ESTUDO DA DELAMINAÇÃO EM LAMINADO COMPÓSITO TERMORRÍGIDO NA USINAGEM AVANÇADA.

FRANCISCO DE ASSIS TOTI[1]
[1]*Fatec Sorocaba "José Crespo Gonzales" - Coordenadoria de Projetos Mecânicos*
francisco.toti01@fatec.sp.gov.br

Study of Delamination in Thermoset Composite Laminate in Advanced Machining

Eixo Tecnológico: *Produção Industrial*

Resumo

Os laminados compósitos reforçados com fibra de carbono (CFRPs) são amplamente utilizados em setores industriais de alta tecnologia, como o aeronáutico e o automobilístico. No entanto, sua montagem frequentemente exige um processo de furação, que está sujeito à geração de defeitos, sendo a delaminação o mais crítico. Neste estudo, foi realizado um ensaio de furação sob condição a seco, utilizando duas brocas de metal duro sem revestimento, de 6 mm de diâmetro, com ângulos de ponta de 118º e 140º. Os resultados demonstraram a ocorrência de delaminações do tipo lascamento nas superfícies de entrada e saída do furo, sendo essa a mais severa. Essas delaminações foram quantificadas pelos fatores de delaminação convencional (F_d) e ajustado (F_{da}), sendo que o fator F_{da} foi mais abrangente na quantificação da delaminação, visto que avaliou a área danificada (A_d) dentro de uma área máxima (A_{max}). O fator F_d foi facilmente aplicável, no entanto, mostrou-se mais apropriado quando o defeito de delaminação se apresentou na forma de trincas. Os valores obtidos de F_{da} na superfície de saída do furo, em função da influência do ângulo da ponta da broca e do aumento do avanço, mostraram que a broca com ângulo de 118º apresentou valores menores, ou seja, um melhor resultado no maior avanço em relação à broca com ângulo de 140º. Também foram comparados esses valores de F_{da} com os valores obtidos em estudo anterior na furação com broca específica para laminados compósitos com ângulos de 60º e 130º. Os valores ficaram acima aos obtidos com a broca específica, porém seguiram a mesma tendência de redução em função do aumento do avanço. Quanto aos defeitos de rebarbas e fibras não cortadas, a furação com a broca de 140º gerou mais defeitos nas superfícies de entrada e saída no menor avanço, em comparação com a broca de 118º.

Palavras-chave: Fator de delaminação , CFRP, Furação, CAD/CAM, Parâmetros de processo.

Abstract

Carbon fiber reinforced composite laminates (CFRPs) are widely used in high-tech industrial sectors, such as aeronautics and automotive. However, their assembly often requires a drilling process, which is subject to the generation of defects, the most critical of which is delamination. In this study, a dry drilling test was performed using two 6 mm diameter uncoated carbide drills with tip angles of 118º and 140º. The results demonstrated the occurrence of chipping-type delaminations on the hole entry and exit surfaces, the latter being the most severe. These delaminations were quantified by the conventional (Fd) and adjusted (Fda) delamination factors, with the Fda factor being more comprehensive in quantifying delamination, since it evaluated the damaged area (Ad) within a maximum area (Amax). The Fd factor was easily applicable; however, it proved to be more appropriate when the delamination defect was in the form of cracks. The Fda values obtained on the hole exit surface, as a function of the influence of the drill tip angle and the increase in feed, showed that the drill with an angle of 118º presented lower values, i.e., a better result at the highest feed in relation to the drill with an angle of 140º. These Fda values were also compared with the values obtained in a previous study in drilling with a specific drill for composite laminates with angles of 60º and 130º. The values were higher than those obtained with the specific drill but followed the same tendency of reduction as a function of the increase in feed. Regarding burr and uncut fiber defects, drilling with the 140º drill generated more defects on the entry and exit surfaces at the lowest feed, in comparison with the 118º drill.

Key-words: Delamination factor, CFRP, Drilling, CAD/CAM, Process parameters.

