

DISPOSITIVO PARA APLICAÇÃO DO AR COMPRIMIDO REFRIGERADO NA FURAÇÃO DE FRP

Lourenço Rad Miranda, lou.radmiranda@gmail.com
Cristiano Devitte, cristiano.devitte1@gmail.com
André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC),
Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), Porto Alegre, RS.

Resumo. *Polímeros reforçados por fibras (FRP) são materiais compósitos constantemente aplicados na indústria aeronáutica e naval por apresentarem alta resistência mecânica e baixo peso específico. Entretanto, o processo de furação de FRP é desafiador, pois tende a provocar danos subsuperficiais e imperfeições geométricas na entrada, na parede e, principalmente, na saída do furo. Visando minimizar esses problemas, a investigação de novas geometrias de brocas e estratégias de arrefecimento para o processo de furação torna-se essencial. Assim, o desenvolvimento de um dispositivo que forneça concomitantemente múltiplas opções de direcionamento de ar comprimido refrigerado durante a furação de FRP pode diminuir erros neste processo. Além de realizar a fixação do corpo de prova na máquina ferramenta, o dispositivo proposto suporta mangueiras pneumáticas direcionadas para a entrada e para a saída do furo. Esta configuração tem como objetivo principal promover a estabilização da temperatura do ar comprimido refrigerado para diminuir a oscilação durante o processo de furação. De maneira geral, a instalação do dispositivo e a aplicação do ar comprimido refrigerado demonstrou efetividade, facilitando a aplicação tanto na entrada quanto na saída das placas de FRP, e promovendo a estabilidade da temperatura em diferentes pressões de aplicação.*

Palavras chave: *Furação de FRP, Ar comprimido refrigerado, Delaminação.*

Abstract. *Fiber-reinforced polymers (FRP) are composite materials constantly applied in the aeronautical industry due to their high mechanical strength and low specific weight. However, the FRP drilling process is challenging, as it tends to cause subsurface damage and geometric imperfections at the entrance, wall, and, mainly, exit of the hole. In order to minimize these problems, the investigation of new drill bit geometries and cooling strategies for the drilling process becomes essential. Thus, developing a device that provides multiple options for directing cooled compressed air concurrently during FRP drilling can reduce errors in this process. In addition to fixing the workpiece in the machine tool, the proposed device supports pneumatic hoses directed to the inlet and outlet of the hole. This configuration has as main objective to promote the stabilization of the temperature of the cooled compressed air to reduce the oscillation during the drilling process. In general, the installation of the device and application of the cooled compressed air displayed effectiveness, facilitating the application both at the inlet and at the outlet of the CFRP and GFRP plates, and promoting temperature stability at different application pressures.*

Keywords: *FRP drilling, Compressed air-cooling, Delamination.*

1. INTRODUÇÃO

Os materiais poliméricos reforçados com fibra de carbono (CFRP – *carbon-fiber-reinforced polymer*) e fibra de vidro (GFRP – *glass-fiber-reinforced polymer*) representam uma parte crescente da aplicação aeroespacial. Eles reduzem o peso e aumentam a eficiência do combustível, sendo fáceis de manusear, projetar, moldar e reparar. Os componentes compósitos pré-formados não são apenas leves e fortes, eles reduzem o número de fixadores e juntas pesadas (que são possíveis pontos de falha) dentro da aeronave. Ao fazê-lo, os compósitos ajudam a impulsionar uma tendência de menos componentes em toda a indústria aeroespacial. Estes materiais são utilizados com frequência em conjunto com ligas metálicas, como as de alumínio (Al) e titânio (Ti) devido a desejáveis relações força-peso quando estão dispostos como juntas híbridas (Zitoune et al., 2010; Brinksmeier e Janssen, 2002).

