

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA DELAMINAÇÃO NA FURAÇÃO DE PLACA DE POLÍMERO
REFORÇADA COM FIBRA DE CARBONO: INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE
CORTE E GEOMETRIA DE FERRAMENTA

por

Paula Machado Gomes

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Fevereiro de 2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO**CIP - Catalogação na Publicação**

MACHADO GOMES, PAULA
ANÁLISE DA DELAMINAÇÃO NA FURAÇÃO DE PLACAS DE
POLÍMERO REFORÇADA COM FIBRA DE CARBONO: INFLUÊNCIA DA
VELOCIDADE DE CORTE E GEOMETRIA DE FERRAMENTA / PAULA
MACHADO GOMES. -- 2024.
24 f.
Orientador: Heraldo Amorim.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Furação de placas de CFRP. 2. Broca helicoidal
de aço rápido. 3. Delaminação na furação de polímeros.
4. Furação com placa de apoio. I. Amorim, Heraldo,
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Paula Machado Gomes

ANÁLISE DA DELAMINAÇÃO NA FURAÇÃO DE PLACAS DE POLÍMERO
REFORÇADA COM FIBRA DE CARBONO: INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE
CORTE E GEOMETRIA DE FERRAMENTA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignácio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Heraldo Amorim

Comissão de Avaliação:

Prof. André João de Souza

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Liu Yesukai de Barros

Porto Alegre, Fevereiro de 2024

À minha família

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à minha família pelo apoio constante, mesmo à distância.

Agradeço aos meus amigos por estarem sempre presentes, me incentivando em todas as fases da minha graduação.

Agradeço aos professores que me acompanharam ao longo do curso e que, com empenho, se dedicam à arte de ensinar.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2024

ANÁLISE DA DELAMINAÇÃO NA FURAÇÃO DE PLACAS DE POLÍMERO REFORÇADA COM FIBRA DE CARBONO: INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE E GEOMETRIA DE FERRAMENTA

GOMES, Paula Machado

paulamachadogomes@outlook.com

Resumo. Este estudo investigou a qualidade da perfuração de placas de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) através da análise de delaminação. Para reduzir a delaminação na saída do furo, uma placa de alumínio previamente furada foi utilizada como apoio à de CFRP. Dois tipos diferentes de ferramentas foram avaliados: uma broca helicoidal, com um ângulo de ponta de 135° , e uma fresa de duas arestas de corte, equivalente a uma broca helicoidal com ângulo de ponta de 180° . Três velocidades de corte diferentes foram testadas. Os resultados mostraram que velocidades mais altas levam a uma menor delaminação devido à redução do tempo de corte. Além disso, a escolha da ferramenta teve um impacto significativo na delaminação, com a fresa demonstrando uma vantagem, especialmente em velocidades mais baixas. A análise de variância confirmou a importância da velocidade de corte. A fresa teve melhor resultado quando comparado à broca helicoidal. Portanto, a escolha adequada da velocidade de corte e da ferramenta é importante para minimizar a delaminação e melhorar a qualidade do produto final, potencialmente reduzindo os custos de retrabalho.

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

Analysis of delamination in CFRP plate drilling: influence of cutting speed and tool geometry

Abstract. This study investigated the quality of drilling in Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) plates through delamination analysis. To reduce delamination at the exit of the hole, a pre-drilled aluminum plate was used as support for the CFRP. Two different types of tools were evaluated: a helical drill with a 135° point angle, and a two-flute end mill, equivalent to a helical drill with a 180° point angle. Three different cutting speeds were tested. The results showed that higher speeds lead to less delamination due to reduced cutting time. Additionally, the choice of tool had a significant impact on delamination, with the mill demonstrating an advantage, especially at lower speeds. Analysis of variance confirmed the importance of cutting speed. The mill yielded better results compared to the helical drill. Therefore, proper selection of cutting speed and tool is important to minimize delamination and improve the quality of the final product, potentially reducing rework costs

Keywords: CFRP, delamination, milling, drilling

NOMENCLATURA

Símbolos

Fd	Fator de delaminação	[-]
$Dmáx$	Diâmetro de delaminação	[mm]
Vc	Velocidade de corte	[m/min]
f	Avanço	[mm/rev]
n	Rotação	[RPM]
Vf	Avanço linear	[mm/min]
D	Diâmetro nominal	[mm]
SQ	Variância	[mm]
MQ	Média dos Quadrados	[mm ²]