1. Introdução

Os laminados compósitos estruturais reforçados por fibras contínuas de carbono (CFRPs) podem ser constituídos de reforço unidirecional (fita) ou bidirecional (tecido). No caso dos bidirecionais, é possível alterar a orientação dos arranjos e a quantidade das camadas de reforço para atender às necessidades específicas de determinado projeto de engenharia. Nos CFRPs, a matriz transfere os esforços para as fibras, que apresentam alta performance ao longo do comprimento, determinando boas propriedades mecânicas que elevam sua capacidade de resistir à deformação (rigidez). No entanto, sua montagem frequentemente exige o processo de furação, que está sujeito à geração de defeitos, sendo a delaminação o mais crítico.

Estudos direcionados sobre os defeitos decorrentes do processo de furação convergem para a relação entre a composição e o arranjo do laminado compósito, os parâmetros do processo e as condições de resfriamento [1]. O avanço na melhoria da qualidade do processo de furação em laminados CFRPs é evidenciado nas publicações e revisões acadêmicas das últimas décadas. Contudo, ainda é um tema desafiador quando se trata de obter furos sem danos e com tolerâncias estreitas, devido ao alto controle de qualidade [2]. Um dos principais problemas para se obter furos de qualidade em laminados compósitos é a ocorrência do defeito de delaminação, que é afetada por dois fatores: (i) fatores do material e (ii) fatores dos parâmetros do processo [3].

Apesar da grande quantidade de dados experimentais disponíveis, as diretrizes generalizadas para a furação do laminado CFRP ainda são um tanto limitadas [4]. Além disso, o estudo para evitar o defeito de delaminação é um dos temas mais influentes de pesquisa no setor de manufatura ao longo das últimas décadas [5]. Especificamente, quando submetidos ao processo de furação, esses materiais apresentam defeitos como: fibras arrancadas, fissuras na matriz, rebarbas e delaminação na entrada e saída do furo [6]. Nesse contexto, esses laminados são objeto de pesquisa contínua quanto à geração de defeitos, bem como ao seu controle, decorrentes dos parâmetros do processo de furação e das condições de resfriamento.

Na avaliação do defeito de delaminação, são aplicados modelos propostos por pesquisadores, que, na maioria dos casos, são fatores bidimensionais em que se avalia a unidade de medida de área. O fator unidimensional de delaminação convencional (F_d) tem como objetivo avaliar facilmente o grau de delaminação nos laminados compósitos [7]. Ele é determinado em função da razão entre o diâmetro máximo (D_{max}), que contém a maior extensão de delaminação ou trincas, e o diâmetro nominal do furo (D_0), conforme expresso na Eq. (1).

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \tag{1}$$

O fator de delaminação ajustado (F_{da}) têm como objetivo corrigir o fator de delaminação convencional (F_d), visto que não quantifica a área delaminada (A_d), pois a delaminação apresenta uma forma irregular, contendo áreas danificadas e trincas na superfície de entrada e saída do furo [8]. Sendo assim, Fda considera a contribuição da trinca (F_d) no primeiro termo e a área danificada (A_d) no segundo termo da Eq. (2).

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{A_{max} - A_0} . (F_d^2 - F_d) \tag{2}$$

onde A_{max} é a área relacionada ao diâmetro máximo da área danificada (D_{max}) e A_0 é a área do furo nominal (D_0).

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

O laminado utilizado no ensaio de furação foi o compósito reforçado com fibras contínuas de carbono EPX-C de grau aeronáutico é constituído de resina termorrígida epóxi e reforçada com fibras contínuas de carbono, com 3.000 filamentos por feixe. A fração volumétrica ideal de fibras no compósito está entre 50 e 65%, fornecido pela Hexcel®. O laminado é confeccionado pela justaposição de 24 lâminas de tecido bidirecional 0/90° com trançamento de tecido ondulado simples (plain wave), gerando uma espessura nominal de 5 mm.

2.2. Metodologia

O ensaio foi realizado sob condição a seco na máquina-ferramenta CNC Enco Concept Mill 55, com torre porta-ferramentas com 8 posições, rotação de 150 a 3500 rpm, velocidade de avanço de 0 a 2000 mm/min, com programação simulada e executada pelo CAM (computador auxiliando a manufatura) no laboratório de usinagem avançada da Fatec Sorocaba. Os parâmetros do processo utilizados no ensaio de furação e os fatores de resposta para quantificação do defeito de delaminação são apresentados na Tab. 1.

Tab. 1 - Parâmetros do processo e fatores de resposta.