No entanto, a usinagem de polímeros reforçados com fibras (FRP – *fiber-reinforced polymers*) apresenta vários desafios, pois são formados por materiais com diferentes resistências e distintas propriedades físicas e mecânicas. Os defeitos associados à furação desses materiais podem ser classificados de acordo com posição de ocorrência: na entrada do furo – pelo descolamento do laminado, ou na parede do duro – ao rasgar fibras e degradação da resina e na saída do

furo – pela delaminação (Zitoune et al., 2012; Koëinig et al., 1985). Esses defeitos afetam drasticamente as placas que sofrem o processo de furação. A delaminação e a precisão dimensional são parâmetros para a avaliação da qualidade dos furos e têm influência direta na qualidade da montagem de estruturas, tendo influência no desempenho mecânico das peças (Zitoune et al., 2012; Meshreki et al., 2016).

Sabe-se que a temperatura de corte pode afetar as propriedades do material, aumentando danos como descolamento e arrancamento de fibras (Akay, 1993). Além disso, quando são atingidos valores acima da temperatura de transição vítrea (cerca de 120 °C), superfícies irregulares podem ser geradas pelo polímero amolecido e fibras de carbono (Ha et al., 2017), e o aumento de temperaturas durante o processo de furação causa redução de rigidez da matriz, podendo resultar em delaminação (Ben et al., 2012).

Visando minimizar esses problemas, a investigação de estratégias de arrefecimento para o processo torna-se essencial: Xu et al. (2019, 2020a, 2020b) estudaram o uso de MQL na furação de CFRP/Al e CRRP/Ti e obtiveram resultados satisfatórios na morfologia da superfície usinada e precisão dimensional. Entretanto, pela tendência de absorção do fluido de corte pelo compósito e consequente falha na formação do filme de óleo, observaram elevados valores de delaminação, bem como Meshreki et al., 2016, que avaliaram o desempenho de MQL na furação de CFRP/Al.

Pervais et al., 2020, compararam MQL, ar comprimido refrigerado e fluido em abundância na furação de CFRP, observando má performance da estratégia MQL e fluido em abundância, possivelmente associada ao corte subsuperficial e ao já mencionado fluxo de fluido de corte para as cavidades do compósito. Foi encontrada delaminação relativamente similar na entrada do furo para todas as estratégias de arrefecimento, porém ar comprimido refrigerado foi a única estratégia que não apresentou arrancamento de fibras, além de apresentar o melhor resultado de delaminação na saída do furo. Hoffmann et al. (2021) observaram redução de delaminação na entrada do furo com utilização de ar comprimido refrigerado em comparação com usinagem a seco. Entretanto, na saída do furo não foi observado resultado significativo.

Diante deste escopo, o presente trabalho consiste em apresentar o desenvolvimento de um dispositivo que forneça concomitantemente múltiplas opções de direcionamento de ar comprimido refrigerado durante a furação de FRP, através de mangueiras pneumáticas direcionadas para a entrada e para a saída do furo, para estabilizar a temperatura na entrada e na saída da broca durante o processo de furação, reduzindo oscilações e tornando-a mais constante durante os procedimentos experimentais.

2. METODOLOGIA

O dispositivo foi desenvolvido e instalado sobre o dinamômetro piezolétrico estacionário Kistler 9272 com finalidade de fixar corpos de prova em formato de tiras (130 mm x 20 mm x 9 mm). Além disto, mangueiras de 8 mm foram utilizadas para aplicação do ar comprimido (seja na entrada ou na saída dos furos).

Baseado nas dimensões do corpo de prova, do dinamômetro e na localização de suas roscas, foram elaboradas duas propostas de projeto, com diferentes conceitos. As propostas são compostas por dois elementos. Uma base, projetada para ser posicionada sobre o dinamômetro, responsável pelo alojamento do corpo de prova e um canal para o arrefecimento na saída do furo. Outra peça, posicionada sobre a base do dispositivo, responsável pelo posicionamento das mangueiras pneumáticas e fixação do corpo de prova.