Abreviaturas e Acrônimos

$CFRP$	Fibra de carbono reforçadas com polímeros (EN)	[-]
GDL	Graus de Liberdade	[-]

1. INTRODUÇÃO

Polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) são materiais compósitos estruturais com alta resistência. Embora os seus custos de fabricação sejam altos, eles são amplamente utilizados em indústrias de alta tecnologia. A fibra de carbono tem diversas aplicações e usos atuais, principalmente na forma de placas. As principais formas de união não permanente de placas de CFRP com outros elementos são uniões parafusadas e rebitadas.

Uniões parafusadas e rebitadas exigem a existência prévia de furos para o posicionamento dos parafusos ou rebites. A qualidade desses furos é crucial para a resistência das juntas, já que furos sem qualidade podem gerar retrabalho. Para Persson et al. (1997), métodos tradicionais de perfuração podem danificar os furos, mas se fosse possível fazer furos sem defeitos, as estruturas de compósitos poderiam ser mais leves e ter uma vida útil mais longa contra fadiga.

Atenção especial deve ser dada ao processo de furação de CFRP: além de danos como delaminação, o calor gerado pelo atrito entre a ferramenta e o compósito pode danificar a matriz e a ferramenta durante a perfuração, ou até mesmo interferir na estabilidade dimensional do elemento. Manter a ferramenta resfriada e remover continuamente o material são essenciais para a qualidade do furo.

Além dos métodos convencionais, técnicas como jato de água, eletroerosão e laser também podem causar danos como a delaminação. Persson et al. (1997) investigou como defeitos na usinagem afetam a resistência e durabilidade de laminados compostos, utilizando métodos de teste e exames não destrutivos.

A furação de placas de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) foi estudada por Dos Santos et al (2023) em um comparativo de resultados na perfuração de CFRP utilizando uma broca helicoidal e uma fresa de topo reto. A usinagem de CFRPs é desafiadora devido ao desgaste abrasivo das fibras de carbono nas ferramentas de corte e às

propriedades não homogêneas e anisotrópicas do material. Problemas comuns incluem delaminação, puxamento de fibras, fibras não cortadas, microtrincas, rugosidade inadequada e queima da matriz (Geier, 2019).

A delaminação é um dano estrutural que ocorre no processo de furação envolvendo o descolamento das fibras ao redor do furo em uma ou mais camadas. Existem duas formas principais de delaminação conhecidas, denominadas delaminação de entrada (peel-up), na qual o material é puxado em vez de cortado devido à força exercida pelo ângulo de saída da broca, resultando no desprendimento das camadas superiores (Figura 1-a), e delaminação de saída (push-out), causada pela força compressiva exercida pela ponta da ferramenta ao sair do furo, levando as camadas finais a serem empurradas e separadas das demais (Figura 1-b).

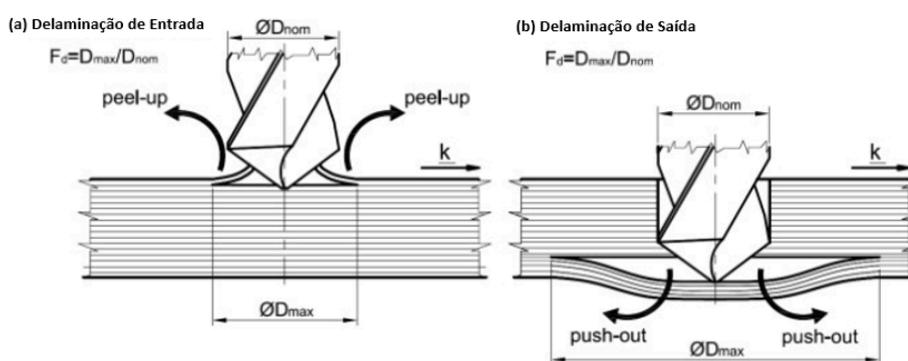


Figura 1 - Delaminação de entrada (a) e de saída (b) em placa de fibra de carbono. Adaptado de Geier, 2019

A delaminação de saída, causada pela pressão da ferramenta nas camadas inferiores, ocorre quando as fibras não são cortadas adequadamente, resultando na saída parcial das fibras, o que pode afetar a qualidade da superfície e a precisão dimensional. Além disso, a delaminação de saída pode prejudicar a integridade das superfícies do compósito cortado, levando à formação de cavidades superficiais devido à perda de matriz ou fibras.