Fatores de Controle	Níveis	Fatores de Resposta
Velocidade de corte - Vc (m/min)	60	-
Avanço - f (mm/rev)	0,045; 0,060; 0,075; 0,090	Defeitos
Condição de refrigeração	a seco	Força de avanço (N)
Ferramenta de corte - broca	FS1; FS2	Defeitos
Material	Laminado CFRP	

Fonte: (Autor, 2025).

Foram utilizadas duas ferramentas de corte broca de Ø 6mm, de metal duro, sem revestimento e sem canal interno para refrigeração, contendo somente um ângulo de ponta. Para a broca com ângulo de 118º o código definido foi FS1 e a broca com ângulo de 140º o código foi FS2. Também foi acrescentado informações validadas em estudo anterior da ferramenta de corte broca com dois ângulos de 60º e 130º, específica para furação, utilizada para o referido material, na mesma velocidade de corte, nos avanços de 0,045 mm/rev e 0,090 mm/rev [9]. A Tab. 2 mostra as especificações das ferramentas de corte.

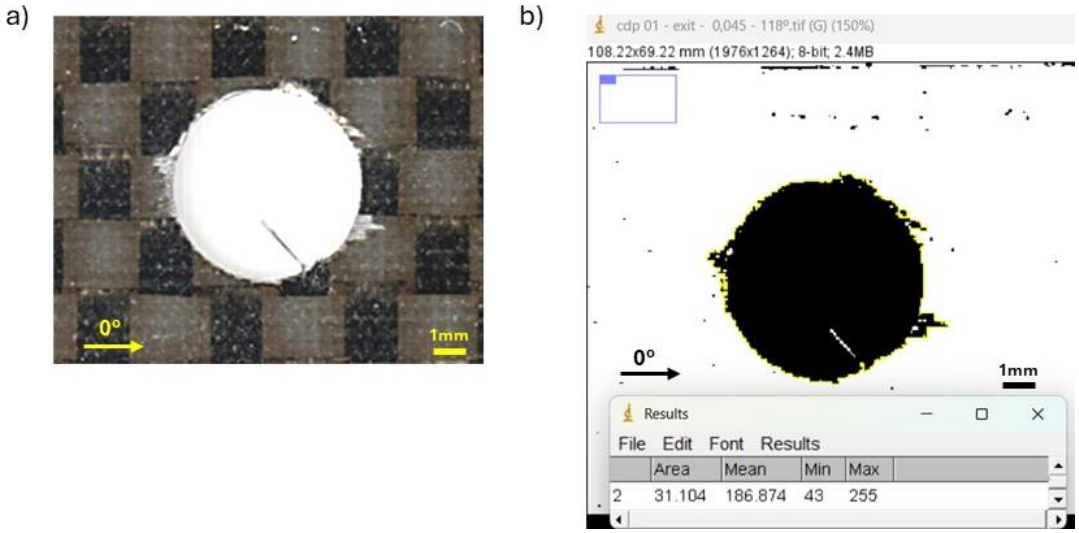
Tab. 2 - Especificações das ferramentas de corte broca.

Broca	Material	Ângulo da ponta	ø (mm)	Norma
FS1	Metal duro	118º	6	DIN 6537
FS2	Metal duro	140º	6	DIN 8037
Seco	Metal duro**	60º e 130º	6	SD205A-6.0-32
**metal duro com revestimento de diamante policristalino				

Fonte: Catálogo técnico dos fabricantes das brocas Dormer (2025).

As imagens da superfícies de entrada, interna e de saída do furo foram obtidas pelo microscópico óptico da marca Olimpus. Em seguida, as imagens das superfícies de entrada e de saída do furo foram analisadas bidimensionalmente em projeção ortogonal, para obtenção dos valores das variáveis utilizadas na avaliação dos fatores de delaminação. Para isso, foram utilizados os *softwares* ImageJ de domínio público, desenvolvido pela National Institutes of Health e o CAD INVENTOR versão® educacional 2024 da Autodesk, disponíveis no laboratório Mechanical design Automation – MDA da Fatec Sorocaba. A Fig. 1 mostra imagens da superfície de saída do furo com o defeito de delaminação e após tratamento de binarização executada no *software* ImageJ, indicando em contorno amarelo a área máxima (A_{max}) incluindo o defeito de delaminação.