- **Opção 1:** Dispositivo composto por uma base para fixação do corpo de prova e canal inferior e uma espécie de "coroa" no topo, composta por quatro "torres", com canais inclinados em 30° onde as mangueiras são fixadas e dispostas para a entrada do furo (Fig. 1a).
- **Opção 2:** Dispositivo formado por um conjunto de cantoneiras de diferentes dimensões, formando a estrutura para fixação das mangueiras. As principais vantagens desta opção são a facilidade de confecção, pois não necessita de furos diagonais para alojamento das mangueiras; e possibilidade de variação no ângulo de aplicação do ar comprimido (Fig. 1b).

Após apresentação das propostas e ampla discussão, definiu-se a **Opção 1** como dispositivo a ser desenvolvido, por ser mais robusto e ter possibilidade do uso de quatro fluxos de ar comprimido concomitantes na superfície superior do corpo de prova. Esta proposta foi melhor elaborada e detalhada. Um modelo foi desenvolvido em SolidWorks (Fig. 2a) e o dispositivo foi então fabricado no LAUS-UFRGS, em alumínio.

Tanto a base do dispositivo, que possui 98 mm de diâmetro e 30 mm de altura, quanto o topo do dispositivo, com 60 mm de diâmetro externo e 30 mm de altura foram usinados a partir de tarugos redondos de 4" (101,6 mm) por 37 mm. Para bifurcação das mangueiras e consequente divisão do fluxo de ar comprimido refrigerado para os cinco canais, foram utilizadas conexões pneumáticas de engate rápido união T e Y para tubo de 8 mm. A mangueira pneumática, responsável pela refrigeração da superfície inferior do corpo de prova, foi instalada à base do dispositivo através de uma conexão pneumática reta macho. Após a fabricação, o dispositivo foi montado sobre o dinamômetro no centro de usinagem ROMI Discovery 308, equipado com comando numérico computadorizado Mach 8 para realização de testes iniciais (Fig. 2b).

Os procedimentos ocorreram com a furação de CFRP e GFRP com duas velocidades de corte ($v_c = 220$ m/min e $v_c = 40$ m/min) e duas pressões (5 bar e 6 bar). A avaliação da estabilidade do fluxo de ar comprimido e temperatura mostraram-se fundamentais para a validação do dispositivo. Foram realizados dois lotes de 32 furos, totalizando 64 furos. A verificação da estabilidade foi acompanhada em intervalos constantes de oito furos durante o procedimento de furação.

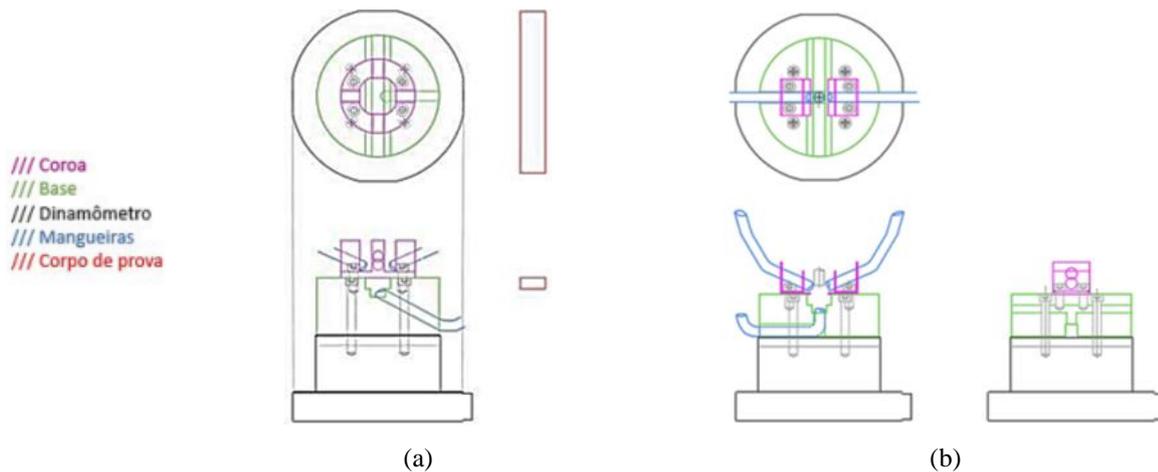


Figura 1. Dispositivo para fixação: (a) Opção 1: base e coroa de fixação das manguueiras; (b) Opção 2: Conjunto de cantoneiras para aplicação e suporte de manguueiras.

