

ANÁLISE COMPARATIVA DE FURAÇÃO EM COMPÓSITO REFORÇADO POR FIBRA DE CARBONO UTILIZANDO UMA BROCA HELICOIDAL E UMA FRESA DE TOPO

COBEF2023-0028

Márcio Piecha dos Santos
Everton Luis Fernandes do Amaral
Maikon da Silva Cabral Frank
André João de Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), Rua Sarmento Leite, nº425, Porto Alegre, RS, CEP 90050-170
marcio_piecha@hotmail.com; evertonlfa@gmail.com; maikon_frank@hotmail.com; ajsouza@ufrgs.br

Resumo: A utilização de compósitos reforçados por fibra de carbono (CFRP – carbon fiber reinforced polymer) vem crescendo nos últimos anos. O CFRP é comumente aplicado nos setores automotivo, ferroviário, aeroespacial e naval, em função de suas excelentes propriedades mecânicas. Este material é classificado como de baixa usinabilidade em função da sua elevada resistência à tração e ao cisalhamento, presença de fibras abrasivas e sua natureza anisotrópica. Devido à composição estrutural do CFRP e suas características, a furação é um dos processos de usinagem mais comuns para estabelecer ligações mecânicas deste material à outras estruturas. A qualidade do processo é fundamental para permitir adequada montagem, e seu resultado pode impactar diretamente na integridade estrutural e durabilidade do componente. Dentre os defeitos mais comuns, estão a delaminação e a deformação do furo. Em contrapartida, a seleção adequada da geometria da ferramenta e a otimização de parâmetros de corte permitem reduzir a ocorrência desses defeitos. Sendo assim, este estudo traz um comparativo de resultados, na perfuração de CFRP com refrigeração a ar comprimido utilizando uma broca helicoidal e uma fresa de topo reto. Para tanto, foram utilizados três níveis de rotação (6000, 8000 e 10000 rpm) com avanço fixo (0,05 mm/volta), e foram analisados para cada ferramenta de corte o desvio dimensional, a circularidade e as delaminações na entrada e na saída dos furos, totalizando seis etapas. Para cada etapa, foram executados 11 furos. Os resultados indicaram que para as métricas de desvio dimensional, circularidade e delaminação peel-up, a fresa de topo reto apresentou os melhores resultados para as condições de corte aplicadas, enquanto a broca helicoidal foi melhor para a delaminação push-out. Observou-se que esta delaminação poderia ser reduzida com a redução do avanço da fresa e/ou a sua saída do furo sem bloqueio da placa de apoio. Assim, conclui-se que a maior qualidade do furo é obtida com a fresa de topo a 6000 rpm.

Palavras-chave: CFRP; broca helicoidal; fresa de topo reto; circularidade; delaminação.

1. INTRODUÇÃO

O compósito polimérico com matriz em resina epóxi e reforço em fibras de carbono é um material que confere excelentes propriedades físico-mecânicas ao conjunto, que são melhores quando comparado ao somatório das propriedades individuais de cada material. As notáveis características do CFRP são superiores às da maioria dos metais, o que justifica sua aplicação em diversas áreas da ciência e tecnologia, principalmente no segmento automotivo, ferroviário, aeroespacial e naval. Sendo assim, é comum a aplicação de operações de furação sempre que uniões por elementos de fixação (parafusos, rebites, pinos etc.) com outros tipos de materiais fazem-se necessárias, visto que materiais compósitos não podem ser unidos por processos de soldagem. Dentre as principais propriedades do CFRP destacam-se o baixo coeficiente de dilatação térmica (proporcionando estabilidade dimensional em uma ampla faixa de temperatura), a inércia química e a resistência à corrosão (o que permite sua aplicação em ambientes hostis), e a excelente relação resistência x peso (garantindo durabilidade e eficiência energética em se tratando de consumo de combustível em função do peso) (Davim et al., 2008; Geier et al., 2019; Jiang et al., 2016; Liu et al. 2012; Shyha e Huo, 2021; Zadafiya, et al., 2021). Por outro lado, este material também é classificado como de baixa usinabilidade em função da sua elevada resistência à tração e ao cisalhamento, presença de fibras abrasivas e sua natureza anisotrópica. Com isso, diversos trabalhos já foram desenvolvidos no intuito de investigar estas dificuldades para melhorar os resultados da usinagem em função da tipologia e geometria da ferramenta, efeitos dos meios de arrefecimento durante o processo de furação, otimização dos parâmetros de usinagem (variações na velocidade de corte e no avanço por volta), entre outros aspectos (Geier et al., 2019; Khanna et al., 2020; Qiu et al., 2018; Zadafiya, et al., 2021).

