

EFEITO DE ESCALA EM MICROFURAÇÃO DE COMPÓSITOS

Igor Fernando Basso, igorbasso@usp.br¹
Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br¹
Marcelo Ferreira Batista, mfb@usp.br²

¹Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense 400, São Carlos SP 13.566-590, Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Rua Dr. Aldo Benedito Pierre 250, Araraquara, SP 14801-600, Brasil

Resumo: O objetivo deste artigo é avaliar os esforços de corte e o efeito de escala em microfuração de compósitos. Os corpos de prova foram fabricados em compósito matriz termoplástica de sulfeto de polifenileno (PPS) reforçado com fibra de carbono T300, na proporção de 50% em volume. Os microfuros foram realizados com uma microbroca de 0,6 mm de diâmetro, variando-se dois níveis de velocidade de corte e seis de avanços. Os ensaios foram monitorados com o minidinamômetro de 3 componentes Kistler 9256C2. O efeito de escala fica evidente no comportamento da força de avanço, torque e forças específicas quando a espessura não deformada do cavaco é menor que o raio de aresta da ferramenta. Uma mudança no mecanismo de remoção do material para espessuras de cavaco inferiores a 50% do raio de aresta sugere que exista o fenômeno de mínima espessura de corte (h_{min}), mesmo em materiais heterogêneos.

Palavras-chave: compósito, efeito de escala, microfuração.

1. INTRODUÇÃO

A microfuração apresenta diversos efeitos sobre a redução de escala do processo como ocorre em outros processos de microusinagem. Dentre esses efeitos podem ser citados as mudanças no mecanismo de corte devido a pequena razão entre a espessura de corte e o raio de aresta da ferramenta, o aumento não linear da força específica de usinagem e desgaste excessivo da ferramenta (Cheng e Huo, 2013; Klocke et al, 2009). Além disto, na microfuração a diminuição da escala traz outros efeitos. Um deles é a dificuldade de formação de cavaco devido ao aumento da razão entre o comprimento da aresta transversal e o diâmetro da broca com a diminuição do diâmetro. Vibração, batimento radial, erros de forma e de posição são efeitos consequentes da falta de rigidez da máquina e do sistema de fixação, das elevadas rotações e da alta razão de aspecto das microbrocas (Cheng e Huo, 2013).

As vantagens da microfuração são a alta taxa de remoção de cavaco, comparada a outros processos não mecânicos em microescala, e a grande gama de materiais que podem ser microfurados (Hyacinth Suganthi et al, 2015). Dentre as diversas aplicações podem ser citadas a microfuração de aços de altas resistências para fabricação de bico injetor de combustível (Hyacinth Suganthi et al, 2015), microfuração de placa de circuito impresso para montagens de circuitos eletrônicos (Shi et al, 2011; Zheng et al, 2013) e microfuração de compósitos poliméricos reforçados com fibra (do inglês, *fiber reinforced polymer* – FRP) de uso aeronáutico para alterar o escoamento de ar através de fuselagens (Missing e Kloker, 2008). Compósitos polímeros podem ser isotrópicos e homogêneos, entretanto na escala de microfuração devem ser considerados anisotrópicos e heterogêneos (Daniel e Ishai, 2006), devido a largura do feixe de fibras e a espessura das camadas serem maiores que o diâmetro das microbrocas. Assim, dependendo da posição da ferramenta ela cortará apenas fibra ou matriz.

Diversos pesquisadores estudaram a microfuração de FRP com foco em desgaste (Inoue et al, 1997; Ogawa et al, 2012, 2015), qualidade dos microfuros (Inoue et al, 1997; Ogawa et al, 2012; Rahamathullah e Shunmugam, 2012; Shunmugesh e Panneerselvam, 2016) e esforços de furação (Anand et al, 2014; Rahmathullah e Shunmugam, 2011, 2012). Rahamathullah e Shunmugam (2011) avaliaram experimentalmente o comportamento da força de avanço e torque na microfuração de epóxi reforçado com fibra de vidro para três estratégias de furação: direta cega, intermitente (*peck cycle*) cega e intermitente passante. Em outro trabalho, Rahamathullah e Shunmugam (2012) avaliaram a qualidade dos microfuros e esforços de microfuração em epóxi reforçado com fibra de carbono. Nos dois trabalhos os autores obtiveram modelos experimentais para a força de avanço e torque, mas não levaram em consideração o efeito do raio de aresta da ferramenta e tão pouco avaliaram a força específica de corte.