No processo de furação, um parâmetro importante é o avanço, que compreende a distância percorrida pela broca a cada volta durante o processo de furação. Em termos simples, é a taxa de progresso da broca na peça que está sendo furada. No contexto de placas de CFRP, o avanço é uma variável crucial que influencia diretamente o processo de furação. A influência do avanço na furação de placas de CFRP é significativa. Avanços inadequados podem levar a problemas como delaminação, danos às fibras, formação de rebarbas, aumento da temperatura de corte e desgaste prematuro da ferramenta (Geier, 2019). Um avanço muito alto pode gerar calor excessivo, danificando as fibras e a matriz do material, enquanto um avanço muito baixo pode causar fricção excessiva, aumentando a força de corte e o desgaste da broca.

O ângulo de ponta da ferramenta de furação e o aumento da velocidade de corte afetam as forças de usinagem e a qualidade do furo. Ângulos de ponta mais elevados aumentam a força de avanço, mas mantém o torque de perfuração estável. Pesquisas, como as de Heisel e Pfeil Froth. (2012), indicam que a qualidade do furo é otimizada com ângulos acima de 180° na entrada, mas piora na saída (push-out) devido ao aumento da força de avanço e pressão nas camadas inferiores do material. Ângulos de ponta inadequados podem levar a problemas como delaminação, rebarbas, aumento de temperatura e desgaste prematuro da ferramenta. Um ângulo menor reduz a força de avanço, reduzindo o risco de delaminação, enquanto um ângulo maior facilita a remoção eficiente de cavacos, com possibilidade de danos às fibras e à matriz do material se for excessivo.

O avanço representa o movimento da ferramenta, indicando a distância percorrida na direção axial a cada revolução completa da broca. Enquanto isso, a velocidade de rotação se refere à rapidez com que a ferramenta de corte gira em torno do seu eixo durante toda a operação de usinagem, medida em rotações por minuto (RPM). Enquanto a primeira diz respeito ao progresso da broca na peça, a segunda está relacionada à velocidade de giro da ferramenta de corte ao redor do seu próprio eixo.

Para analisar os resultados de delaminação, foram coletadas as medidas do maior diâmetro na região danificada ao redor de cada furo, denominado D_{max} , tanto para entrada quanto para a saída dos furos, conforme a Figura 2. Esses valores foram usados para o cálculo do fator de delaminação (F_d), através da divisão do D_{max} pelo diâmetro nominal do furo (D) (Chen, 1997).

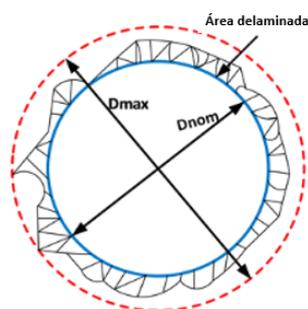


Figura 2 - Esquema dos diâmetro máximo de um furo delaminado. Adaptado de Haruna e Wang, 2021.

Neste trabalho serão realizados furos em uma placa fina de CFRP com a utilização de suportes, a fim de avaliar o efeito da delaminação na entrada (peel-up) e na saída (push-out). Optou-se por duas ferramentas distintas: uma broca helicoidal e uma fresa de topo de duas arestas, ambas confeccionadas em aço rápido. A seleção dessas ferramentas baseia-se em sua ampla disponibilidade e proporciona uma comparação eficiente, assim como em estudos anteriores, (Dos Santos, 2023 e Haruna, 2021).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do experimento, uma placa de CFRP com 2 mm de espessura foi utilizada como material de estudo. Esse material serve como base para a realização do processo de furação. O experimento foi realizado no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), e utilizou um centro de usinagem ROMI Discovery, com controle Mach 8, potência máxima de 5,5 kW e velocidade máxima de 4000 rpm.