A delaminação é um dano estrutural causado pelo processo de furação no qual ocorre, principalmente, o descolamento das fibras ao redor do furo em uma ou mais camadas. A delaminação ocorre em duas formas mais conhecidas, sendo classificadas como delaminação de entrada (*peel-up*) e delaminação de saída (*push-out*) (Fig. 1). Na ocorrência de *peel-up*, o material tende a ser puxado ao invés de ser cortado; isto ocorre através da força exercida pelo contato da ponta da broca, o que leva as camadas superiores a se desprenderem. A redução do avanço na entrada do furo normalmente minimiza esse defeito. Já o *push-out* é decorrente da força compressiva exercida pela ferramenta durante sua saída do furo, onde as últimas camadas tendem a serem empurradas e separadas das demais (Liu et al., 2012).

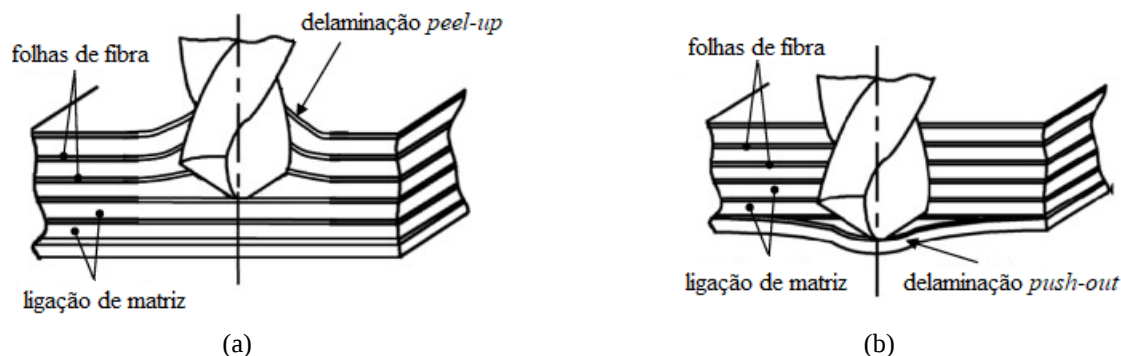


Figura 1. Furação de CFRP: (a) delaminação na entrada; (b) delaminação na saída (Liu et al., 2012).

A seleção adequada da geometria da ferramenta e a otimização dos parâmetros de usinagem reduzem a ocorrência de defeitos apresentados na entrada e saída do furo (Davim et al., 2008; Gaugel et al., 2016; Wang e Jia, 2021). O dano causado durante o processo de furação está fortemente correlacionado com o ângulo de ponta (σ) da ferramenta. Um ângulo σ menor, diminui a força axial gerada no processo, mas tende a apresentar maior incidência de fibras não cortadas na entrada do furo. Ângulos σ maiores tendem a promover cavacos com maior espessura, diminuindo a pressão específica de corte, e consequentemente, reduzindo a delaminação (Rodriguez et al., 2022; Voss et al., 2017; Xu et al., 2022). Segundo Colligan e Ramulu (1992), a delaminação gerada no processo de usinagem também ocorre em função da falta de suporte nas camadas superiores e inferiores do laminado, e ainda pelos desgastes da ferramenta de corte.

Tendo em vista os efeitos conhecidos do avanço da broca sobre a força de avanço e a delaminação, este estudo apresenta resultados comparativos do processo de furação em chapa fina de CFRP utilizando ferramentas de corte com geometrias distintas (broca helicoidal e fresa de topo reto), empregando diferentes rotações e avanço fixo, com o objetivo de avaliar o efeito destes sobre a qualidade da furação. Como variáveis de resposta, serão avaliados o desvio dimensional, a circularidade e as delaminações *peel-up* e *push-out* na sequência de furos realizada com cada ferramenta, de modo a inferir sobre a melhor condição de usinagem para esse processo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma chapa quadrada de compósito polimérico com 240 x 240 mm e 2 mm de espessura foi utilizada como corpo de prova. A matriz utilizada é de resina epóxi e as fibras de carbono são dispostas em camadas com orientação unidirecional. A porção de fibras presente no material corresponde à 60% do volume total da amostra. Para reduzir a flexão causada pela penetração da ferramenta na chapa de CFRP, uma placa inteiriça de náilon foi posicionada abaixo desta de modo a atuar como suporte ao longo de toda superfície da chapa, conforme mostra a Fig. 2a.

A furação foi realizada em uma fresadora CNC Tecnodrill Sigma 600 com comando numérico Siemens Sinumerik 808D. Durante o processo, foi utilizada refrigeração externa por ar comprimido a 0 °C, aplicado de modo que o bico ficasse direcionado às ranhuras da ferramenta, com o intuito de auxiliar na expulsão dos cavacos gerados no entorno da zona de corte, promover a refrigeração da ferramenta e aumentar a qualidade da usinagem.

