

EFEITOS DA BAIXA VELOCIDADE DE AVANÇO NA FURAÇÃO DE COMPÓSITOS LAMINADOS

Igor Basso

Marcelo Ferreira Batista

Renato Goulart Jasinevicius

Alessandro Roger Rodrigues

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense 400, São Carlos, 13566-590, Brasil

igorbasso@usp.br, mfb@usp.br, renatogj@sc.usp.br, roger@sc.usp.br

Resumo. O objetivo desse artigo é investigar os efeitos de baixas velocidades de avanço em furação de compósito laminado de fibra de carbono com matriz polimérica (CFRP). Para tanto, realizou-se experimentos de furação direta e passante em escala micro e macrométrica com brocas de metal duro de 0,6 mm e 6,0 mm de diâmetro, respectivamente. As respostas analisadas foram força de avanço e energia específica. O comportamento da força de avanço em função da velocidade de avanço se mantém em ambas escalas, contudo a energia específica na microfuração sofre um crescimento acentuado com a diminuição do avanço. Além disso, um coeficiente de homogeneidade em furação de compósitos foi proposto, ele é uma medida do número de camadas que compõe a área de corte. Este coeficiente indica que em microfuração o corte é heterogêneo e em macro é mais homogêneo.

Palavras chave: CFRP. Compósito. Efeito de escala. Furação. Microusinagem.

1. INTRODUÇÃO

A fabricação de furos livres de defeitos em compósitos laminados é um grande desafio para a indústria e academia. Dentre eles, o mais prejudicial é a delaminação, que segundo a literatura, ocorre quando a força de avanço é superior a força mínima necessária para desencadear trincas interlaminares (Dipaolo, *et al.*, 1996; Hocheng e Dharan, 1990). Na literatura há o consenso que a diminuição do avanço pode minimizar a delaminação (Ahmad, 2009; Chen, 1997; Hocheng e Tsao, 2003, 2006; Khashaba, 2012; Liu *et al.*, 2012), contudo, essa afirmativa não pode ser generalizada a todos os tipos de compósitos laminados e condições de furação, como demonstrado em alguns trabalhos (Basso, 2017; Batista, *et al.*, 2017). Avanços baixos representam pequenas espessuras de corte, podendo ser menor que a espessura da camada do compósito, diâmetro de uma fibra ou o raio da aresta principal da ferramenta, portanto, sob essas condições o material e o processo de usinagem devem ser considerados como heterogêneos.

Neste contexto, algumas questões são levantadas se a baixa velocidade de avanço reduz a delaminação, qual é o avanço mínimo que promove o corte do material? Quais danos tais avanços acarretam ao material? Quais condições de corte o material pode ser considerado homogêneo? Portanto, este artigo se propõe a investigar a heterogeneidade de compósitos poliméricos reforçado com fibra de carbono durante o processo de furação. Para isto, foram realizadas furações em escalas macro e micrométricas. São apresentados e discutido comportamentos da força de avanço, torque e energia específica.

2. METODOLOGIA

O material de análise foi o compósito de matriz polimérica de poli(sulfeto de fenileno) (PPS) reforçado com fibra de carbono T300 JB. A sequência de empilhamento foi [(0/90), (+45/-45)², (0/90)] arranjados para obter espessuras de aproximadamente 1,5 mm e 5 mm, respectivamente para ensaios de microfuração e macrofuração.

Os ensaios de furação foram realizados no centro de usinagem Romi modelo D600. Duas brocas distintas foram utilizadas para realização da macro e microfuração. Na escala macrométrica utilizou-se a broca de metal duro, sem recobrimento, com 6 mm de diâmetro da fabricante *Walter* código A1163-6. Já para a escala micrométrica utilizou-se a microbroca de 0,6 mm de diâmetro, de metal duro sem recobrimento da fabricante *Seco Tools* código SD26-0.60-3.60-3R1. A Tabela 1 apresenta maiores detalhes de geometria das ferramentas tais como ângulo de ponta, raio de aresta e diâmetro da aresta principal. Os raios das arestas principais das brocas foram mensurados através do microscópio 3D confocal *Olympus OLS 4100*.

A Tabela 2 apresenta as condições de furação utilizadas nos ensaios. Os experimentos foram conduzidos com a variação de duas velocidades de corte constante para as duas escalas de furação, e com a variação do avanço em três e seis níveis para macro e microfuração, respectivamente.