No processo de furação realizado no centro de usinagem ROMI Discovery 308, foram empregados dois tipos distintos de ferramentas, ambas destinadas a criar furos com um diâmetro de 8 mm. Uma das ferramentas utilizadas foi uma broca helicoidal de aço rápido do modelo Dormer AR DIN 338, caracterizada por um ângulo de ponta (σ) de 135° . A outra ferramenta utilizada foi uma fresa de topo reto com duas arestas de corte modelo WG Carbide DIN 327 B.

Antes de iniciar o processo de furação, procedeu-se à medição do batimento das ferramentas utilizando um relógio comparador Digimess 121.304. Para a broca helicoidal, o batimento foi verificado como sendo de 0,01 mm, enquanto para a fresa, o valor encontrado foi de 0,02 mm. Essas medidas fornecem informações cruciais sobre a precisão e alinhamento das ferramentas antes do início da usinagem.

Os parâmetros de furação foram estabelecidos utilizando uma janela operacional definida com base em outros trabalhos com ferramentas similares, como os desenvolvidos por Fernández et al. (2017) e Davim e Reis (2003). Considerando um avanço único de 0,1 mm/rev e velocidades de corte (V_c) pré definidas em 20, 50 e 80 m/min, chegou-se aos parâmetros indicados na Tabela 1. Os valores foram arredondados para serem compatíveis com o formato exigido pelo centro de usinagem utilizado.

Tabela 1 - Parâmetros do processo

V_c [m/min]	Rotação [rpm]	Avanço [mm/rev]	Velocidade de avanço [mm/min]
20	796	0,1	80
50	1989	0,1	198,94
80	3183	0,1	318,31

Para cada ferramenta foram realizados 9 furos, ou seja, 3 repetições para cada uma das três velocidades de corte como mostrado na Tabela 2 a seguir

Tabela 2 - Parâmetros de corte para cada furo

Ordem	Ferramenta	V_c (m/min)	n (rpm)	Velocidade de avanço(mm/min)
1	Fresa de topo	50	1989	199
2	Fresa de topo	20	796	80
3	Broca 135°	80	3183	318
4	Fresa de topo	80	3183	318
5	Fresa de topo	20	796	80
6	Broca 135°	50	1989	199
7	Fresa de topo	20	796	80
8	Broca 135°	50	1989	199
9	Broca 135°	20	796	80
10	Broca 135°	80	3183	318
11	Fresa de topo	50	1989	199
12	Broca 135°	50	1989	199
13	Fresa de topo	80	3183	318
14	Fresa de topo	50	1989	199
15	Fresa de topo	80	3183	318
16	Broca 135°	20	796	80
17	Broca 135°	80	3183	318
18	Broca 135°	20	796	80

A abordagem deste experimento não avaliou a furação simultânea de materiais, como realizado no estudo anterior por Santos et al. (2022), onde a ferramenta perfurou tanto a placa de fibra de carbono quanto a de sacrifício, de nylon, em cada furo. Diferentemente, optou-se pelo uso de uma placa suporte de alumínio com 6,35 mm de espessura. Nela, 18 furos foram usinados com uma broca de 9 mm de diâmetro, espaçados 4,5 mm entre si conforme ilustra a Figura 3. Essa placa de alumínio desempenhou um papel crucial como suporte para o experimento. Ao permitir furos passantes na placa de fibra de carbono sem interferir na saída do furo. Esse método de suporte não apenas demonstra a eficácia da furação sem a necessidade de um material de sacrifício, mas também, por ser reutilizável como suporte, reduzir custos para as empresas, proporcionando uma otimização nos processos.



Figura 3. Registro da primeira etapa do experimento, furação da placa de alumínio

Sem mover as coordenadas da máquina, nem a placa de alumínio e seus elementos de fixação, a placa fina de fibra de carbono foi posicionada e fixada. Programou-se o processo de furação de maneira que os centros dos furos de 8 mm feitos na placa de fibra de carbono coincidisse com os dos furos de 9 mm existentes na placa de suporte.