Foram utilizadas ferramentas inteiriças novas de metal duro Sandvik com revestimento PVD-TiAlN e 6 mm de diâmetro: broca helicoidal CoroDrill® 460 (460.1-0600-018A1-XM) com ângulo de ponta $\sigma = 140^\circ$ e fresa de topo reto CoroMill® Plura (R215.H4-06050BAC03P 1620) com ângulo de hélice $\lambda = 50^\circ$ e quatro arestas de corte.

A experimentação consistiu na perfuração da chapa de CFRP, fixando o avanço por volta ($f = 0,05$ mm/volta) e variando a rotação de cada ferramenta em três níveis: 6000 rpm ($v_f = 300$ mm/min), 8000 rpm ($v_f = 400$ mm/min) e 10000 rpm ($v_f = 500$ mm/min), totalizando seis etapas. Para cada etapa, foram executados 11 furos, cuja disposição está representada na Fig. 2b.

Os desgastes foram verificados nas duas ferramentas ao final da experimentação e os mesmos não foram relevantes a ponto de comprometer os resultados, visto o reduzido comprimento usinado de 66 mm para cada ferramenta.

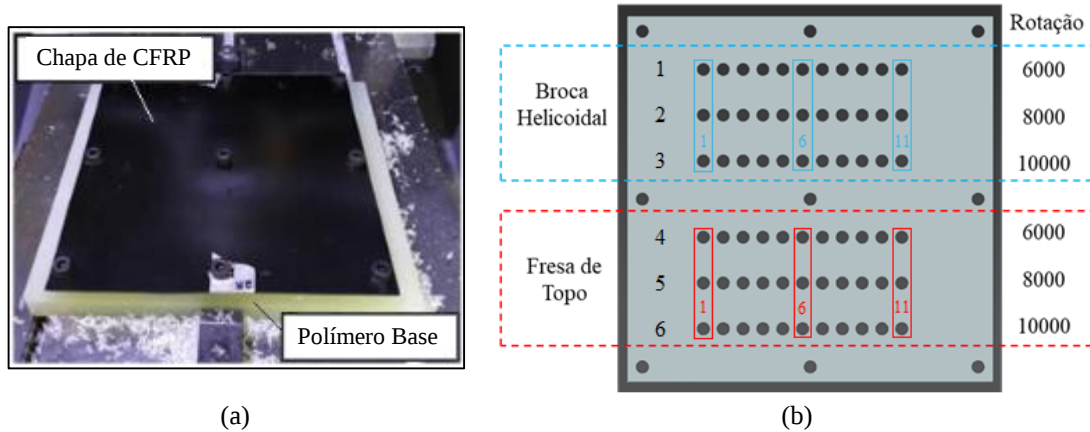


Figura 2. Chapa de CFRP: (a) sistema de fixação; (b) disposição da furação

Para estabilização térmica do material após a perfuração, o corpo de prova foi mantido por um período de aproximadamente 12 h em temperatura de $(20 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ antes de iniciar as medições visando avaliar possíveis variações dimensionais nos furos, na circularidade e na delaminação (entrada e saída).

Na avaliação do desvio dimensional (δ), utilizou-se a máquina de medição por coordenadas (MMC) Zeiss Prismo Ultra com cabeçote Vast Gold (Fig. 3a). A medição foi realizada a 1 mm da face superior da peça através do método de apalpação, em que foram coletados pontos a cada 1 mm. Foi utilizada força de apalpação de 0,1 N e o cálculo do diâmetro através do método de mínimos quadrados.

Para a circularidade (c), compreendida como a distância radial entre dois círculos concêntricos distantes entre si pela zona de tolerância (t), segundo a norma ISO 1101 (2017), a característica foi extraída a partir dos círculos medidos para obtenção dos diâmetros.

Por fim, a avaliação da delaminação na entrada e na saída do furo foi feita baseando-se na Eq. (1) proposta por Chen (1997) com auxílio de um sistema de medição óptico acoplado à MMC (Fig. 3b). Este sistema conta com ampliação de 100 vezes que, através do software Calypso, permite gerar uma sequência de pontos na imagem, de modo que a superfície danificada do furo esteja compreendida em um círculo calculado a partir destes pontos.

