

ESTUDO COMPARATIVO DE GEOMETRIAS DE FERRAMENTAS PARA FURAÇÃO DE PLACAS DE FIBRA DE CARBONO

Marcelo Ferreira Batista

Igor Basso

Alessandro Roger Rodrigues

Ricardo Arai

Escola de Eng. de São Carlos – Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense 400, São Carlos, 13566-590, Brasil
igorbasso@usp.br, mfb@usp.br, roger@sc.usp.br, Ricardo.arai@gmail.com

Resumo. Existe uma grande propensão ao aparecimento de danos durante o processo de furação de componentes em fibra de carbono que podem levar a rejeição do componente ou requerer retrabalhos. Neste estudo avaliou-se os resultados de danos utilizando-se duas ferramentas (brocas) com ângulo de ponta, raio de aresta e diâmetro da aresta transversal distintos. Foram conduzidas furações em dois diferentes compostos reforçados com fibra de carbono. Os resultados obtidos indicam que a geometria da ferramenta tem influência significativa no resultado da qualidade, seguido pela velocidade de avanço da ferramenta. Além disso, os mecanismos formação de danos são distintos entre a entrada e a saída dos furos, assim como os materiais estudados.

Palavras chave: Fibra de Carbono. Geometria da Ferramenta. Danos.

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono (CFRP) possuem, devido a sua constituição, elevada resistência mecânica, rigidez e grande capacidade de amortecimento (DANIEL; ISHAY, 2006; SRIDHARAN, 2008). Entretanto essas características atrativas dos CFRPs são fatores que dificultam a realização de uma furação livre de danos. A característica laminar, a forma de disposição da fibra na matriz, o tipo do entrelaçamento e empilhamento, a proporção de fibra/matriz, o tipo de reforço e da matriz e o processo de moldagem e de cura do material influenciam na usinabilidade e formação de danos (BONNET et al., 2015; DAVIM, 2015; ENEYEW e RAMULU, 2014; LISSEK et al., 2016). Mesmo para arranjo laminares quase-isotrópicos, a sequência das últimas camadas é predominante na formação de danos como delaminação, trincas, fibras não cortadas e rebarbas (GAUGEL et al., 2016).

Os componentes geométricos de corte das ferramentas têm efeitos na formação do cavaco e severidade dos esforços. Segundo Chen (1997), o aumento do ângulo de ponta (σ) incrementa a força de avanço e o torque. O incremento do ângulo de hélice (δ), que está relacionado ao ângulo de saída (α) da broca, leva a uma ligeira redução da força de avanço e do torque. O aumento do ângulo de saída da aresta transversal reduz a força de avanço por que decrementa o comprimento da aresta transversal (região de extrusão). Por último, o incremento da largura das arestas de corte leva ao aumento do torque e da força de avanço devido ao aumento do comprimento da aresta transversal. As observações de Chen (1997) também foram verificadas experimentalmente por Aurich et al. (2014); estes concluíram que o incremento do ângulo de ponta tem forte influência na elevação da força de avanço, devido a maior pressão exercida em um número menor de camadas. Aurich et al. (2014) avaliaram experimentalmente que o ângulo de folga (γ) influenciou na ocorrência de fibras não cortadas. Ângulos de folga muito pequenos favorecem ao atrito e impõem maior pressão. Abrão et al. (2008) compararam brocas helicoidais de diferentes ângulos de ponta. Dentre as brocas helicoidais, a de maior ângulo de ponta ($\sigma = 150^\circ$) demonstraram maior força de avanço mas obtiveram melhores resultados de delaminação. Assim, apesar do aumento da delaminação, dano mais predominante na furação de CPRFs, estar diretamente relacionada com o aumento do avanço e força de avanço, a intensidade do dano é mais dependente da geometria da broca (ABRÃO et al., 2008; DURÃO et al., 2010). Assim, este estudo avaliou a interrelação de componentes geométricos de duas ferramentas com os parâmetros de furação e acrescentou ainda, uma comparação dos efeitos da furação em um tradicional CFRP com matriz termorígida com um CFRP de matriz termoplástica.