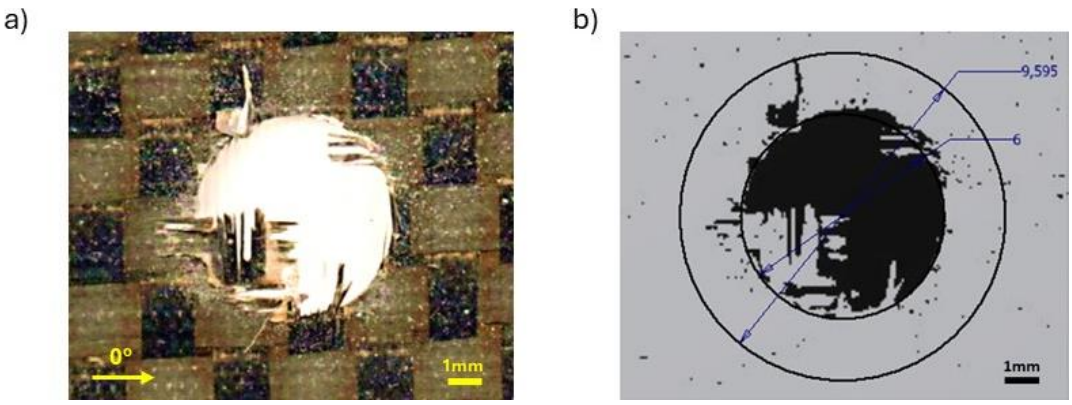
Fig. 1 - Imagem da superfície de saída do furo no avanço de 0,045 mm/rev com broca de 118º: a) microscopia óptica e b) tratamento por binarização no *software* ImageJ.



Fonte: (Autor, 2025).

A Fig. 2 mostra imagens da microscopia óptica e salva na extensão ipt de arquivo nativo do *software* Inventor para traçado e obtenção dos valores das dimensões que foram utilizadas nos fatores de avaliação do defeito de delaminação.

Fig. 2 – Imagem da superfície de saída do furo no avanço de 0,075 mm/rev com broca de 118º : a) microscopia óptica e b) *software* inventor.



Fonte: (Autor, 2025).