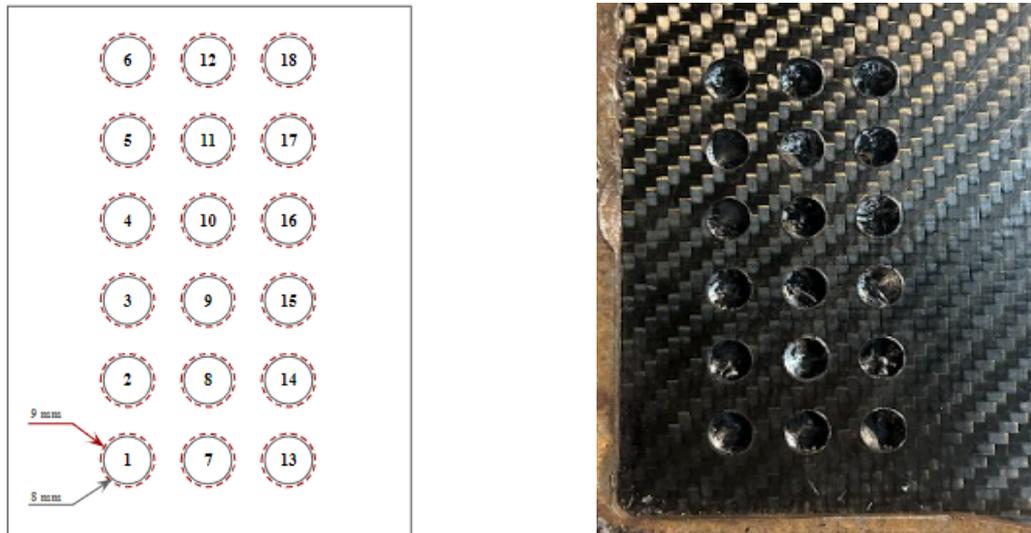
A Figura 4 evidencia como o experimento foi conduzido. Nesse registro é possível notar a placa de cavidade quadrada utilizada como fixador da placa de carbono.



Figura 4 - Fixação da placa de CFRP para a furação

A Figura 5 (a) ilustra a disposição dos furos a serem analisados, nos quais a numeração descreve a ordem de furação. A Figura 5 (b) apresenta a chapa após a execução dos furos.

As medidas e imagens individuais dos furos foram tomadas utilizando um microscópio Dyno-lite AM413ZT para garantir a precisão das análises. No Apêndice A, estão as imagens de entrada e saída dos furos da broca e da fresa



(a) Disposição dos furo

(b) Chapa usinada

Figura 5 - Placa de CFRP

3. RESULTADOS

3.1 Análise qualitativa da delaminação

Na análise das fibras não cortadas nos furos realizados com a broca helicoidal, o furo 18, na Fig. 6 (a), confeccionado com uma velocidade de corte de 20 m/min, apresentou um acabamento inferior em comparação com os demais furos produzidos pela mesma ferramenta. Esse furo em particular exibiu uma quantidade maior de fibras que não foram cortadas, mas sim empurradas ou puxadas pela ferramenta. O mesmo padrão foi observado no furo 9 , na Fig. 6 (b), também efetuado a 20 m/min, que teve melhor acabamento quando comparados aos furos 10, na Fig. 6 (c), e 12 , Fig. 6 (d), utilizando a velocidades de corte de 80 e 50 m/min, respectivamente. Ou seja, os furos feitos com velocidade maior tiveram maior efetividade no corte de fibras.

Quanto aos furos realizados com a fresa, o furo 14, na Fig. 7 (d), produzido com uma velocidade de corte de 50 m/min, apresentou uma quantidade menor de fibras não cortadas quando comparado aos furos 5 ,na Fig.7 (b), e 7, Fig. 7 (c), usinados com 20 m/min e que o furo 1, na Fig. 7 (a), com 50 m/min. Estes, entre si, não apresentaram diferenças grandes visualmente. Assim como na broca, na fresa o melhor acabamento foi observado em velocidades mais altas.

(a) Furo 18 ($V_c = 20$ m/min)(b) Furo 9 ($V_c = 20$ m/min)(c) Furo 10 ($V_c = 80$ m/min)(d) Furo 12 ($V_c = 50$ m/min)**Figura 6** - Saída dos furos feitos com broca helicoidal

Pela análise das fibras em ambas as ferramentas, os furos realizados em velocidades de corte mais elevadas, mantendo o mesmo avanço, demonstraram uma qualidade de corte das fibras superior, evidenciando uma relação positiva entre a velocidade de corte e a melhora na qualidade do processo de usinagem, como observado por Fu e Yao (2022). Isso pode ser porque em velocidades mais baixas, a força de avanço aumenta e essa força de avanço superior aumenta a pressão nas camadas de fibra inferiores gerando uma maior delaminação do material (Heiseli, 2021), o que pode explicar o comportamento da fresa e da broca em relação à diminuição de efeitos de peel-up e push-out com o aumento da velocidade.