Modelos mecanísticos para obtenção da força de avanço em microfuração de FRP foram desenvolvidos por Anand e Patra (2016), e Rahamathullah e Shunmugam (2014). Ambos trabalhos modelaram a ferramenta com conceitos de corte ortogonal e oblíquo para as arestas transversal e principal, respectivamente. Rahamathullah e Shunmugam (2014) ainda acrescentaram uma terceira região chamada de zona de indentação, que consiste na região central da aresta transversal onde não há corte. A diferença entre os trabalhos está na modelagem do material, Rahamathullah e Shunmugam (2014) utilizam o modelo de Johnson-Cook, enquanto Anand e Patra (2016) utilizam o modelo de Kienzle para obter as forças nas duas fases do compósito. Neste último caso foi necessário realizar experimentos para obtenção das constantes do modelo.

Até o momento, somente Anand et al (2014) estudaram experimentalmente o efeito de escala em microfuração de FRP com matriz epóxi, realizando microfuros com brocas de 1 mm de diâmetro e obtendo forças específicas de avanço e radiais nas direções x e y. Como resultado, os autores observaram um aumento não linear nas forças específicas em todas as direções com a diminuição da razão entre a espessura de corte e o raio de aresta da microbroca. Este aumento foi atribuído ao efeito de escala que contribuiu para a mudança no mecanismo de corte.

Embora exista um número significativo de trabalhos sobre microfuração de FRP, nenhum dos autores utilizou compósito com matriz termoplástica. Além disso, o efeito de escala deve ser melhor investigado na microfuração de FRP, com uma avaliação da força específica de avanço e de corte. Portanto, este artigo propõe avaliar o efeito de escala na microfuração de compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibra de carbono.

2. METODOLOGIA

2.1. Detalhes Experimentais

O material dos corpos de prova é o compósito de matriz termoplástica sulfeto de polifenileno (PPS) reforçado com fibra de carbono T300 JB. Possui 50% (em volume) de fibra, empilhamento $[(0^\circ/90^\circ), (+45^\circ/-45^\circ)_2, (0^\circ/90^\circ)]$ e aproximadamente 1,7 mm de espessura. Os microfuros foram realizados com uma microbroca de carboneto de tungstênio da marca Seco Tools, código SD26-0.60-3.60-3R1, com 0,6 mm de diâmetro. O diâmetro e os raios das arestas principais e transversais da ferramenta foram medidos com o microscópio 3D Olympus OL4100.

Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem Romi Discovery D600, com 15 kW de potência e rotação máxima de 10.000 rpm. O minidinamômetro de três componentes Kistler 9256C2 foi utilizado para monitorar a força de avanço e o torque durante os ensaios. A aquisição do sinal foi realizada com um condicionador de sinais Kistler 5019B, com a placa de aquisição National Instruments NI USB-6216 e o software LabView®, a uma taxa de aquisição de 30 kHz. O pós-processamento dos sinais foi realizado no software Matlab®.

Foram testadas duas velocidades de corte e seis avanços, com duas repetições em cada condição. A Tabela (1) apresenta as rotações e avanços utilizados, algumas propriedades do compósito e dados geométricos da ferramenta. A Figura (1) apresenta um esquema de montagem experimental, detalhes geométricos dos corpos de prova e da ferramenta.

Tabela 1. Dados Experimentais.

Propriedades do compósito	
E (GPa)	46,2
σ_R (MPa)	762,0
ε (%)	1,7
Parâmetros da ferramenta	
$D_{Nominal}$ (mm)	0,600
D_{Medido} (mm)	0,605
$r_{e,principal}$ (μm)	$2,276 \pm 0,270$
$r_{e,transversal}$ (μm)	$6,234 \pm 0,707$
2κ ($^\circ$)	130
δ ($^\circ$)	30
Condições de usinagem	
N (rpm)	5000; 10000
f ($\mu m/rev$)	0,5; 1,0; 1,75; 2,5; 5,0; 10,0