As forças de usinagem foram medidas nas duas escalas de furação através de dois dinamômetros distintos. Para os ensaios de macrofuração foi utilizado o dinamômetro de 4 componentes *Kistler 9272-4*, o amplificador *Kistler type 5019* e a placa de aquisição *National Instruments BNC-2110* com taxa de aquisição de 5 kHz. Nas microfurações o sistema de aquisição de força foi constituído pelo minidinamômetro de 3 componentes *Kistler 9256C2*, o amplificador *Kistler type 5019B* e a placa de aquisição *National Instruments NI USB-6216*, neste caso a frequência de aquisição utilizada foi de 30 kHz. Posteriormente, com o objetivo de melhorar a visualização do comportamento da força de avanço ao longo de toda a usinagem aplicou-se um filtro passa baixa de 30 Hz. A força de avanço máxima, aqui tratada como força de avanço (F_f), foi obtida através da média da região estável de corte (região ii da Fig. 1). A energia específica (u) apresentada neste artigo se trata da energia específica total de usinagem, foi obtida através da metodologia apresentada por Rigatti *et al.* (2013). Contudo, para o cálculo foi tomada a força de usinagem ($F_u = [F_x^2 + F_y^2 + F_z^2]^{0,5}$), multiplicado pela velocidade de corte efetiva (V_{ce}) e dividido pelo volume de material removido, de acordo com a Eq. 1:

$$u = \frac{4V_{ce}}{\pi D^2 l} \int F_u dt \quad (1)$$

onde D é o diâmetro da broca e l o comprimento do furo.

Tabela 1. Dimensões geométricas das brocas utilizadas.

Escala	Diâmetro D	Ângulo de ponta 2κ	Ângulo de hélice δ	Raio de aresta r_e	Diâmetro da aresta transversal w	w/D
Macro	6,0 mm	118°	30°	$9,95 \pm 2,02 \mu m$	0,050 mm	0,8%
Micro	0,6 mm	130°	30°	$2,27 \pm 0,27 \mu m$	0,165 mm	27,5%

Tabela 2. Condições de furação.

Escala	Macro			Micro					
Rotação – n (rpm)	500	1000		5000	10000				
Velocidade de corte – V_c (m/min)	9,4	18,8		9,4	18,8				
Avanço – f ($\mu m/rev$)	5	25	100	0,5	1	1,8	2,5	5	10
Espessura de corte – h (μm)	2,14	10,71	42,86	0,23	0,45	0,79	1,13	2,27	4,53
Espessura sobre raio de aresta – h/r_e	0,22	1,08	4,31	0,10	0,20	0,35	0,50	1,00	2,00

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta o comportamento da força de avanço durante o processo de furação para escalas micro e macro. Observa-se que em ambas escalas de furação, a força de avanço se apresenta de forma muito semelhante: i) sofre um rápido crescimento quando a ferramenta engaja na peça; ii) tem uma região estável de corte; iii) diminui devido a eclosão do furo; e iv) retorno da ferramenta. Ressalta-se que a força alcançada em macrofuração é muito superior à força de micro, porque a ferramenta, e consequentemente a largura e área de corte, são maiores. Contudo, o comportamento da força de avanço na região estável de corte apresenta algumas diferenças entre as escalas.