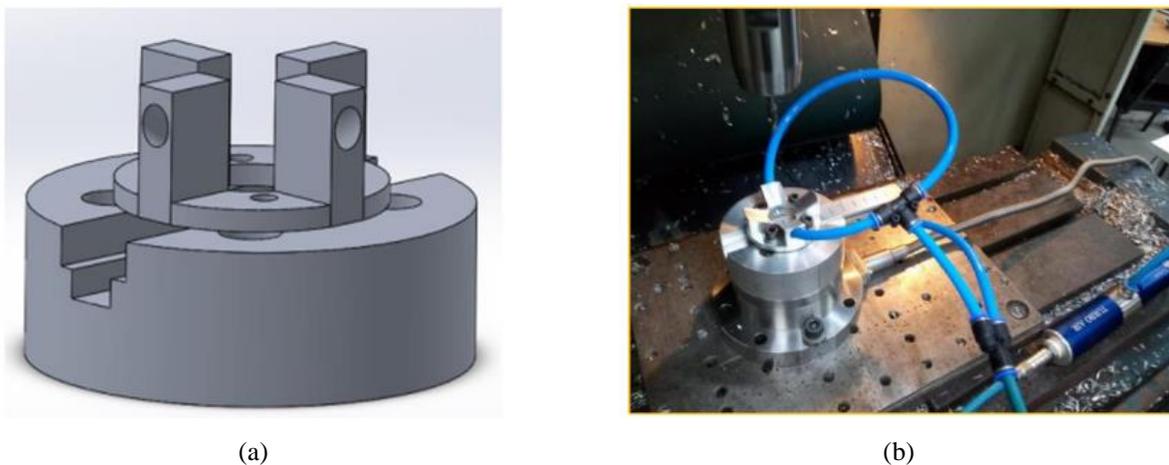


Figura 2. (a) Modelo 3D do dispositivo; (b) Testes iniciais com o dispositivo instalado.

3. RESULTADOS E CONCLUSÃO

De maneira geral, a altura do dispositivo, os ângulos de aplicação do ar comprimido refrigerado, a instalação das manguueiras e dos corpos de prova, e instalação dos estágios do dispositivo indicaram que a aplicação do ar comprimido pelo dispositivo foi bem sucedida. Apenas uma alteração foi elaborada, na qual foram usinados em ângulo os encaixes superiores das manguueiras, para não ocorrer a colisão do mandril com a presilha superior. Não ocorreram colisões durante os procedimentos.

No Lote 1 utilizou-se pressão de 5 bar. A estabilidade de temperatura ($4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) foi verificada após 15 minutos. As medições de temperatura posteriores ocorreram após 2 minutos do fluxo de ar sobre o corpo de prova. Nesta pressão, a média de temperatura manteve-se em 4°C com desvio padrão de $0,12^{\circ}\text{C}$. No Lote 2 foi usado pressão de 6 bar. Após 15 minutos, a temperatura estabilizou-se em $1,8^{\circ}\text{C}$. As medições ocorreram após 2 minutos do fluxo de ar sobre o corpo de prova. Nesta pressão, a média de temperatura manteve-se em $1,9^{\circ}\text{C}$, com desvio padrão de $0,13^{\circ}\text{C}$. Ao longo de cada lote (32 furos) a temperatura apresentou pouca variação ao longo do processo. A Tab. 1 mostra os valores associados ao monitoramento para os lotes 1 e 2.

De forma geral, a pouca variação de temperatura obtida pelos testes de desempenho e funcionalidade do dispositivo contribuem para diminuição dos fatores de ruído, entre eles, a temperatura do ar refrigerado durante o processo de furação. Estes efeitos de instabilidade dos experimentos são fatores que contribuem para aumentar os erros estatísticos e influenciar as avaliações e devem ser constantemente identificados e minimizados (Montgomery, 2017).