2. METODOLOGIA

Foram realizados ensaios de furação no centro de usinagem Discovery-ROMI D800. Foram medidos a força de avanço (Fz) e o torque (Mt) com um dinamômetro marca Kistler mod. 9272-4. Um amplificador de sinais de 4 canais da marca Kistler mod. 5019 foi utilizado para amplificar os sinais do dinamômetro. Os sinais foram digitalizados e condicionados com placa National Instruments modelo BNC 2110 e software Labview 7.1™. Foi adotada uma taxa de aquisição de 5 kHz para evitar fenômeno de *aliasing* e atender o critério de Nyquist. Os sinais de força e torque foram pósprocessados

no *software* Matlab 2014a™ (V 8.3.0.532). Para análise dos danos foi utilizado o microscópio ótico marca Carl Zeiss modelo Axiotech; as imagens obtidas foram exportadas para o *software* Autocad® para medição dos danos. Para medição do raio de aresta (r_e) das ferramentas foi utilizado o microscópio 3D da marca Olympus OLS4100.

As ferramentas avaliadas foram duas brocas, ambas com 6 mm de diâmetro e 2 arestas. A ferramenta denominada “A” é uma broca helicoidal com dois ângulos de ponta, de metal duro com cobertura de diamante policristalino. A ferramenta denominada “B” é uma broca helicoidal tipo N (DIN 388) de metal duro sem cobertura e com um único ângulo de ponta. Os dados geométricos das ferramentas estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados geométricos das ferramentas.

ferramenta	A	B
σ - ângulo ponta [°]	130 / 60	118
re - raio de aresta principal [μ m]	46 / 29	12
δ - ângulo de hélice [°]	30	30
diâmetro aresta transv. [mm]	0,115	0,727
re_t - raio aresta transv. [μ m]	42,54	22,41

As furações foram avaliadas em dois materiais distintos, ambos com 5mm de espessura. O primeiro foi o PPS-C (laminado Poli-Sulfeto de Fenileno-Carbono) formado por resina termoplástica PPS reforçada com fibras de carbono T300 JB, fração volumétrica de fibras de 50%, empilhamento [(0/90),(+45/-45)₂,(0/90)]. O segundo foi o laminado Epóxi-Carbono (EPX-C), constituído por resina termorrígida epóxi, fortalecida com fibras contínuas de carbono AGP193, fração volumétrica de fibras entre 50 e 65%, arranjo básico [(0/90),(+45/-45)₂,(0/90)], consolidados em autoclave, por intermédio de bolsa de vácuo, em temperatura próxima de 180 °C.

A Tabela 2 apresenta a matriz experimental utilizada. Cada condição foi executada tres vezes. Foi realizada Análise de Variância (ANOVA) para os resultados de danos objetivando determinar os efeitos e significâncias dos fatores de controle e interações de 2ª ordem com índice de confiança de 95%. O *software* Statistica™ (12) foi utilizado para realizar a ANOVA fatorial (variáveis múltiplas). A normalidade e os resíduos de todos os dados foram verificados e os resultados obtidos foram distribuídos de forma independente e uniforme e, não apresentaram erro sistemático.

Tabela 2 - Matriz experimental.

Fatores de controle	Níveis	Fatores de resposta
vc [m/min]	30; 60	G_{dam} – dano global []
f [μ m/rev]	45; 90; 180; 360	Fz - Força de avanço [N]
Material da peça	PPS-C; EPX-C	Mt -Torque [N.cm]
Ferramenta (geometria)	A e B;	

Para avaliação dos danos foi utilizado o modelo Dano Global (G_{dam}), procedimento detalhadamente descrito em Batista et al (2017). Suscintamente o G_{dam} consiste em uma medida que avalia os danos em dois vetores ou grupos. Um grupo denominado ASdam engloba danos que afetam requisitos de montagem: Fibras Não Cortadas, Rebarbas e Curvamento. A medida é feita pelo tamanho do arco no perímetro do furo. O segundo grupo denominado STdam se refere a danos estruturais, isto é, que afetam a integridade estrutural do componente: Trincas e Delaminação. A medida destes são suas extensões a partir da borda. Os danos estão respectivamente mostrados nas Fig. 1a à Fig. 1e, as linhas amarelas indicam a extensão medida [mm]. Assim, o Dano Global é uma soma dos Danos de Montagem (ASdam) e Danos Estruturais (STdam).