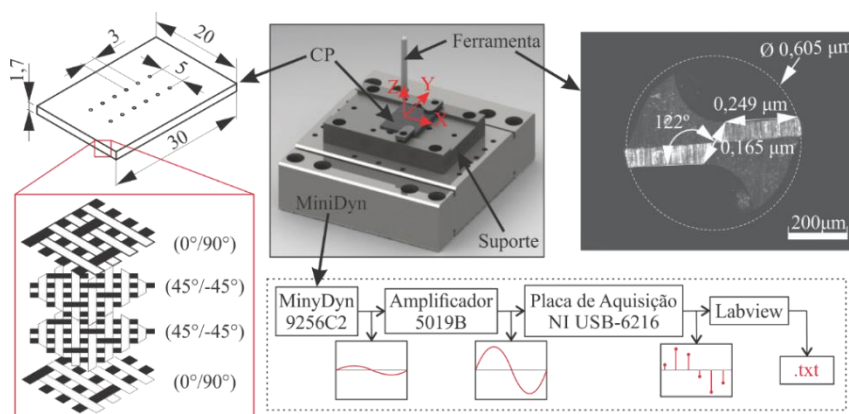


Figura 1. Esquema de montagem experimental.

2.2. Modelo de Força

O modelo de força de corte de Kienzle *apud* Daar (1967) foi ajustado para calcular as forças de microfuração no compósito PPS/C. A força de avanço, em Newtons (N), e o torque em Newtons-milímetro (Nmm), podem ser obtidos respectivamente por:

$$F_Z = K_{N,1} D h^{1-y} \quad (1)$$

$$M_Z = K_{S,1} D^2 h^{1-z} / 4 \sin \kappa \quad (2)$$

onde $K_{N,1}$ é a força específica na direção do avanço, $K_{S,1}$ é a força específica na direção de corte, D é o diâmetro da broca (mm), h é a espessura não deformada do cavaco (μm), κ é o ângulo de posição, y e z são constantes experimentais.

As constantes $K_{N,1}$, $K_{S,1}$, y e z foram obtidos a partir dos dados experimentais por regressão linear do gráfico logaritmo de F_Z e M_Z em função de h . Então as equações para cálculo de força de avanço e torque podem ser reescritas, respectivamente, como:

$$F_Z = 5,479 D h^{0,246} \quad (R^2 = 0,989) \quad (3)$$

$$M_Z = 12,520 D^2 h^{0,071} / 4 \sin(\kappa) \quad (R^2 = 0,699) \quad (4)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras (2a) e (2b) apresentam gráficos de força de avanço e torque, respectivamente, em função da razão entre a espessura de corte e o raio da aresta principal (h/r_e). É possível observar que o modelo de Kienzle teve um bom ajuste para a força de avanço. A análise de variância (ANOVA) com 95% de confiança e a correlação de Pearson apresentados na Tab. (2) confirmam que a força de avanço é fortemente influenciada pelo avanço. Contudo a velocidade de corte apresenta uma correlação linear fraca com a força de avanço.

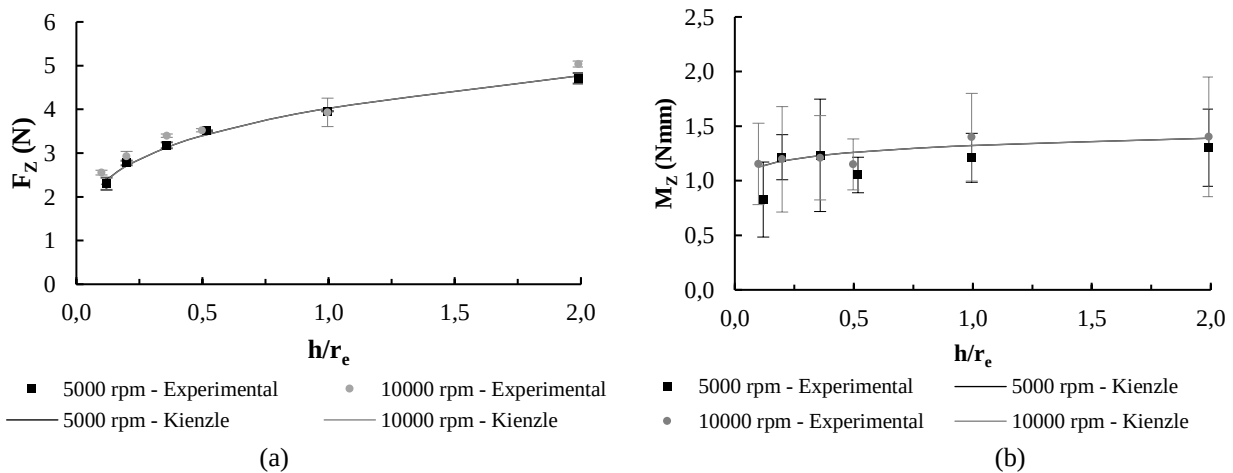


Figura 2. Gráficos experimentais e do modelo ajustado de Kienzle para: (a) força de avanço e (b) torque.