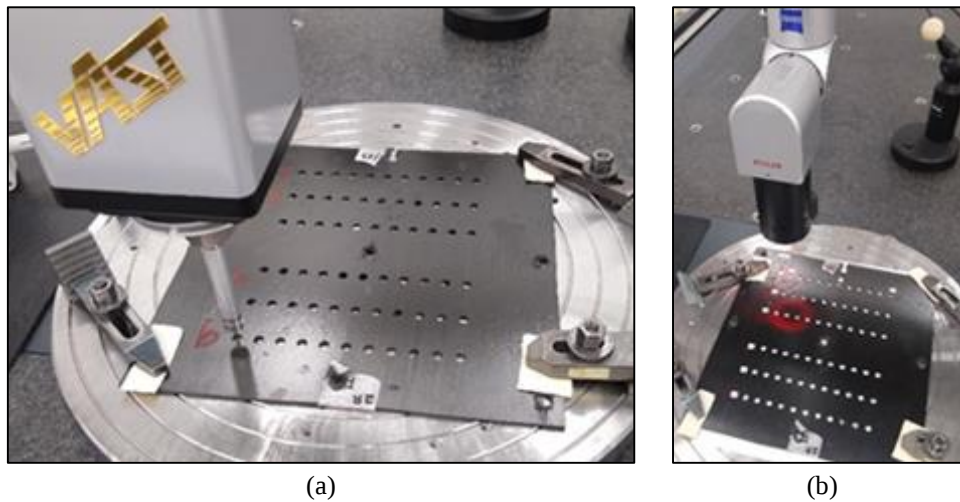


Figura 3. Sistemas de medição: (a) por apalpação; (b) óptico.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_o} \quad (1)$$

Onde F_d é o fator de delaminação, D_{max} é o diâmetro máximo da área delaminada e D_o o diâmetro nominal do furo.

Os resultados para cada variável de resposta correspondem à média de três medições, considerando as mesmas condições de medição. O objetivo é reduzir a representatividade de eventuais erros aleatórios e obter uma maior confiabilidade metrológica durante a medição.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Desvio dimensional (δ) e Circularidade (c)

A Figura 4a apresenta os valores de desvio dimensional (δ) e a Fig. 4b, os valores de circularidade (c) medidos nos furos 1, 6 e 11, gerados na perfuração para as seis etapas realizadas. As incertezas de medição estimadas para as medições do desvio dimensional e para a circularidade são de 1,5 μm para um intervalo de confiança de 95%, calculadas conforme o BIPM JCGM/WG 1 (2008).

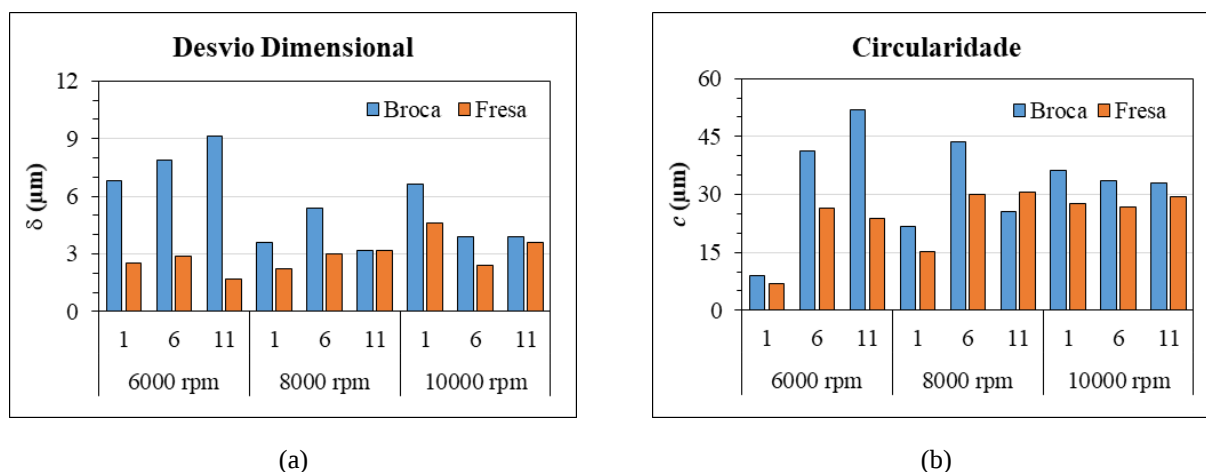


Figura 4. Resultados da medição: (a) desvio dimensional (δ); (b) circularidade (c)

A Tabela 1 apresenta o resultado médio e o desvio-padrão para o desvio dimensional e para a circularidade do furo na perfuração com ambas as ferramentas para as três rotações empregadas.