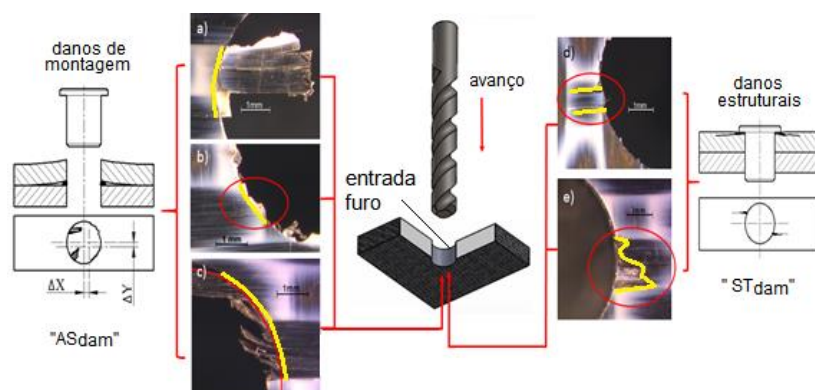
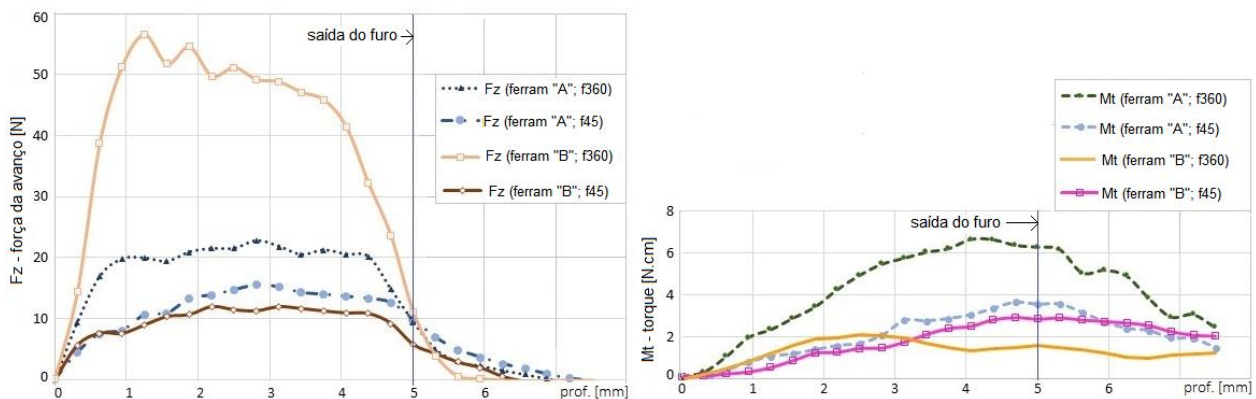


Figura 1. Tipos de Danos a) Fibras Não Cortadas, b) Rebarbas, c) Curvamento, d) Trincas, e) Delaminação. (Adaptado de Batista et al, 2017)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