Por outro lado, torque não teve um bom ajuste com o modelo de Kienzle, observado no coeficiente de ajuste (R^2) na Eq. (4) e na grande dispersão dos resultados experimentais na Fig. (2b). A ANOVA da Tab. (2) mostra que tanto o avanço quanto a rotação não exercem influência sobre o torque. A Correlação de Person mostra uma correlação linear desprezível entre o torque e a rotação e uma correlação linear fraca entre a torque e o avanço.

A literatura mostra que em furação de FRP o torque é pouco influenciado pela rotação, mas cresce com o aumento do avanço (Chen, 1997). Neste trabalho, devido a escala reduzida da furação, deve-se considerar o material heterogêneo e anisotrópico no plano de trabalho. Além disto, dependendo da posição do furo a ferramenta pode encontrar uma região mais rica em reforço ou matriz, refletindo-se em um torque maior ou menor. Então, com uma dispersão elevada não foi possível obter as boas correlações entre o torque e as condições de corte. Como o torque atua no plano de trabalho é sensível a uma pequena mudança na propriedade do material sendo cortado. A força de avanço não é tão sensível com o torque à heterogeneidade do material, pois, no sentido de avanço este compósito tem um comportamento mais homogêneo.

Pela análise dos valores experimentais, a força de avanço apresenta uma indicação de mudança de comportamento próximo ao ponto $h/r_e = 0,5$. Para espessuras de corte menores que 50% do raio de aresta, há uma maior taxa de

crescimento da força de avanço. Para espessuras maiores, a taxa de crescimento da força de avanço é menor. Este ponto pode indicar que materiais compósitos também apresentam mínima espessura de corte.

Tabela 2. ANOVA e Correlação de Pearson para F_z e M_z .

Fator	GL	SQ Aj	QM Aj	F	P	CCP
F_z						
N	1	0,149	0,149	9,52	0,007	0,099
f	5	14,810	2,962	189,32	0,000	0,949
Erro	17	0,266	0,015			
Total	23	15,225				
M_z						
N	1	0,075	0,075	0,73	0,406	0,185
f	5	0,352	0,070	0,68	0,642	0,309
Erro	17	1,752	0,103			
Total	23	2,179				

gl: graus de liberdade; SQ Aj: soma dos quadrados ajustados; QM Aj: quadrado médio ajustado; F: teste F; P: probabilidade; CCP: coeficiente de correlação de Pearson.

No microfresamento de metais, espessuras de corte menores que o raio de aresta da ferramenta tornam o ângulo de saída efetivo da ferramenta negativo e, consequentemente, o ângulo de cisalhamento pequeno. Então, há grande deformação do material, onde parte dele é arrancado e o restante sofre retorno elástico, o que é conhecido como efeito *ploughing* (Cheng et al, 2013). Este efeito é atrelado a um crescimento não linear na força específica de corte. Em microfuração de epóxi reforçado com fibra de carbono, Anad et al (2014) observaram o efeito de escala no aumento expressivo da força específica de avanço e relataram que pode ocorrer o efeito *ploughing* durante o corte da matriz.

As Figuras (3a) e (3b) apresentam os gráficos de força específica de avanço e de corte, respectivamente, em função da razão entre a espessura não deformada do cavaco e o raio de aresta (h/r_e). É observado um crescimento não linear das forças específicas com a diminuição do avanço, mais acentuado para espessuras de corte menores que, aproximadamente, 50% do raio de aresta.