Tabela 1. Resultados de medição para desvio dimensional e circularidade

Rotação	Desvio Dimensional (δ)		Circularidade (c)	
	Fresa de Topo	Broca Helicoidal	Fresa de Topo	Broca Helicoidal
6000 rpm	(2,4 $\pm$ 0,6) μm	(7,9 $\pm$ 1,2) μm	(19,0 $\pm$ 9,7) μm	(34,0 $\pm$ 21,5) μm
8000 rpm	(2,8 $\pm$ 0,5) μm	(4,1 $\pm$ 1,2) μm	(25,3 $\pm$ 7,7) μm	(30,3 $\pm$ 11,1) μm
10000 rpm	(3,5 $\pm$ 1,1) μm	(4,8 $\pm$ 1,6) μm	(27,9 $\pm$ 1,3) μm	(34,3 $\pm$ 1,7) μm

Nota-se que a furação realizada com a fresa de topo obteve os melhores resultados para as características de desvio dimensional e circularidade em todas as situações avaliadas, o que fica mais evidente com a menor rotação (6000 rpm). Chama a atenção ainda, que os piores resultados com a fresa de topo ainda são melhores que todos os gerados pela broca helicoidal. O fato de a fresa de topo ter apresentado o melhor resultado pode estar associado à geometria da ponta da ferramenta, visto que suas arestas de corte formam um ângulo de aproximadamente 180°, o que induz menor pressão específica de corte, reduzindo a deformação do furo e a delaminação *peel-up* (Rodriguez et al., 2022; Voss et al., 2017; Xu et al., 2022). Em relação à rotação, de acordo com Lin e Chen (1996) e Qiu et al. (2018), uma rotação menor tende a promover o aprimoramento das características da furação, fato notado apenas para a fresa de topo.

3.2. Delaminação na Entrada (F_{de}) e na Saída (F_{ds}) dos Furos

A Figura 5 apresenta um comparativo entre o dano superficial ocorrido durante a furação do CFRP para as duas ferramentas utilizadas, em que a circunferência em vermelho envolve a área máxima de delaminação. Ao analisar o primeiro furo realizado a 6000 rpm, percebe-se um melhor acabamento na entrada do furo para a fresa de topo. Ao avaliar os dados obtidos para a delaminação *push-out*, nota-se que a broca helicoidal obteve um melhor desempenho. Contudo, vale destacar que durante a furação com a broca, a quantidade de fibras não cortadas foi mais alta em relação à perfuração com a fresa de topo, o que caracteriza uma necessidade de retrabalho nesta condição.

A Figura 6a apresenta os resultados para a delaminação na entrada do furo (*peel-up*) e a Fig. 6b, para a delaminação na saída (*push-out*) para a perfuração com ambas as ferramentas.

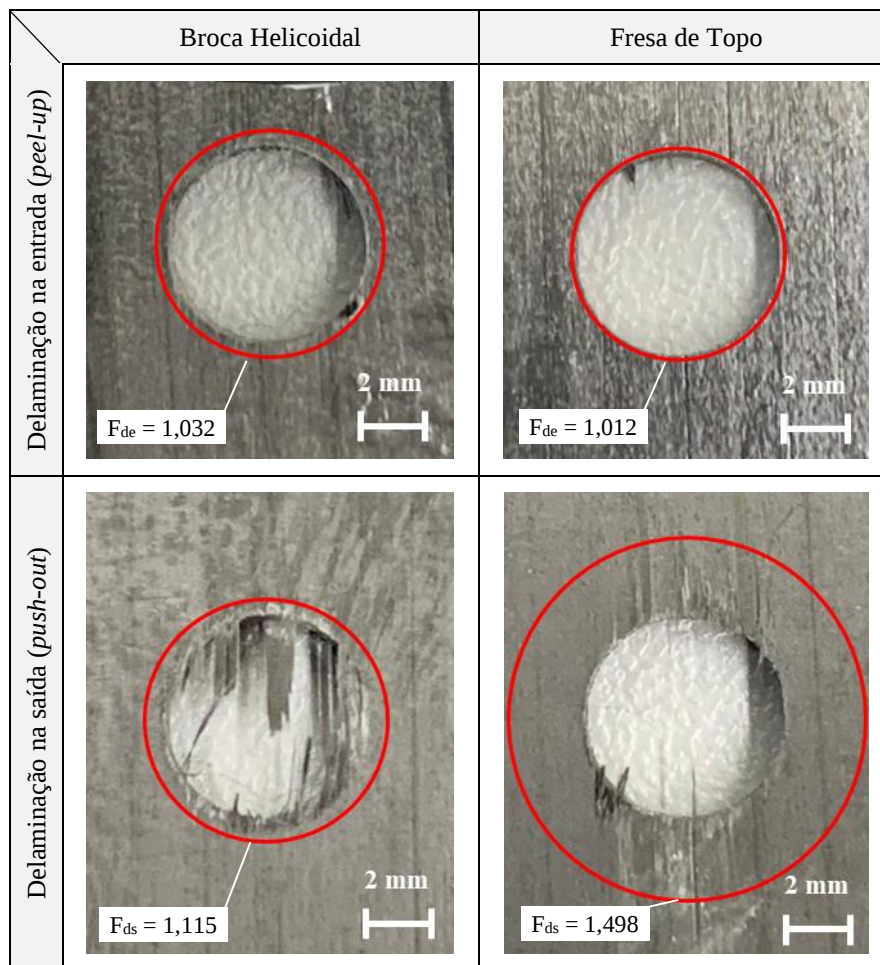


Figura 5. Imagens das delaminações *peel-up* e *push-out* do furo 1 geradas com broca helicoidal e fresa de topo a 6000 rpm (ampliação 100×).