A utilização do dispositivo pelo LAUS tem sido adotada em alguns estudos e experimentos, abrindo possibilidade pra avaliação do desempenho dessa nova estratégia de arrefecimento sobre imperfeições geométricas no furo, danos subsuperficiais, avaliação de ferramentas e outros parâmetros de interesse na furação de múltiplos materiais.

Tabela 1. Temperaturas observadas durante o acompanhamento do processo de furação com o dispositivo.

Furo monitorado	Temperatura observada (°C)	
	Lote 1 (pressão 5 bar)	Lote 2 (pressão 6 bar)
1	3,8	1,8
8	4,1	2,1
16	4,0	1,9
24	4,0	1,8
32	4,1	1,8
Média	4,0	1,9
Desvio padrão	0,12	0,13

4. REFERÊNCIAS

- Akay, M., 1993. "Aspects of dynamic mechanical analysis in polymeric composites". *Composites Science and Technology*, Vol. 47, p. 419-423.
- Ben, W., Hang, G., Quan, W. et al., 2012. "Influence of cutting heat on quality of drilling of carbon/epoxy composites". *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 27, No. 9, p. 968-972.
- Brinksmeier, E. e Janssen, R., 2002. "Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminium alloys". *CIRP Annals*, Vol. 51, No. 1, p. 87-90.
- Durão, L.M., Gonçalves, D.J.S., Tavares, J.M.R.S. et al., 2011. "Estudo da delaminação associada à furação de compósitos reforçados com fibra de vidro e de sisal". In *Anais do Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*. Coimbra, Portugal.
- Ha, S.J., Kim, K.B., Yang, J.K. et al., 2017. "Influence of cutting temperature on carbon fiber-reinforced plastic composites in high-speed machining". *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31, No. 4, p. 1861-1867.
- Hoffmann, N., Souza, G.S.C., Souza, A.J. et al., 2021. "Delamination and hole wall roughness evaluation in air-cooled drilling of carbon fiber-reinforced polymer." *Journal of Composite Materials*, Vol. 55, No. 23, p. 3161-3174.
- Koëning, W., Wulf, Ch., Graß, H. et al., 1985. Machining of fibre reinforced plastics. *CIRP Annals*, Vol. 34, No. 2, p. 537-548.
- Mongomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. John Willy & Sons, New Jersey, 9ª edição.
- Meshreki, M., Damir, A., Sadek, A., et at., 2016. "Investigation of drilling of CFRP-aluminium stack under different cooling modes". In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition – IMECE2016*, Phoenix, Arizona, USA.
- Pervaiz, S., Kannan, S., Huo, D. et al., 2020. "Ecofriendly inclined drilling of carbon fiber-reinforced polymers (CFRP)". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 111, p. 2127-2153.
- Rubio, J.C., Abraão, A.M., Faria, P.E. et al., 2008. "Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic; evaluation of the delamination factor". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 6, p. 715-720.
- Xu, J., Ji, M., Chen, M. et al., 2019. "Investigation of minimum quantity lubrication effects in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks". *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 34, No. 12, p. 1401-1410.
- Xu, J., Ji, M., Davim, J.P. et al., 2020a. "Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills". *Composite Structures*, Vol. 234, 111727.
- Xu, J., Ji, M., Chen, M., et al. 2020b. "Experimental investigation on drilling machinability and hole quality of CFRP/Ti6Al4V stacks under different cooling conditions". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 109, p. 1527-1539.
- Zitoun, R., Krishnaraj, V. e Collombet, F. "Study of drilling of composite material and aluminium stack". *Composite Structures*, Vol. 92, No.5, p. 1246-1255.
- Zitoun, R., Krishnaraj, V., Almabouacif, B.S. et al., 2012. "Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminium sandwich". *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 3, p. 1480-1488.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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