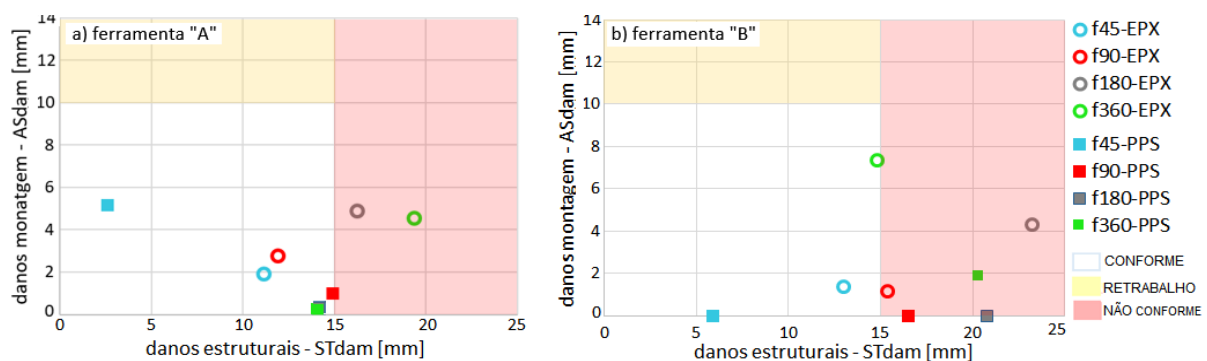
A Fig. 02 apresenta os gráficos de força de avanço e de torque na furação com $v_c=60\text{m/min}$ no material PPS, comparando a ferramenta “A” de ângulo de ponta duplo ($\sigma = 130^\circ/60^\circ$ e $r_e = 46 \mu\text{m} / 29 \mu\text{m}$) e a ferramenta “B” ($\sigma = 118^\circ$ e $r_e = 12 \mu\text{m}$). Para o avanço $f = 360\mu\text{m/rev}$ a ferramenta “B” obteve força máxima de avanço de 56 N contra 23 N da ferramenta “A”, que é alcançado logo nas camadas iniciais (1mm), devido a maior dimensão da aresta transversal da ferramenta “B” que nesta taxa de avanço atua como um indentador. Isto, na entrada dos furos impôs uma maior formação de danos (Fig. 05c), principalmente do grupo dano estrutural-ST_{dam}, apresentados na Fig. 03b. Além disso, menores ângulo de ponta, como o do 2º ângulo de ponta da ferramenta “A” reduz significativamente a força de avanço segundo Aurich et al. (2014). Para o avanço $f = 45\mu\text{m/rev}$ a ferramenta “B” apresentou força de avanço ligeiramente inferior ao da ferramenta “A” (15N contra 12N), em especial no região da saída da ferramenta do furo. Isto levou a menores valores de danos estruturais-ST_{dam} na saída (Fig. 04) e menores valores de dano global-G_{dam} (Fig. 05d).

Para o torque máximo, na região da saída do furo, utilizando $f=360\mu\text{m/rev}$, a ferramenta “B” apresentou valores aproximadamente três vezes menores ao da ferramenta “A”, devido ao menor raio de aresta, que promove um cisalhamento mais efetivo na formação do cavaco, reduzindo o torque. Ainda, a geometria com dois ângulos de ponta da ferramenta “A”, além da maior aresta de corte, tem ângulo médio resultante de 95° , menor que o da ferramenta “B” (118°), que resulta em um ângulo de saída médio também menor e consequente maior torque. Tanto a força de avanço quanto os torques apresentados na Fig. 02 estão relacionados com os danos estruturais e de montagem, mostrados nas Fig. 03 e Fig. 04. Isto sugere que deva existir uma combinação de elementos geométricos (comprimento da aresta transversal, raio de aresta e ângulo de ponta) que minimizem ambos esforços.

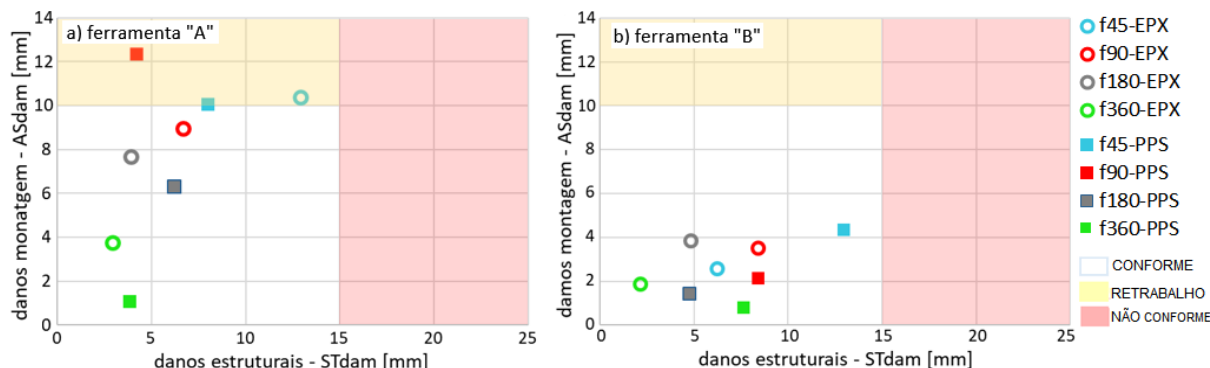


As Figs. 03 e 04 apresentam a comparação entre as ferramentas, respectivamente na entrada e saída dos furos, utilizando o modelo de danos proposto por Batista et al (2017). A área em vermelho ilustra a região de reprovação devido a danos estruturais severos, em cor amarela a região com danos de montagem, mas passíveis de retrabalho. A região em branco os furos aprovados. Os valores dos limites de cada área de danos tem caráter ilustrativo. Como na análise de variância a velocidade de corte não apresentou significância, os resultados apresentados são para $v_c=60 \text{ m/min}$.