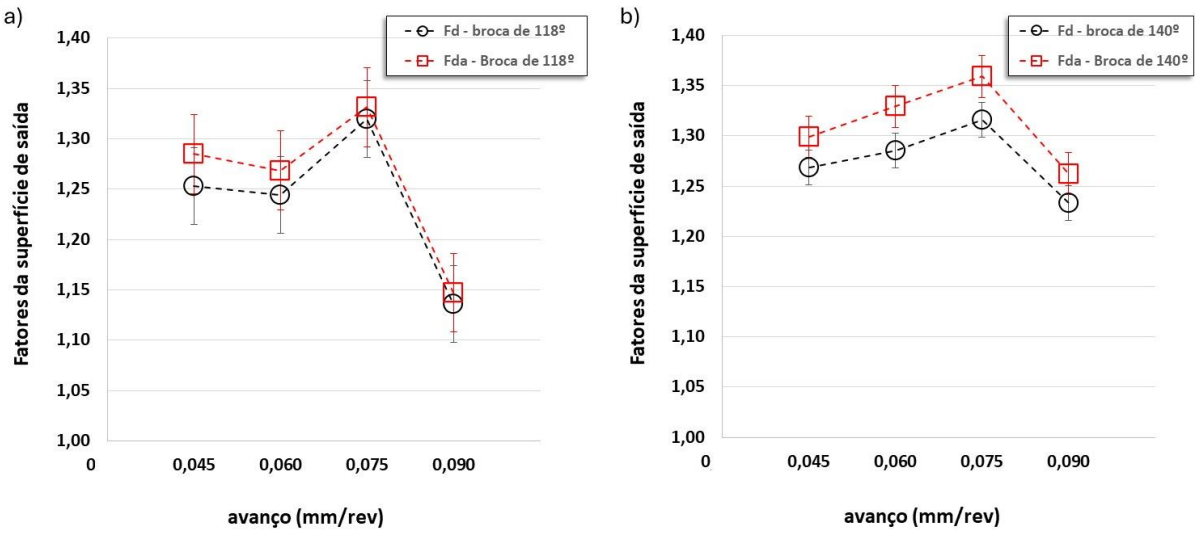
3. Resultados e Discussão

A delaminação foi mais severa na superfície de saída do furo, sendo assim os valores obtidos dos fatores de delaminação convencional (F_d), ajustado (F_{da}) são apresentados na Fig. 3. Nota-se na Fig. 3a que os valores obtidos de F_d e F_{da} da furação com a broca com ângulo de 118º são próximos no avanço de 0,045 mm/rev e com o aumento do avanço para 0,060 mm/rev apresentam uma leve redução, seguido de um aumento e atingindo valores máximos no avanço de 0,075 mm/rev. No entanto, no avanço de 0,090 mm/rev ocorreu uma redução acentuada, atingindo os menores valores, indicando ser o melhor avanço na redução do defeito de delaminação em relação aos demais avanços.

A Fig. 3b exibe os valores obtidos dos fatores na furação com a broca com ângulo de 140º. Observa-se que o valor de F_{da} é superior e está distanciado do valor de F_d no avanço de 0,045 mm/rev e aumenta, seguindo essa tendência nos avanços de 0,060 mm/rev e de 0,75 mm/rev, onde atingi seus valores máximos. No avanço de 0,090 mm/rev ocorre uma redução acentuada, atingindo os menores valores em relação aos demais avanços. Esse distanciamento dos valores de F_{da} em relação a F_d ocorreu em função do aumento da área danificada (A_d) na superfície ao redor do furo.

Na análise comparativa entre os valores de F_{da} obtidos com a duas brocas, nota-se que ambas atingiram valores máximos no avanço de 0,075 mm/rev e mínimos no avanço de 0,090 mm/rev, no entanto, os valores de F_{da} obtidos com a broca com ângulo de 118º são melhores em comparação aos obtidos com a broca de ângulo de 140º. Esses resultados vão ao encontro da literatura de que o defeito de delaminação na saída do furo é mais crítico e difícil de evitar durante a furação de laminados CFRP [10,11].

Fig. 3 - Valores obtidos dos fatores F_d, F_{da} na superfície de saída do furo: broca com ângulo de 118º e b) broca com ângulo de 140º.

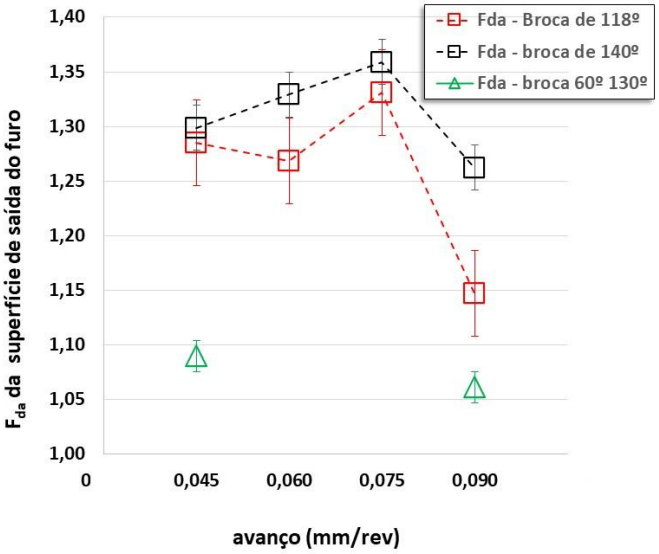


Fonte: (Autor, 2025).

A Fig. 4 exibe os valores obtidos de F_{da} do processo de furação com as brocas com ângulos de: 118º, 140º, 60º e 130º. Observa-se que os valores obtidos de F_{da} com a broca de 118º estão próximos com os obtidos com a broca de 140º, porém bem superiores em comparação aos valores obtidos com a broca com ângulos de 60º e 130º no avanço de 0,045 mm/rev. No avanço de 0,090 mm/rev os valores obtidos com a broca de 140º são melhores em relação a broca de

118º, entretanto é superior em relação a broca de ângulos de 60º e 130º. Esses resultados das brocas de 118º e 140º mostram que seguiram a mesma tendência da broca de 60º e 130º, sendo o avanço de 0,090 mm/rev recomendado para a furação sob condição a seco para o laminado EPX-C.