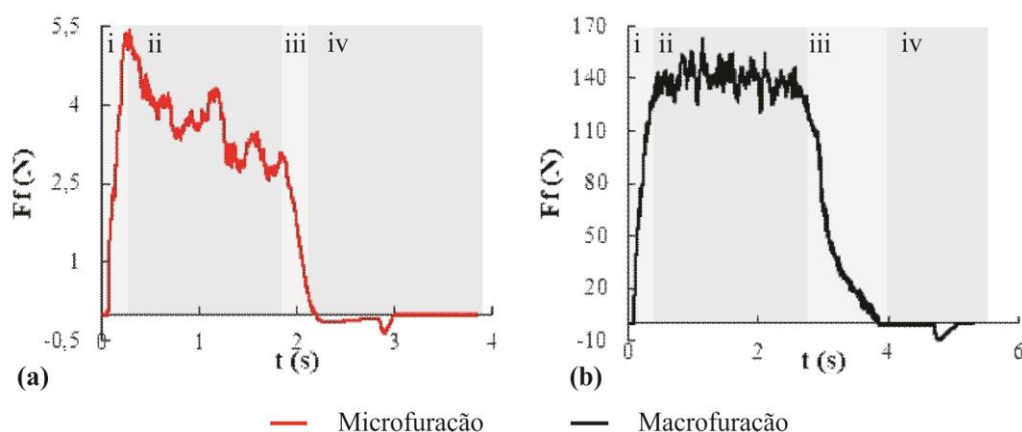


Figura 1. Comportamento da força de avanço (a) microfuração: $n = 10000$ rpm, $h/r_e = 2,27$; (b) macrofuração: $n = 1000$ rpm, $h/r_e = 4,31$.

Considerando a região de corte estável (ii em Fig. 1), na escala macrométrica a força se mantém praticamente constante, mesmo apresentando algumas oscilações sutis, com variações em torno de 20 % da força máxima de avanço (média da região estável de corte). Já na escala micro, a oscilação da força de avanço nesta região é grande, em torno de 60 % da força máxima de avanço. Essas oscilações em microescala são provenientes das propriedades distintas entre a matriz e o reforço, quando a ferramenta corta uma região com predominância de alguma das duas fases. Esse comportamento se mantém em todas as outras condições de furação.

A Figura 2 apresenta o gráfico de força máxima de avanço (F_f) em função da razão da espessura de corte com o raio de aresta (h/r_e) para as duas escalas de furação. Observa-se que o avanço (ou a razão h/r_e) e a escala de corte são fatores significativos em F_f , o que é comprovado pela análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%, apresentada na Tab. 3. Além disso, nas condições de corte utilizadas, a velocidade de corte não exerceu influência estatística sobre F_f , conforme comprovado pela ANOVA ($0,697 > 0,05$, Tab. 3). O comportamento de aumento da F_f com aumento da razão h/r_e é similar para ambas escalas. Entretanto, os valores de F_f são superiores na escala macro a uma proporção bem superior a razão do aumento dos diâmetros, o que indica que exista uma razão de proporcionalidade relativa a homogeneidade do corte entre as escalas.

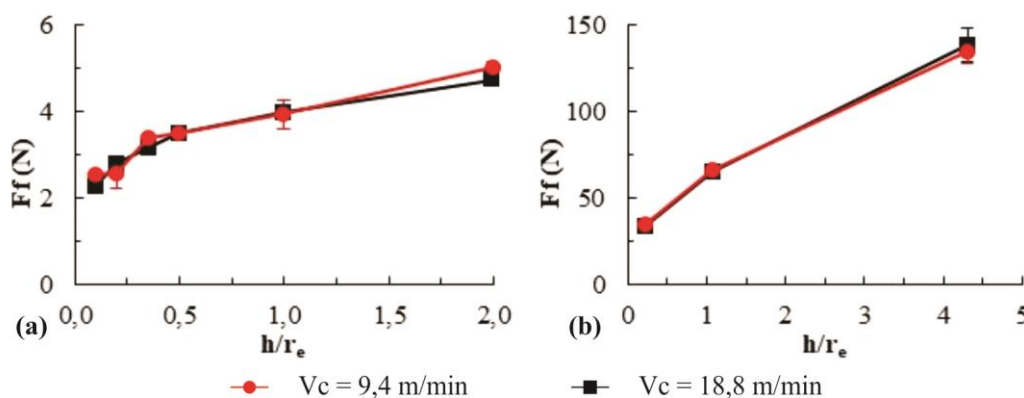


Figura 2. Força máxima de avanço (F_f) para (a) microfuração e (b) macrofuração em função de h/r_e .

Tabela 3. Análise de variância (ANOVA) da força de avanço. (GL: graus de liberdade; SQ: soma dos quadrados; QM: quadrado médio). $R^2_{ajustado} = 0,9996$.

Fator	GL	SQ	QM	Teste-F	Teste-P
Velocidade de Corte (Vc)	1	0,1	0,14	0,16	0,697
Avanço (f)	7	10955,7	1565,10	1788,90	0,000
Escala	1	918,3	918,32	1049,63	0,000
Error	8	7,0	0,87		
Total	17	33600,4			

A Figura 3 mostra que gráfico de energia específica de usinagem (u) em função da razão h/r_e é mais acentuado para os experimentos de microfuração do que na escala macro, mesmo considerando o raio de aresta da broca convencional. O gráfico pode ser dividido em três regiões distintas: i) $h/r_e > 1$: u é praticamente estável para ambas escalas, contudo, em microfuração a energia é superior a macrofuração; ii) $1 < h/r_e < 0,5$: para a microfuração u tem um leve aumento ao diminuir a espessura de corte, enquanto que, para a macrofuração, u se mantém estável; e iii) $h/r_e < 0,5$: para microfuração u apresenta um grande aumento com a diminuição de h , já para a macrofuração u apresenta um aumento bastante sutil.

