furação de CPRF são os parâmetros de corte e a geometria da ferramenta. Os quais devem ser escolhidos convenientemente para permitir a obtenção de furos de melhor qualidade (Abrão et al., 2007) [02].

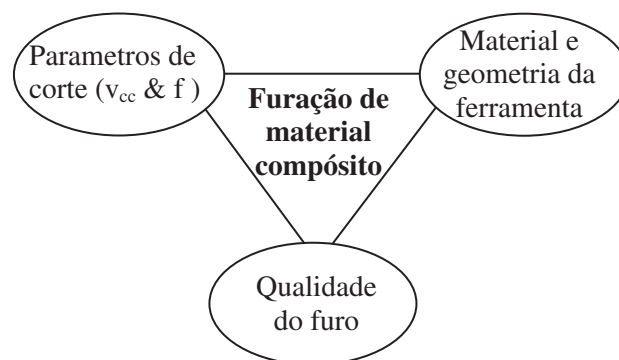


Figura 1 – Principais aspectos a serem considerados na furação de CPRF (Abrão et al., 2007) [02].

Caprino & Tagliaferri (1995) [09] investigaram a furação de compósito de poliéster reforçado com fibras de vidro com brocas de aço rápido. Os autores concluíram que o avanço é o principal parâmetro responsável pela intensidade e natureza dos danos causados à peça.

De modo a superar estes problemas, Dharan & Won (2000) [10] propuseram um sistema capaz de monitorar a força de avanço e torque e assim atuar no comando numérico da máquina ferramenta de modo a modificar as condições de operação (principalmente através da redução do avanço) e assim evitar danos ao componente.

No seu experimento de furação de placas de material compósito, Davim et al. (2004) [08] procuraram estabelecer uma relação entre a velocidade de corte e o avanço sobre a delaminação, assim como a influência do material de reforço no resultado final da furação. Os autores concluíram que o avanço é o parâmetro de corte que apresenta estatisticamente maior influência sobre a delaminação, tanto para o reforço Viapal VUP 9731 quanto para ATLAS 382-05.

Enderle & Knuszynski (1998) [11] afirmam que as definições da faixa de velocidade de HSM variam substancialmente conforme se muda de um tipo de usinagem para outro. Por exemplo, se no caso de fresamento uma aplicação de HSM envolve uma velocidade de corte da ordem de cinco a dez vezes maior que a velocidade convencional, o dobro da velocidade convencional já é suficiente para que os processos de furação e roscamento sejam considerados como HSM. Conforme se pode observar na Figura 2, de maneira geral a faixa de velocidades de corte comumente utilizada na furação de compósitos reforçados com fibras situa-se próxima de 40 m/min (Abrão et al., 2007) [02]: Desta forma, pode-se afirmar que uma velocidade de corte acima de 100 m/min seria caracterizada como furação com alta velocidade de corte.

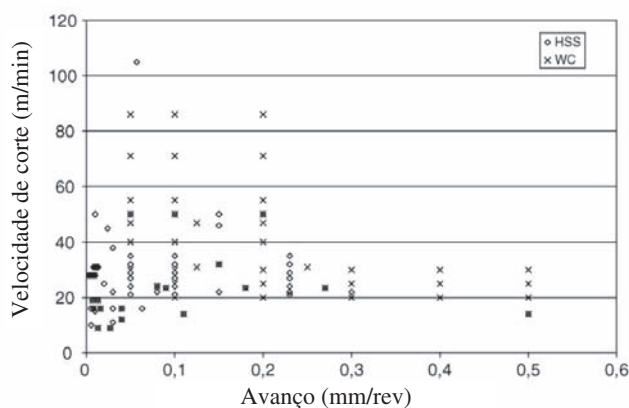


Figura 2 - Faixas de velocidade de corte e avanço para furação de CPRF utilizando ferramentas de aço rápido (HSS) e carboneto de tungstênio (WC) (Abrão et al., 2007) [02].