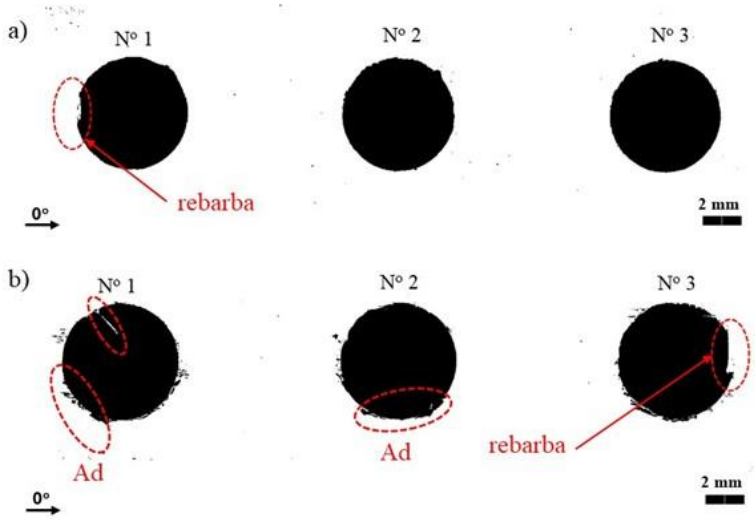
Fig. 4 – Valores obtidos do fator de delaminação ajustado (F_{da}) na furação com as brocas com ângulos de 118º, 140, e 60º e 130º.



Fonte: (Autor, 2025).

As imagens tratadas dos furos executados com a broca de ângulo de 118º, no software ImageJ, no avanço de 0,045 mm/rev, destacando o defeito de rebarba são exibidas na Fig. 5. Observa-se na Fig. 5a o defeito de rebarba e pequena área danificada (A_d) na superfície de entrada do furo Nº 1. A Fig. 5b exibe o aumento do defeito de rebarba e da área danifica (A_d) na superfície da saída do furo em relação a superfície de entrada do furo.

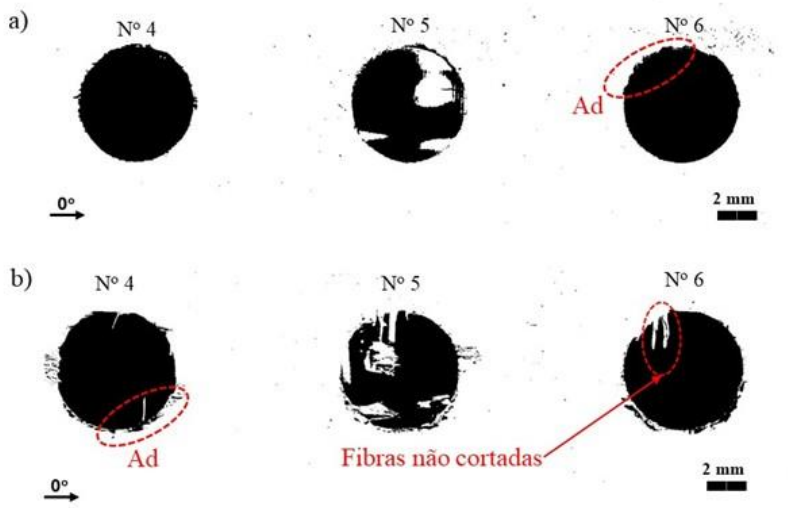
Fig. 5 - imagens binarizadas dos furos executados com a broca de ângulo de 118º, no software ImageJ, no avanço de 0,045 mm/rev: a) superfície de entrada e b) superfície de saída.



Fonte: (Autor, 2025).

A Fig. 6 mostra as imagens tratadas dos furos executados com a broca de ângulo de 140º, no software ImageJ, no avanço de 0,045 mm/rev. Nota-se na Fig. 6a a presença de fibras não cortadas e da área danificada ($A_{d)}$ na superfície de entrada do furo. A Fig. 6b destaca o aumento dos defeitos na superfície de saída em relação a superfície de entrada. No entanto quando comparados com os defeitos apresentados na Fig. 5ab, verifica-se que o ângulo da broca de ângulo de 140º gerou mais defeitos em relação a broca de ângulo de 118º.

Fig. 6 - imagens binarizadas dos furos executados com a broca de ângulo de 140º, no software ImageJ, no avanço de 0,045 mm/rev: a) superfície de entrada e b) superfície de saída.