Uma das razões para a diferença da energia específica entre as escalas de furação é a maior influência da aresta transversal na microfuração, observada pelo deslocamento entre as curvas, sobretudo, na região (i) ($h/r_e > 1$). Na macrofuração a razão entre a aresta transversal e o diâmetro da ferramenta (w/D) é 0,8%, enquanto, na microfuração w/D sobe para 27,5%. Isso significa que, na microfuração uma maior parcela da energia de usinagem é gasta para deformar o material que se encontra abaixo da aresta transversal, o que não é utilizado efetivamente no corte.

Outro fator de influência no comportamento da curva de energia específica é a anisotropia do material em uma dada escala de trabalho. Considerando o parâmetro coeficiente de homogeneidade da usinagem do material compósito (H_c) como:

$$H_c = \frac{D}{2e_c \tan \kappa} \quad (2)$$

onde D é o diâmetro da broca, κ é metade do ângulo de ponta da broca e e_c é a espessura média da camada do compósito, válido para brocas com ângulo de ponta constante. A Figura 4 apresenta um esquema dos parâmetros para o cálculo de H_c . Este parâmetro é a razão entre a altura da ponta da broca pela espessura média da camada do compósito. Isto significa que H_c é uma medida média de quantas camadas estão participando no corte em um dado instante. Quanto maior H_c , mais homogêneo é o corte, então há uma melhor distribuição de força e calor ao longo de uma grande seção do compósito.

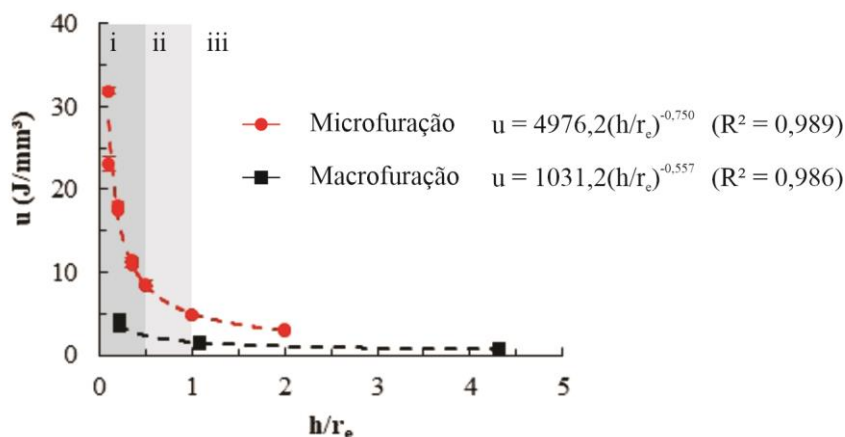


Figura 3. Energia específica de usinagem para micro e macrofuração em função de h/r_c .

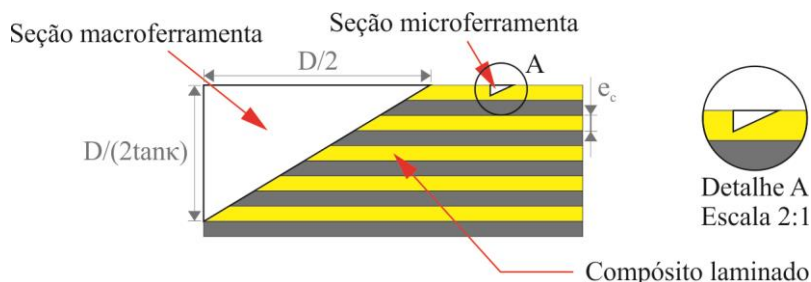


Figura 4. Parâmetros para o cálculo de H_c e comparação entre micro e macrofuração.