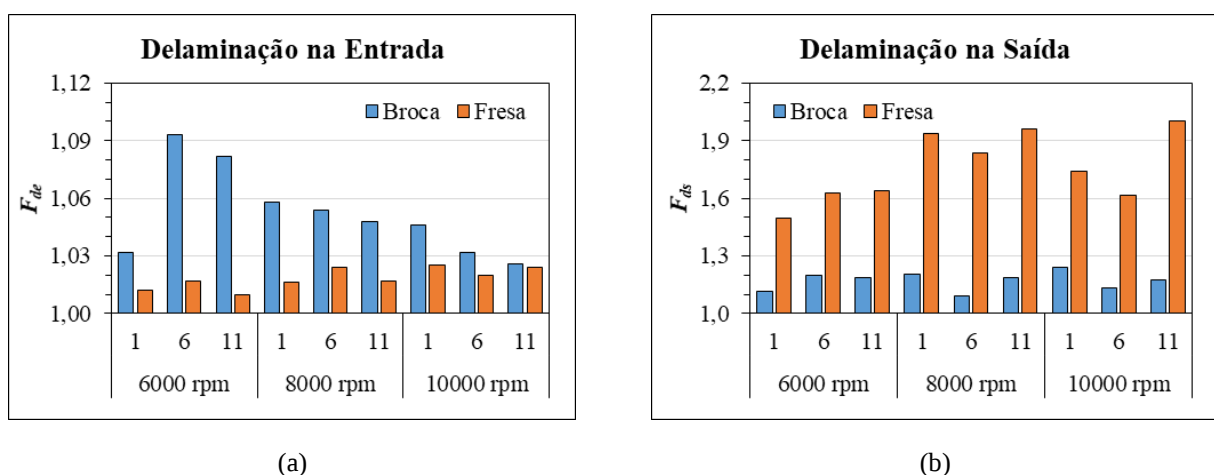


Figura 6. Resultados da medição do fator de delaminação: (a) na entrada do furo; (b) na saída do furo.

O fator de delaminação na entrada do furo (F_{de}) ficou entre 1,026 e 1,093 para a furação com a broca helicoidal e entre 1,010 e 1,025 para a perfuração com fresa de topo. Chama a atenção o alto padrão de qualidade da entrada do furo executado com a fresa de topo independentemente da rotação empregada. Ademais, visto que $F_{de} < 1,1$ para todos os furos, isto sugere deformações inferiores a 10% do valor nominal do diâmetro. Já na delaminação na saída (F_{ds}), a broca helicoidal apresentou resultados entre 1,093 e 1,243, e a fresa de topo entre 1,498 e 2,005. Evidencia-se que os valores de

F_{ds} sempre são superiores aos de F_{de} , pois os valores de força axial e torque são maiores (Davim et al., 2008; Zadafiya, et al., 2021). Assim, alguns descolamentos e trincas são propagadas entre as camadas do CFRP, mesmo com a placa de suporte na parte inferior (Wang e Jia, 2021). As incertezas de medição estimadas para as delaminações são de 0,001 para um intervalo de confiança de 95%, calculadas conforme o BIPM JCGM/WG 1 (2008). A Tabela 2 mostra o resultado médio e o desvio-padrão para fator de delaminação na entrada e na saída dos furos na perfuração com ambas as ferramentas para as três rotações empregadas.

Tabela 2. Resultados de medição para o fator de delaminação na entrada e na saída dos furos

Rotação	Fator de delaminação na entrada (F_{de})		Fator de delaminação na saída (F_{ds})	
	Fresa de Topo	Broca Helicoidal	Fresa de Topo	Broca Helicoidal
6000 rpm	$1,013 \pm 0,004$	$1,069 \pm 0,033$	$1,589 \pm 0,079$	$1,167 \pm 0,045$
8000 rpm	$1,019 \pm 0,004$	$1,053 \pm 0,005$	$1,910 \pm 0,068$	$1,163 \pm 0,061$
10000 rpm	$1,023 \pm 0,003$	$1,035 \pm 0,010$	$1,787 \pm 0,199$	$1,183 \pm 0,056$