Fonte: (Autor, 2025).

4. Considerações finais

Com os resultados alcançados, foi possível quantificar e caracterizar o defeito de delaminação pelos fatores convencional (F_d) e ajustado (F_{da}), sendo que os valores obtidos na saída do furo foram superiores aos valores obtidos na entrada do furo. Isso ocorreu porque o laminado, na etapa final de furação, ofereceu menos resistência ao movimento efetivo de corte nos quatro avanços avaliados. A broca com ângulo de 118º exibiu melhor desempenho em relação à broca com ângulo de 140º, nos avanços de 0,060 mm/rev e 0,090 mm/rev, demonstrando a influência do ângulo da broca na geração de danos do tipo delaminação. Além disso, foi a que obteve valores de F_{da} mais próximos dos obtidos com as brocas de 60º e 130º, no avanço de 0,090 mm/rev.

As rebarbas e fibras não cortadas foram mais frequentes na saída do furo em relação à entrada do furo para as brocas de 118º e 140º, nos quatro avanços, indicando que o melhor parâmetro de processo, envolvendo força, avanço e ângulo da broca, quanto à menor geração de defeitos, foi no avanço de 0,090 mm/rev, com velocidade de corte constante de 60 m/min, utilizando a broca com ângulo de 118º.

A comparação dos valores de F_{da} obtidos com as brocas de 118º e 140º com a broca específica para compósitos de 60º e 130º mostrou que, embora as brocas convencionais apresentem valores superiores de F_{da}, seguem a mesma tendência de melhoria com o aumento do avanço. Isso demonstrou que brocas convencionais podem ser viáveis para a usinagem do laminado CFRP desse estudo, com redução custos sem comprometer excessivamente a qualidade quanto ao defeito tipo delaminação.

Agradecimentos

O autor agradece o centro Paula Souza por prover o RJI e ao laboratório de Compósitos da USP – São Carlos pelo laminado compósito disponibilizado para o presente estudo.

Referências

[1] TOTI, F. A. et al. Drilling behavior of thermoplastic and thermoset cfrp laminates under cryogenic cooling and dry machining. In: **7 th Brazilian Conference on Composite Materials**, 2024, Brasília - DF. Proceedings of the Brazilian Conference on Composite Materials, p. 301- 3011, 2024.

[2] XU, J. et al. A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites**. Composite Structures**, vol. 294, 115594, 2022.

[3] KUDUS, M. H. A.; RATNAM, M. M.; AKIL, H. M. Factors affecting hole quality during 2021, Vol. 40(9–10) 391–405 drilling of natural fiber-reinforced composites: A comprehensive review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, vol, 40, p.391-405, 2021.

[4] ROMOLI, L e LUTEY, A. H. A. Quality monitoring and control for drilling of CFRP laminates. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 40, p. 16–26, 2019.

[5] RATHOD, D. et al. A review on strengthening, delamination formation and suppression techniques during drilling of CFRP composites, **Cogent Engineering**, 8:1, DOI:10.1080/23311916.2021.1941588, 2021.

[6] Gupta, A., Ascroft, H., Barnes, S. Effect of chisel edge in ultrasonic assisted drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP). **7th HPC 2016** – . Chemnitz, Germany, 2016

[7] 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.

[8] DAVIM, J. P.; RUBIO. J. C.; ABRÃO, A. M. A Novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. **Composites Science and Technology**, v. 67, p. 1939-1945, 2007.

[9] TOTI.F. A. Estudo comparativo do comportamento em usinagem por furação a seco e refrigerada de laminados compósitos termoplástico e termorrígido de grau aeronáutico, **Tese de doutorado pela Universidade de São Paulo - campus São Carlos.** Ano de obtenção: 2023.

[10] WU, C. Q.; GAO, G. L.; LI, H. N.; LUO, H. Effects of machining conditions on the hole wall delamination in both conventional and ultrasonic-assisted CFRP drilling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vo. 104, p. 2301–2315, 2019.

[11] GEIER, N.; SZALAY, T.; TAKÁCS, M. Analysis of thrust force and characteristics of uncut fibres at non-conventional oriented drilling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastic (UD-CFRP) composite laminates. **International journal of advanced manufacturing Technology**, vol. 100, p. 3139–3154, 2019.