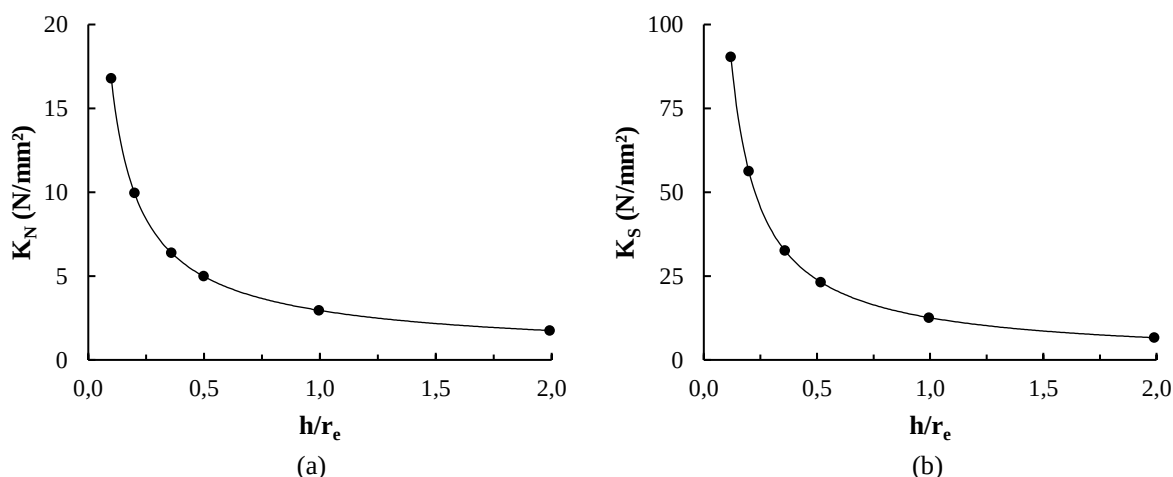


Figura 3. Gráficos de força específica: (a) normal; (b) de corte.

Para avanços muito pequenos ($< 50\%$ de r_e), o movimento de avanço deforma a matriz no sentido axial da ferramenta até o instante que a espessura de corte começa a aumentar e o corte pode ocorrer efetivamente, o que explica o aumento nas forças específicas. A força específica de avanço cresce porque o movimento de avanço deforma todo o volume de matriz que se encontra logo abaixo da broca. Quanto menor o avanço, maior é a compressão da matriz, até que a espessura mínima de corte seja atingida. São necessários alguns avanços até que o material possa atingir a espessura mínima de corte e o cavaco se forme normalmente, o que aumenta a força específica de corte. Este fenômeno é intensificado porque a diminuição da espessura de corte a valores menores que o raio de aresta torna o ângulo de saída efetivo da broca negativo.

Oliveira et al (2015) relatam que no microfresamento de metais a mínima espessura de corte, ou seja, a transição de um corte com efeito *ploughing* para um corte com formação de cavaco por cisalhamento, ocorre em espessuras de corte

de aproximadamente 30% do raio de aresta da ferramenta. Na microfuração de termoplástico reforçado com fibra de carbono, ocorre fenômeno semelhante, onde a mínima espessura de corte é, aproximadamente, 50% do raio de aresta. Isto se dá porque o termoplástico tem maior plasticidade que os metais, ou seja, permite uma maior deformação plástica antes da sua ruptura. Esta maior plasticidade aumenta a espessura mínima para a formação do cavaco.

4. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos experimentalmente e os modelos da literatura, foi avaliado o efeito de escala em microfuração de FRP com matriz termoplástica. As principais conclusões são:

- A não correlação entre o torque e as condições de corte indicam que nesta escala o material é anisotrópico e heterogêneo no plano de trabalho;
- O efeito de escala é percebido também no aumento hiperproporcional das forças específicas, principalmente para razões entre espessura não deformada do cavaco e raio de aresta menores que 0,5;
- A mudança no comportamento da força de avanço leva a crer que exista um fenômeno de mínima espessura de corte em materiais compósitos de matriz termoplásticas, mas essa afirmação requer uma investigação mais detalhada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Seco Tools e aos professores Dr. José Ricardo Tarpani e Me. Francisco Toti pelo fornecimento de suprimentos para a pesquisa; a Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio financeiro e bolsa de estudo.