Observa-se novamente que a furação realizada com a fresa de topo obteve os melhores resultados de F_{de} em todas as situações avaliadas, evidenciando o menor valor com rotação de 6000 rpm. Nas demais rotações, não houve degradação significativa da superfície do furo com a fresa, o que sugere a possibilidade de incremento na produtividade com o aumento da rotação quando a delaminação for o fator limitante. Nota-se ainda que os maiores valores produzidos com a fresa de topo ainda são menores que todos os gerados pela broca helicoidal, e que os melhores resultados desta foram obtidos na maior rotação (10000 rpm). Estes resultados corroboram com os estudos de Rodriguez et al. (2022), Voss et al. (2017) e Xu et al. (2022), em que ferramentas com menores ângulo de ponta tendem a promover maior delaminação na entrada do furo.

O fator da delaminação na saída do furo (F_{ds}) com a broca helicoidal foi praticamente estável durante os ciclos de furação com diferentes rotações e alcançando em geral valores aceitáveis ($1,171 \pm 0,048$). No entanto, o F_{ds} com a fresa de topo foi aproximadamente quatro vezes maior ($1,762 \pm 0,180$), provavelmente devido ao bloqueio do efeito *push-out* pela base de apoio, causando o esmagamento e posterior arrancamento das fibras, o que fez aumentar de maneira considerável a delaminação na saída do furo.

4. CONCLUSÕES

Este estudo propôs-se a avaliar comparativamente a perfuração em uma chapa de compósito polimérico reforçado por fibra de carbono (CFRP) com 2 mm de espessura utilizando uma broca helicoidal e uma fresa de topo reto aplicando três diferentes rotações (6000, 8000 e 10000 rpm) e avanço constante (0,05 mm/volta), considerando como métricas o desvio dimensional (δ), a circularidade (c) e a delaminação na entrada (F_{de}) e na saída (F_{ds}) dos furos gerados. A partir da sequência de 11 furos realizados em seis etapas com diferentes combinações entre rotação e ferramenta, observou-se que:

- Ao comparar a qualidade dos furos com as duas ferramentas avaliadas, a fresa de topo forneceu os melhores resultados para os desvios e para a delaminação na entrada. Em todos os casos, os menores valores obtidos com a fresa de topo foram com rotação de 6000 rpm: $\delta = (2,4 \pm 0,6) \mu\text{m}$; $c = (19,0 \pm 9,7) \mu\text{m}$ e $F_{de} = 1,013 \pm 0,004$. A título de comparação, os menores valores produzidos pela broca helicoidal foram $\delta = (4,1 \pm 1,2) \mu\text{m}$ e $c = (30,3 \pm 11,1) \mu\text{m}$ a 8000 rpm e $F_{de} = 1,035 \pm 0,010$ a 10000 rpm.
- Entretanto, para F_{ds} , a broca helicoidal foi a ferramenta que apresentou os melhores resultados, apesar da maior quantidade de fibras não cortadas. Os menores valores ($1,163 \pm 0,061$) foram gerados a 8000 rpm. No caso da fresa de topo, a ferramenta resultou em valores cerca de quatro vezes maiores. Sendo assim, há uma correlação inversa entre as ferramentas para esta característica, o que pode ser aprimorado com a redução do avanço da fresa ao sair do furo e/ou a saída sem bloqueio da placa de apoio.