A comparação entre as ferramentas na entrada dos furos é mostrada na Fig. 03a e Fig 03b. Para danos estruturais-ST_{dam} a ferramenta “A” apresentou, em geral, resultados ligeiramente melhores devido a menor deformação dada pela menor dimensão da aresta transversal. Inversamente para danos de montagem-AS_{dam}, a ferramenta “B” apresentou, em geral, melhores resultados, devido ao menor raio de aresta (r_e), que promoveu um cisalhamento mais efetivo dos feixes de reforço.



A Fig. 04a e Fig. 04b mostram a comparação entre as ferramentas na saída dos furos. A ferramenta “B” apresentou melhores resultados para danos de montagem devido a menor raio de aresta que promoveu um corte mais efetivo de fibras e menor formação de rebarbas na saída. Ambas ferramentas tiveram resultados similares para danos estruturais, com o material PPS-C com melhores resultados devido a melhor tenacidade da matriz.



Conforme a análise de variância para os danos globais-Gdam na entrada dos furos, os fatores significativos ($p < 0,05$) foram o “avanço”, o “material” e a interação entre “ferramentas e o avanço”, apresentados respectivamente nas Fig. 05a à Fig. 05c. Observando-se o gráfico de efeitos da Fig. 05a nota-se que o aumento do avanço leva a um aumento dos danos, sendo este efeito para ambas ferramentas e, com a ferramenta “B” impondo ligeiramente mais danos a partir de $f=90\mu\text{m/rev}$ (Fig. 05c). Como já mencionado, isto é devido a indentação dada pela maior aresta transversal. Na entrada do furo as camadas subsequentes funcionam como suporte e assim quanto maior o avanço maior o impacto que é distribuído e propaga trincas no material. O material PPS-C amortece o impacto da entrada da ponta da ferramenta, i. é. da aresta transversal, reduzindo a iniciação de danos, quando comparado com o material EPX-C (Fig. 05b). Para saída dos furos o único fator significativos ($p < 0,05$) foi a ferramenta. A Fig. 5d apresenta o gráfico de efeito para o fator ferramenta sendo que a geometria “B” leva a menores resultados de danos devido a menor raio de aresta, que promove melhor cisalhamento das fibras, dado o menor torque apresentado na Fig. 02. Por outro lado a ferramenta “A” tem maior 1º ângulo de ponta (130°) o que promove maior pressão sobre as camadas finais, levando a separação interlaminar nas ultimas camadas, na saída da ferramenta, segundo Aurich et al (2014).

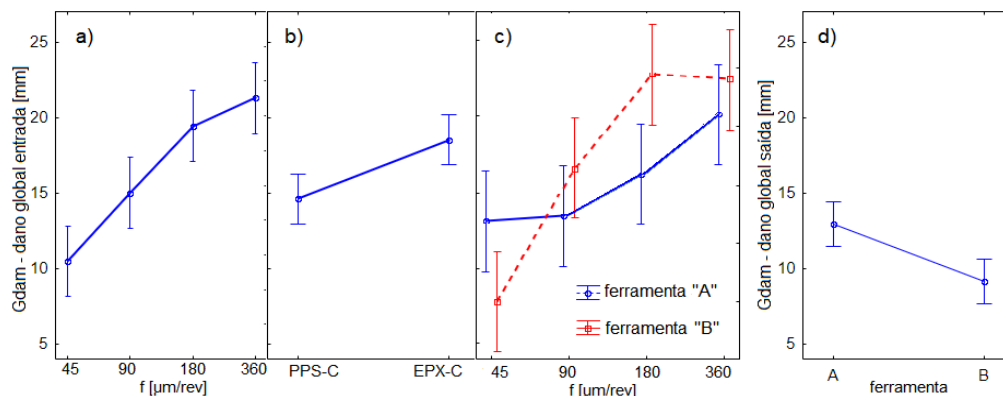


Figura 05 – Gráficos dos efeitos significativos sobre Gdam: a) avanço na entrada, b) material na entrada, c) ferramenta Vs geometria na entrada, d) ferramenta na saída dos furos.