Para o par ferramenta/material utilizado neste trabalho o coeficiente de homogeneidade do compósito é de 9 para a macrofuração e de 0,7 para a microfuração. Em outras palavras, na média durante o estado estável de corte, são cortadas nove camadas simultâneas em macrofuração e na microfuração apenas 70% de uma única camada é cortada em um avanço. Isso indica que na microfuração há uma grande chance de que em determinados instantes sejam cortadas apenas matriz ou fibras. Além disso, a espessura de corte em alguns casos é menor que o diâmetro de uma única fibra de carbono (Tab. 2) dificultando o corte e aumentando o desgaste prematuro da ferramenta, uma vez que a fibra de carbono é resistente e abrasiva. Em macrofuração a área de corte é mais homogênea e as espessuras de corte são maiores.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foram investigados os efeitos do baixo velocidade de avanço em furação de material compósito laminado na força de avanço e energia específica de usinagem. Realizou-se experimentos de micro e macrofuração e avaliou-se os efeitos no avanço e energia específica de usinagem. A força de avanço mantém o comportamento em micro e macroescala, em ambas a força de avanço cresce com o aumento do avanço e independe da velocidade de corte. A energia específica sofre um aumento elevado quando se diminui o avanço apenas para microfuração. O coeficiente de homogeneidade em furação de compósito laminado indica que o corte em micro é heterogêneo e que em macrofuração o corte tende a passa a ser mais homogêneo, propiciando uma melhor distribuição da força e calor gerado ao longo de mais camadas do compósito.

6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

7. REFERÊNCIAS

- Ahmad, J., 2009. "Conventional Machining of FRPs". In: *Machining of Polymer Composites*. Springer, Boston: p. 143–236.
- Basso, I.F., 2017. "Microfuração de compósito de matriz termoplástica reforçado com fibra de carbono". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Batista, M.F., Roger, A.R., Basso, I.F., Toti, F.A. e Tarpani, J.R., 2017. "Method for assessing hole damages in composite materials". In: 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – 9º COBEF. Joinville, Brasil.
- Chen, W.C., 1997. "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 37, n. 8, p. 1097–1108.
- Dipaolo, G., Kapoor, S. G. e Devor, R. E., 1996. "An Experimental Investigation of the Crack Growth Phenomenon for Drilling of Fiber-Reinforced Composite Materials". *Journal of Engineering for Industry*, v. 118, n. 1, p. 104–110.
- Hocheng, H. e Dharan, C.K.H., 1990. "Delamination During Drilling in Composite Laminates". *Journal of Engineering for Industry*, v. 112, n. 3, p. 236–239.
- Hocheng, H. e Tsao, C., 2003. "Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits". *Journal of Materials Processing Technology*, v. 140, n. 1–3, p. 335–339.
- Hocheng, H. e Tsao, C., 2006. "Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 12–13, p. 1403–1416.
- Khashaba, U., 2012. "Drilling of polymer matrix composites: A review". *Journal of Composite Materials*, v. 47, n. 15, p. 1817–1832.
- Liu, D., Tang, Y. e Cong, W.L., 2012. "A review of mechanical drilling for composite laminates." *Composite Structures*, v.94, n.4, p. 1265–1279
- Rigatti, A.M.Y., Assis, C.L.F., Coelho, R.T., Jasinevicius, R.G., Rodrigues, A.R., 2013. "Computational Method for Calculation of the Specific Cutting Energy". In: 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013). Ribeirão Preto, Brasil.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Composite Drilling with Low Feed Rates

Igor Basso

Marcelo Ferreira Batista

Renato Goulart Jasinevicius

Alessandro Roger Rodrigues

University of São Paulo (USP) at São Carlos School of Engineering, 400 Trabalhador São-carlense Avenue, 13566-590, São Carlos, Brazil

igorbasso@usp.br, mfb@usp.br, renatogj@sc.usp.br, roger@sc.usp.br

Abstract. The purpose of these paper is evaluated the effects of the low feed rates in carbon fibre reinforced polymers (CFRP) drilling. Tests were conducted with 0,6 and 6,0 mm diameter drills. Thrust force and specific energy were evaluated. The behavior of the thrust force was similar in both micro and macro drilling, presenting our showing an increasing with the feed rate increase. The specific energy increase with the feed rate decreasing for micro drilling. A coefficient of homogeneity in drilling of composites was introduced for measure how many layers belong to the cutting area.

Keywords: CFRP, Composite, Drilling, Micro drilling, Size effect.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.