(a) - Furo 1 (50mm/s)



(b) Furo 5 (20mm/s)



(c) Furo 7 (20mm/s)



(d) Furo 14 (50mm/s)

Figura 7 - Saída dos furos feitos com a fresa de topo

3.2 Análise quantitativa da delaminação

Os resultados do fator de delaminação na entrada e na saída dos furos para cada condição testada são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados de Fator de delaminação

Ordem	Ferramenta	Vc (m/min)	n (rpm)	Vf (mm/min)	Fd Saída	Fd entrada
1	Fresa de topo	50	1989	199	1,006	1,058
2	Fresa de topo	20	796	80	1,076	1,063
3	Broca 135°	80	3183	318	1,010	1,041
4	Fresa de topo	80	3183	318	1,038	1,043
5	Fresa de topo	20	796	80	1,055	1,082
6	Broca 135°	50	1989	199	1,029	1,058
7	Fresa de topo	20	796	80	1,098	1,058
8	Broca 135°	50	1989	199	1,012	1,107
9	Broca 135°	20	796	80	1,096	1,156
10	Broca 135°	80	3183	318	1,027	1,087
11	Fresa de topo	50	1989	199	1,000	1,060
12	Broca 135°	50	1989	199	1,035	1,095
13	Fresa de topo	80	3183	318	1,033	1,066
14	Fresa de topo	50	1989	199	1,005	1,095
15	Fresa de topo	80	3183	318	1,041	1,106
16	Broca 135°	20	796	80	1,070	1,179
17	Broca 135°	80	3183	318	1,001	1,093
18	Broca 135°	20	796	80	1,052	1,175

A fresa de topo apresentou fator de delaminação médio de 1,039 na saída dos furos, contra 1,070 na entrada. Para a broca helicoidal, o valor de Fd médio na saída foi de 1,036 e 1,110 na entrada.

Através do software Minitab, chegou-se aos gráficos para análise comparativa e comportamental dos resultados.

Na delaminação de entrada (Figura 8), a mudança de ferramenta teve um impacto mais relevante, resultando em menor Fd quando a fresa de topo foi utilizada em comparação com a broca helicoidal, devido à menor pressão específica de corte induzida pela fresa. Isso está alinhado com os resultados do experimento de Hocheng e Dhara (1990), onde a fresa demonstrou uma delaminação menor na entrada em comparação com a broca helicoidal. Isso pode ser atribuído ao design contínuo das lâminas da broca helicoidal, que causou uma ação de puxar as camadas extremas superior e inferior do laminado, resultando em delaminação.