4. CONCLUSÕES

A geometria da ferramenta (r_e , σ , aresta transv.) tem influencia significativa nos danos, seguido pelo avanço. A velocidade de corte não apresentou significância em nenhuma das análises de variância. Na entrada dos furos o ângulo de ponta menor reduziu danos estruturais como a delaminação e trincas, maiores arestas transversais aumentam a deformação e consequentemente os danos. Na saída dos furos, menores raios de aresta promovem um melhor cisalhamento e reduzem danos de montagem; maior ângulo de ponta leva a maior separação interlaminar. Os materiais tem comportamento similar mas com intensidade de formação de danos ligeiramente menor para o termoplastico PPS-C. O modelo de apresentação da danos de forma vetorial agrupando os danos por caracterisiticas funcionais serve para um entendimento melhor dos resultados.

5. REFERÊNCIAS

- Abrão, A. M.; Campos Rubio, J.C.; P.E. Faria, P. E.; Davim, J. P. “The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite”. *Materials&Design*, v.29, p.508–513, 2008.
- Aurich, J. C.; Kirsch, B.; Muller, C.; Heberger, L. “Quality of Drilled and Milled Rivet Holes in Carbon Fiber Reinforced Plastics”. *Procedia CIRP*, v. 24, p. 56-61, 2014.
- Batista, M. F.; Rodrigues, A.R.; Basso, I. F.; Toti, F. A.; Oliveira, F.B, 2017. Method for assessing hole damages in composites materials. *In Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF2017*. Joinville, Brasil. doi://10.26678/ABCM.COBEF2017.COF2017-0521
- Bonnet, C.; Poulachon, G.; Rech, J.; Girard, Y.; Costes, J. P. “CFRP drilling: fundamental study of local feed force and consequences on hole exit damage”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 94, p. 57–64, 2015.
- Chen, W-C. “Some Experimental Investigations in the Drilling of Carbon Fiber-Reinforced Plastic (CFRP) Composite Laminates”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 37, n. 8, p. 1097–1108, 1997.
- Daniel, I. M.; Ishai O. *Engineering mechanics of composite materials*. New York: Oxford University Press, 2006, 463 p.
- Davim, J. P. *Machinability of Fibre-Reinforced Plastics*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH, 2015, 195 p.
- Durão, L. M. P.; Gonçalves, J. S. D.; Tavares, J. M. R. S.; Albuquerque, V. H. C.; Vieira, A. A; Marques A. T. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates”. *Composite Structures*, v. 92, n.7, p.1545–1550, 2010.
- Eneyew, E. D.; Ramulu, M. “Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites”. *Journal of Material Research and Technology*, v. 3 p. 354-362, 2014.
- Gaugel, S.; Sripathy, P.; Haeger, A.; Meinhard, D.; Bernthaler, T.; Lissek, F.; Kaufeld, M.; Knoblauch, V.; Schneider, G. “A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)”. *Composite Structures*, v. 155, p. 173-183, 2016.
- Lissek, F.; Tegas, J.; Kaufeld, M. “Damage quantification for the machining of CFRP: An introduction about characteristic values considering shape and orientation of drilling-induced delamination”. *Procedia Engineering*, v. 149, n. June, p. 2–16, 2016.
- Sridharan, S. *Delamination behaviour of composites*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008, 720p.

4. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

COMPARATIVE STUDY OF TOOL GEOMETRIES FOR DRILLING CARBON FIBER PLATES

Marcelo Ferreira Batista

Igor Basso

Alessandro Roger Rodrigues

Ricardo Arai

Escola de Eng. de São Carlos – Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense 400, São Carlos, 13566-590, Brasil
igorbasso@usp.br, mfb@usp.br, roger@sc.usp.br, ricardo.arai@gmail.com

Abstract. During the drilling of the carbon fiber components there is a high tendency for damage appearance, that can lead to component rejection or rework. In this study, the results of damages were evaluated using two tools (drills) with two different edge angles, edge radii and the chisel edge diameters. Drilling were conducted in two different materials. The results indicate that the tool geometry has a significant influence on the quality result, followed by the feedrate. In addition, the damage formation mechanisms are distinct between the entry and exit of the holes, as well as the materials studied.

Keywords: Carbon fibre. Tool geometry. Damage.

RESPONSIBILITY NOTICE

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