As características mais relevantes do emprego e utilização das altas velocidades de corte dizem respeito aos aspectos econômicos e técnicos. Altas taxas de remoção de material e reduzido tempo de usinagem são de importância decisiva para o aspecto econômico do processo de corte (Andrae, 1999) [12].

A comparação entre os resultados do modelo e aqueles obtidos experimentalmente dentro de uma faixa de rotação de 4.000 a 18.000 rpm mostrou que a influência da velocidade sobre torque e força de avanço é praticamente desprezível, o que não ocorre com o avanço, cuja relação é linear com torque e força de avanço (Elhachimi et al., 1999) [13].

Enemuoh et al. (2001) [14] realizaram um estudo com o objetivo de identificar condições de operação que garantissem furos livres de defeitos. Para tanto foi elaborado um planejamento experimental de ensaios. Os mapas produzidos para a furação de compósitos de reforçados com fibras de carbono indicaram que o emprego de altas velocidades de rotação (3.200 rpm) associadas a baixos valores de avanço assegura a produção de furos sem delaminação e com baixa rugosidade.

A furação de compósitos poliméricos reforçados com fibras de aramida é normalmente recomendada empregando-se

ferramentas de carboneto de tungstênio combinadas com altas velocidades rotacionais (entre 8.000 e 20.000 rpm) de modo a garantir furos com baixa rugosidade e sem delaminação. Entretanto, para Bhattacharyya e Horrigan (1998) [15] a utilização de brocas de aço rápido com geometria modificada (ângulo de ponta negativo e ângulos de folga e de hélice elevado) aliada ao uso de nitrogênio líquido como fluido de corte propicia acabamento e qualidade dimensionais satisfatórios.

Um estudo realizado por Lin e Chen (1996) [16] avaliou a utilização da usinagem com alta velocidade (faixa de rotação de 9.550 a 38.650 rpm, ou seja, velocidades de corte de 210 a 850 m/min) na furação de compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono. Os autores concluíram que a elevação da velocidade de corte resulta em aumento da taxa de desgaste da ferramenta de corte e, por conseqüência, em aumento da força de avanço. Assim, a utilização de baixos valores de avanço (inferiores a 0,07 mm/rev) é imperativa visando a produção de furos de qualidade aceitável. Além disso, ferramentas de carboneto de tungstênio com ângulo de ponta negativo apresentaram desempenho superior às brocas helicoidais de aço rápido.

Verifica-se, portanto, que a usinagem de materiais compósitos a altas velocidades de corte é um tema muito pouco explorado, e que em algumas situações os resultados de pesquisas mostram-se contraditórios.

3. TESTES REALIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS

Os testes de furação aqui apresentados foram realizados num centro de usinagem com potência no eixo árvore de 7.5 kW e velocidade de rotação máxima de 8000 rpm. O material utilizado foi um compósito laminado de resina epóxi reforçado com fibras de vidro (concentração de 50:50) de gramatura 220 g/m² e orientação das fibras 0/90°. As lâminas de compósitos foram obtidas manualmente pela sobreposição de 10 camadas de fibras, obtendo-se laminas com espessura média de 3 mm. A ferramenta utilizada foi uma broca helicoidal de carboneto de tungstênio (classe ISO K20) com diâmetro de 5 mm, ângulo de ponta de 130° e 2 arestas de corte. A Tabela 1 mostra os parâmetros de corte empregados no ensaio, assim como os resultados de delaminação obtidos para 3 velocidades de corte e 4 avanços distintos.

O dano na entrada do furo foi digitalizado por meio de um scanner de 600 dpi de resolução. O tratamento e análise das imagens foi realizado com auxílio do software ImageJ 1.34s do National Institute of Health (EUA).

A Figura 3 apresenta as imagens digitalizadas da delaminação na superfície de entrada dos furos: (a) imagem original (sem tratamento) e (b) área delaminada obtida por tratamento de imagens, cuja metodologia é apresentada em Davim et al. (2007) [17].

Tabela 1 - Parâmetros de corte e os correspondentes fatores de delaminação na entrada.