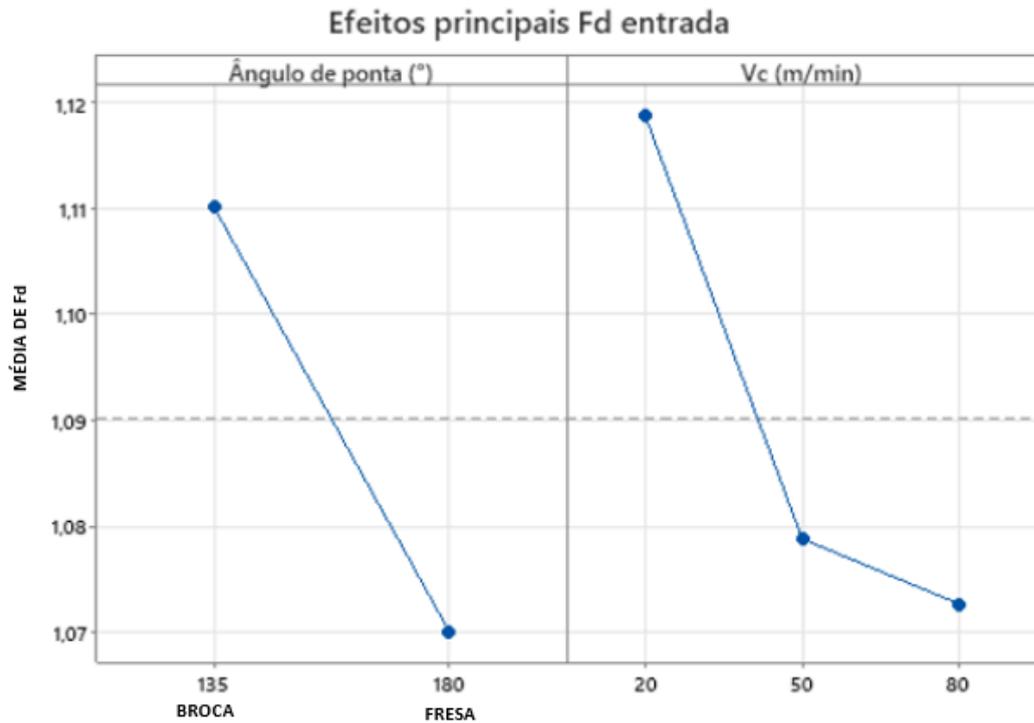


Figura 8 - Gráfico de Efeitos Principais na Entrada

Na análise quantitativa dos resultados de delaminação de saída, apresentada através do gráfico de efeitos principais da Fig. 9, o tipo da ferramenta mostrou-se pouco influente em comparação com a velocidade, que teve uma variação significativamente maior. Davim e Reis (2003), já havia concluído em seu experimento que em para uma taxa de avanço constante, um aumento na velocidade de corte diminui o fator de delaminação (Fd). Isso ocorre porque o aumento da velocidade reduz o tempo de contato da ferramenta, reduzindo o acúmulo de calor, principal causa de danos à matriz do compósito de fibra de carbono e, conseqüentemente, de delaminação. Velocidades mais altas aumentam a taxa de remoção de cavacos, facilitando a dispersão do calor. Isso evita o superaquecimento e contribui para a estabilidade da ferramenta, reduzindo vibrações e potenciais danos ao material e à ferramenta.

Os resultados da interação entre os fatores ângulo de ferramenta e velocidade de corte, permitem uma visão mais completa e precisa de sua influência no fator de delaminação. Na Fig. 10, referente aos dados de delaminação de saída e entrada, respectivamente, observa-se que a broca helicoidal teve o mesmo comportamento na entrada e saída, em que a delaminação diminui com o aumento da velocidade, confirmando a constatação da análise qualitativa dos furos.