De modo geral, as avaliações proporcionaram um melhor entendimento em relação ao efeito da tipologia da ferramenta e da rotação utilizada, e como elas afetam as métricas utilizadas na análise. Sendo assim, pode-se inferir que a fresa de topo reto trouxe mais benefício à qualidade dos furos da chapa fina de CFRP que a broca helicoidal. Na continuidade do trabalho, pretende-se realizar pré-furos com diâmetros superiores a 6 mm na placa de apoio para evitar o esmagamento das fibras durante o efeito *push-out*.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto SENAI de Inovação em Soluções Integradas em Metalmeccânica (São Leopoldo, RS) pela infraestrutura e pelos recursos disponibilizados para a realização do trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- BIPM JCGM/WG 1, 2008. *JCGM 100: Evaluation of Measurement Data—Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (JCGM 100:2008 — GUM 1995 with minor corrections), 134 p.
- Chen, W., 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, p. 1097-1108.
- Colligan, K. and Ramulu, M., 1992. The effect of edge trimming on composite surface plies. *Manufacturing Review*, Vol. 5, No. 4, p. 274-283.
- Davim, J. P., 2008. *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, Springer-Verlag London, 368p.
- Gaugel, S., Sripathy, P., Haeger, A., Meinhard, D., Bernthaler, T., Lissek, F., Kaufeld, M., Knoblauch, V. and Schneider, G., 2016. A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP). *Composite Structures*, Vol. 155, p. 173-183.
- Geier, N., Davim, J. P. and Szalay, T., 2019. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 125, p. 105552.
- ISO 1101, 2017. Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland, 154 p.
- Jiang, S., Wang, J., Sui, Q. and Ye, Q., 2016. Measurement of CFRP elastic modulus based on FBG reflectance spectrum analysis. *Measurement*, Vol. 77, p. 240-245.
- Khanna, N., Pusavec, F., Agrawal, C. and Krolczyk, G. M., 2020. Measurement and evaluation of hole attributes for drilling CFRP composites using an indigenously developed cryogenic machining facility. *Measurement*, Vol. 154, p. 107504.
- Lin, S. and Chen, I., 1996. Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed. *Wear*, Vol. 194, No. 1-2, p. 156-162.
- Liu, D. F., Tang, Y. J. and Cong, W. L., 2012. A review of mechanical drilling for composite laminates. *Composite Structures*, Vol. 94, No. 4, p. 1265-1279.
- Qiu, X., Li, P., Li, C., Niu, Q., Chen, A., Ouyang, P. and Ko, T. J., 2018. Study on chisel edge drilling behavior and step drill structure on delamination in drilling CFRP. *Composite Structures*, Vol. 203, p. 404-413.
- Rodriguez, I., Soriano, D., Ortiz-de-Zarate, G., Cuesta, M., Pušavec, F. and Arrazola, P. J., 2022. Effect of tool geometry and LCO₂ cooling on cutting forces and delamination when drilling CFRP composites using PCD tools. *Procedia CIRP*, Vol. 108, p. 752-757.
- Shyha, I. and Huo, D., 2021. *Advances in Machining of Composite Materials: Conventional and Non-conventional Processes*, Springer Cham, 547 p.
- Voss, R., Seeholzer, L., Kuster, F. and Wegener, K., 2017. Influence of fiber orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 18, p. 75-91.
- Wang, Q. and Jia, X., 2021. Analytical study and experimental investigation on delamination in drilling of CFRP laminates using twist drills. *Thin-Walled Structures*, Vol. 165, p. 107983.
- Xu, J., Yin, Y., Davim, J. P., Li, L., Ji, M., Geier, N. and Chen, M., 2022. A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites. *Composite Structures*, Vol. 294, p. 115594.
- Zadafiya, K., Bandhu, D., Kumari, S., Chatterjee, S. and Abhishek, K., 2021. Recent trends in drilling of carbon fiber reinforced polymer (CFRPs): A state-of-art review. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 69, p. 47-68.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF DRILLING CARBON FIBER REINFORCED POLYMER USING TWIST DRILL AND END MILL TOOL

COBEF2023-0028

Márcio Piecha dos Santos

Everton Luis Fernandes do Amaral

Maikon da Silva Cabral Frank

André João de Souza

Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Department of Mechanical Engineering (DEMEC), Laboratory of Automation in Machining (LAUS), 425 Sarmiento Leite St., 90050-170, Porto Alegre, RS.

marcio_piecha@hotmail.com; evertonlfa@gmail.com; maikon_frank@hotmail.com; ajsouza@ufrgs.br

Abstract. *The use of carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) has been growing in recent years. CFRP is commonly applied in the automotive, railway, aerospace and naval sectors due to its excellent mechanical properties. This material is classified as having poor machinability because of its high tensile and shear strength, the presence of abrasive fibers, and its anisotropic nature. Due to the structural composition of CFRP and its characteristics, drilling is one of the most common machining processes to establish mechanical connections between this material and other structures. The machining process quality is essential to allow proper assembly, and its result can directly impact the structural integrity and durability of the component. Among the most common defects are delamination and hole deformation. On the other hand, the suitable selection of the tool geometry and the optimization of cutting parameters allow for reducing the occurrence of these defects. Therefore, this study compares results in the drilling of CFRP with compressed air cooling using a twist drill and an end-mill. Three rotation levels (6000, 8000, and 10000 rpm) with fixed feed rate (0.05 mm/rev) were used. The dimensional deviation, roundness, and delamination at the hole entrance (peel-up) and hole exit (push-out) were analyzed for each cutting tool, totaling six steps. For each step, 11 holes were drilled. The results indicated that the end mill presented better outcomes for the applied cutting conditions for the dimensional deviation, roundness, and peel-up delamination. At the same time, the twist drill was better for the push-out delamination. It was observed that this delamination could be diminished by reducing the feed rate of the end mill and/or exiting the hole without blocking the backing plate. Thus, it is concluded that the highest hole quality is obtained with the end mill at 6000 rpm.*

Keywords: CFRP; twist drill; end mill; roundness; delamination.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only ones responsible for the printed material included in this paper.