Teste N°	Velocidade de rotação (rpm)	Avanço (mm/min)	Fator de delaminação ⁽¹⁾ $F_d = \frac{D_{max}}{D_0}$		
			Medida 1	Medida 2	Media
1	4000	1000	1.602	1.516	1.559
2	4000	3000	1.854	1.635	1.745
3	4000	6000	2.087	1.824	1.956
4	4000	9000	1.980	1.804	1.892
5	8000	1000	1.496	1.204	1.350
6	8000	3000	1.814	1.497	1.656
7	8000	6000	1.797	1.606	1.702
8	8000	9000	1.612	1.796	1.704
9	40000	1000	1.453	1.233	1.343
10	40000	3000	1.642	1.550	1.596
11	40000	6000	1.716	1.690	1.703
12	40000	9000	1.285	1.577	1.431

⁽¹⁾ Média de dois ensaios

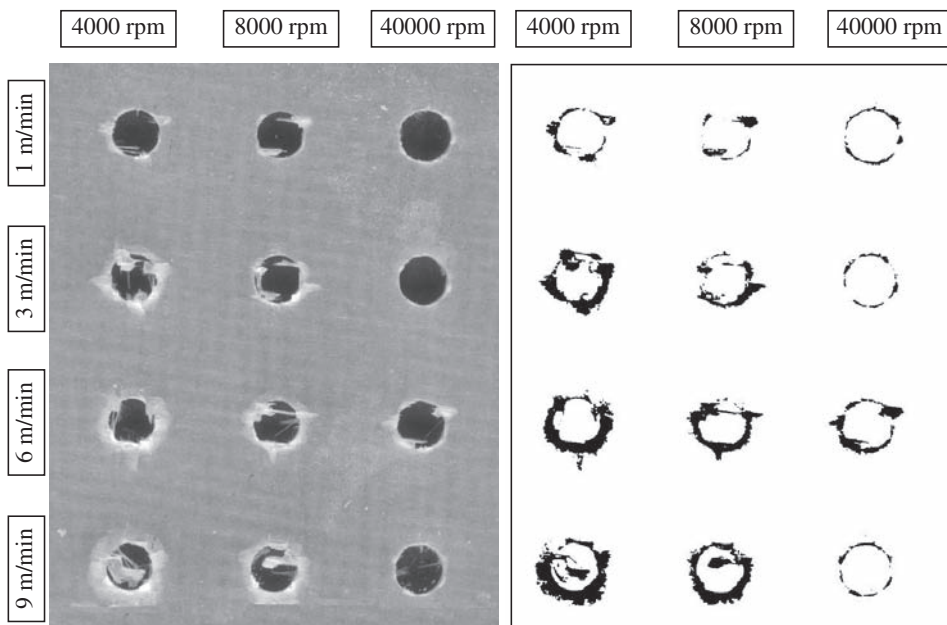


Figura 3 – Delaminação na superfície de entrada na furação de compósitos laminados de resina epóxi reforçada com fibras de vidro: (a) imagens originais; (b) áreas delaminadas obtidas por tratamento de imagens.

A Figura 4 apresenta a evolução da delaminação com o aumento dos parâmetros de corte. Nota-se que o aumento do avanço provoca uma evidente elevação da delaminação quando velocidades de rotação de 4000 e 8000 rpm são utilizadas. Entretanto, ao utilizar altas velocidades de corte (40000 rpm), uma redução do dano para o maior avanço pode ser observada. Este efeito pode ser atribuído ao curto período de contato da aresta de corte com a camada de compósito, que impede que o calor gerado seja conduzido e danifique a superfície do furo.

Da mesma forma, pode-se verificar que o aumento da velocidade de rotação de 4000 rpm para 8000 rpm provocou uma sensível redução do dano na entrada do furo. Entretanto, para a mudança de 8000 rpm para 40000 rpm, não provocou mudanças significativas na delaminação quando baixos valores de avanço foram empregados.