6. REFERÊNCIAS

- Anand, R.S., Patra, K., 2017, "Mechanistic cutting force modelling for micro-drilling of CFRP composite laminates", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 16, pp. 55-63.
- Anand, R.S., Patra, K., Steiner, M., 2014, "Size effects in micro drilling of carbon fiber reinforced plastic composite", *Production Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 301-307.
- 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*, Vol. 37, No. 8, pp. 1097-1108.
- Cheng, K., Huo, D., 2013, "Micro-Cutting", John Wiley & Sons Ltd, 2013.
- Daar, H.L.A., 1967, "Uma Contribuição Ao Conhecimento do Processo de Furação dos Aços com Brocas Helicoidais", Escola de Engenharia de São Carlos.
- Daniel, I., Ishai, O., 2006, "Engineering Mechanics of Composite Materials", Oxford University Press, 2006.
- De Oliveira, F.B., et al, 2015, "Size effect and minimum chip thickness in micromilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 89, pp. 39-54.
- Hyacinth Suganthi, X., Natarajan, U., Ramasubbu, N., 2015, "A review of accuracy enhancement in microdrilling operations", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, No. 1-4, pp. 199-217.
- Inoue, H. et al, 1997, "Influence of tool wear on internal damage in small diameter drilling in GFRP", *Composite Structures*, Vol. 39, No. 1, pp. 55-62.
- Klocke, F., Gerschwiler, K., Abouridouane, M., 2009, "Size effects of micro drilling in steel", *Production Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 69-72.
- Missing, R., Klocker, M., 2008, "Smart suction - An advanced concept for laminar flow control of three-dimensional boundary layers", In: Resch, M. et al. (Eds.), *High Performance Computing on Vector Systems*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, pp. 53-60.
- Ogawa, K. et al, 2012, "Micro-Drilling of CFRP Plates Using a High-Speed Spindle", *Key Engineering Materials*, Vol. 523-524, pp. 1035-1040.
- Ogawa, K. et al, 2015, "Effects of diamondcoated tools in micro-drilling of CFRP plates using a high-speed spindle" *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 1, No. 1-2, pp. 192-200.
- Rahamathullah, I., Shunmugam, M., 2012, "Analyses of forces and hole quality in micro-drilling of carbon fabric laminate composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 47, No. 9, pp. 1129-1140.
- Rahmathullah, I., Shunmugam, M.S., 2011, "Thrust and torque analyses for different strategies adapted in microdrilling of glass-fibre-reinforced plastic", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225, No. 4, pp. 505-519.
- Rahamathullah, I., Shunmugam, M.S., 2014, "Mechanistic approach for prediction of forces in micro-drilling of plain and glass-reinforced epoxy sheets", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, No. 5-8, pp. 1177-1187.
- Shi, H., Song, F., Fu, L., 2011, "Experimental study on drilling force in printed circuit board micro drilling process", *Circuit World*, Vol. 37, No. 1, pp. 24-29.

- Shunmugesh, K., Panneerselvam, K., 2016, "Optimization of Process Parameters in Micro-drilling of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Using Taguchi and Grey Relational Analysis", Polymers & Polymer Composites, Vol. 24, No. 7, pp. 499-507.
- Zheng, X. et al., 2013, "Experimental investigation of microdrilling of printed circuit board", Circuit World, Vol. 39, No. 2, pp. 82-94.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SIZE EFFECT IN COMPOSITES MICRODRILLING

Igor Fernando Basso, igorbasso@usp.br¹
Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br¹
Marcelo Ferreira Batista, mfb@usp.br²

¹University of São Paulo (USP) at São Carlos School of Engineering (EESC), 400 Trabalhador São-Carlense Avenur, São Carlos SP 16.566-590, Brazil

²São Paulo Federal Institute of Education, Science and Technology, 250 Dr. Aldo Benedito Pierre St., Araraquara, SP 14801-600, Brazil

Abstract: This paper determines the size effect and drilling forces in micro-holes of thermoplastic composite with polyphenylene sulfide (PPS) matrix reinforced with carbon fiber T300 at 50% volume. Micro-holes were drilled with 0.6 mm diameter microdrill, two cutting speed and six feed rate levels. Kistler 9256C2 3-component dynamometer was used for force measurement. When the chip uncut thickness is less than 50% of the tool's edge radius, the size effect arises from thrust force, torque and specific forces. Thus, this material removal mechanism suggests there is a minimum uncut thickness (h_{min}) when drilling composites materials at microscale.

Keywords: composites, microdrilling, size effect.