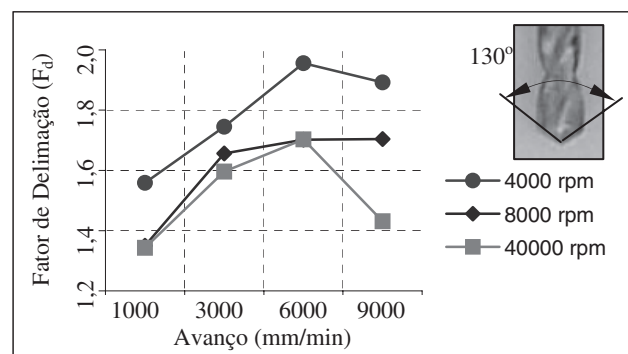


Figura 4 – Fator de delaminação (F_d) em função do avanço e da rotação para uma broca de 130° de ângulo de ponta (WN 11 RN).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo do comportamento da delaminação de placas de fibra de vidro em matriz epóxi quando submetidas à operação de furação com alta velocidade de corte.

O estudo permitiu constatar que o aumento da velocidade de corte na furação de compósitos de fibra de vidro permite uma redução do dano por delaminação na entrada do furo. Além disso, empregando-se uma velocidade de 8000 rpm observam-se resultados similares aos obtidos com 40000 rpm, desde que sejam usados baixos avanços.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às entidades de apoio a pesquisa de Portugal (GRICES) e do Brasil (CAPES) pelo suporte financeiro a este trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- [01] Dewes, R. C.; Aspinwall, D. K. A review of ultra high speed milling of hardened steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997: 69;1-17.
- [02] Abrão, A.M.; Faria P.E.; Campos Rubio J.C.; Reis P.; Davim J. P. Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007: 186; 1-7.
- [03] Kassapoglou C. Minimum cost and weight design of fuselage frames Part B: cost considerations, optimization and results. *Composites: Part A*. 1999: 30; 895-904
- [04] Khashaba, U. A. Delamination in Drilling GFR-Thermoset Composites. *Composite Structures*. 2004: 63; 313-327.
- [05] Lachaud, F.; Piquet, R.; Collombet, F.; Surcin, L. (). Drilling of Composite Structures, *Composite Structures*. 2001: 52; 511-516.
- [06] Hocheng, H.; Tsao, C. C. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003: 140;.335-339.
- [07] Davim, J. P.; Reis, P.; António, C. C. Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382-05). *Journal of Materials Processing Technology*. 2004:155-156; 1828-1833.
- [08] Caprino, G. And Tagliaferri, V. Damage development in drilling glass fibre reinforced plastics, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 1995: 35(6); 817-829.
- [09] Dharan, C.K.H.; Won, M.S. Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000: 40: 415-426.
- [10] Enderle, K.D.; Knuszynski, J. A tecnologia de corte a alta velocidade produz furos de melhor qualidade. *Máquinas e Metais*. 1998: 386; 16-20.
- [11] Elzenheimer, J.; Liebeck, T.; Tschannerl, M. Pesquisa mostra que ainda há muito potencial para ser explorado na furação. *Máquinas e Metais*. 2005: 470; 40-45.
- [12] Andrae, P. Chip formation in high speed cutting HSC. In: *3rd Internacional Machining & Grinding Conference*, Cincinnati, Ohio. 1999; 107-120.
- [13] Elhachimi, M., Torbat, S., Joyot, P. Mechanical modelling of high speed drilling. 2: predicted and experimental results, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 1999: 39; 569-581.
- [14] Enemuoh, E.U., El-Gizawi, A.S. and Okafor, A.C. (). An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2001: 41; 1795-1814.
- [15] Bhattacharyya, D., Horrigan, D.P.W. () A study of hole drilling in Kevlar composites - *Composites Science and Technology*. 1998: 58; 267-283.
- [16] Lin, S.C., Chen, C.K. (). Drilling carbon-fiber reinforced composite material at high speed, *Wear*. 1996: 196; 156-162.
- [17] Davim, J.P.; Campos Rubio, J.C.; Abrão, A. "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates". *Composite Science Technology*. 2007: 61; 294-300.