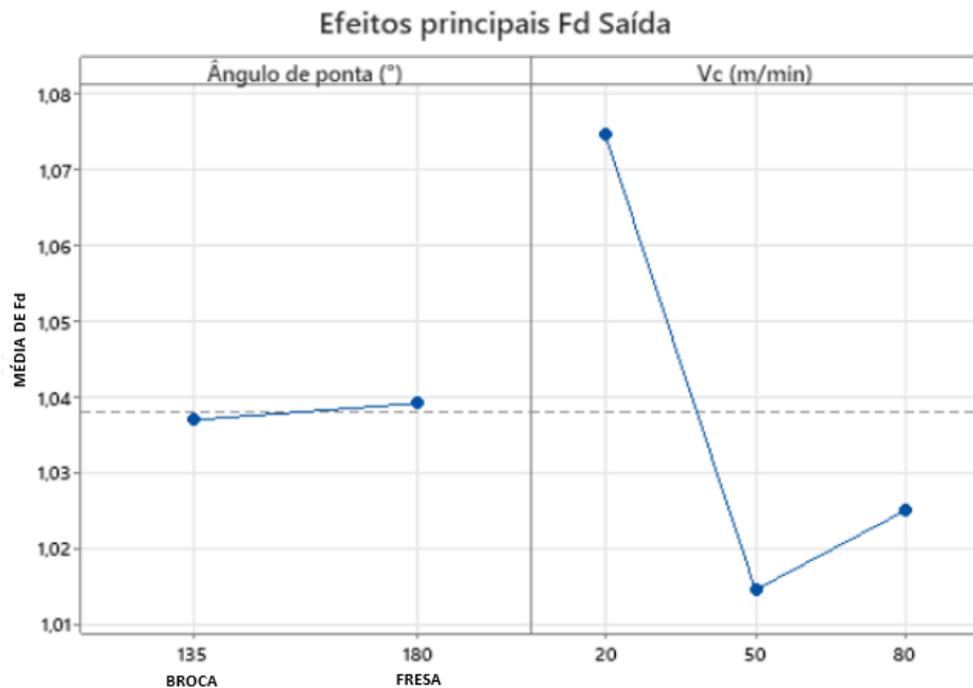
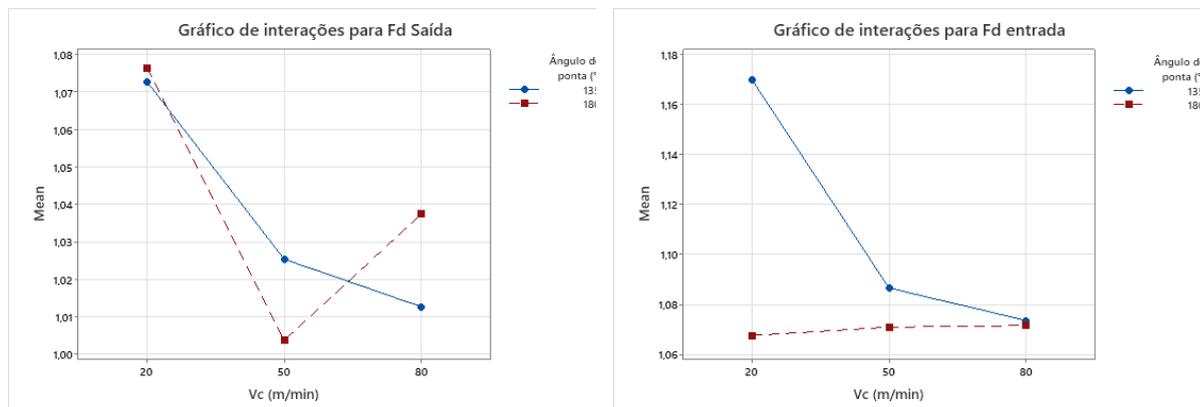


Figura 9 - Gráfico de Efeitos Principais na Saída



(a) Fd Saída

(b) Fd Entrada

Figura 10 - Gráficos de interações

Para a entrada, na fresa, embora o gráfico pareça indicar alguma variação na delaminação em função da velocidade de corte é importante salientar a escala relativamente pequena da variável. Por isso pode-se considerar uma curva praticamente constante. Esse comportamento difere da análise de saída, em que é observada uma tendência qualitativa de diminuição da delaminação com o aumento progressivo da velocidade de corte. A precisão das medidas realizadas em microscópio é limitada à detecção visual de delaminação, por isso os valores médios da delaminação dos furos da fresa podem apresentar um comportamento pontual diferente do seu comportamento total.

3.3. Análise de variância

Nesta seção, realiza-se a análise de variância (ANOVA), através do excel, com o intuito de avaliar a influência de dois fatores principais no experimento, denominados como Fator A e Fator B. O Fator A, representado pela velocidade, possui três níveis distintos (20, 50 e 80 m/min), enquanto o Fator B refere-se ao tipo de ferramenta, apresentando dois níveis, broca helicoidal e fresa de topo, resultando em um delineamento experimental 2 x 3. O objetivo dessa análise é verificar se existem diferenças estatisticamente significativas nas médias dos grupos formados pelos diversos níveis desses fatores (Ribeiro e ten Caten, 2011).

Na análise de variância de Fd de entrada (peel-up), conforme os resultados apresentados na Tabela 4, observou-se que, para um intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), ambos os fatores e sua interação apresentaram significância estatística. Isso indica impacto significativo de cada fator na média da variável dependente, com uma influência combinada não explicável apenas pelos efeitos isolados dos fatores. Em outras palavras, o efeito combinado das ferramentas de corte e das velocidades de usinagem não pode ser totalmente desmembrado em seus componentes individuais, indicando uma dinâmica complexa na resposta do CFRP à usinagem. Uma indicação clara da influência da interação entre as duas variáveis são os comportamentos diferentes observados na Figura 9 para as diferentes ferramentas.

Tabela 4 - Análise de variância dados de entrada

a = 0,05

Fd entrada

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	F tab.	Significância?
A - Vc	0,01	2	0,004	7,02	3,89	SIM
B - Ferramenta	0,01	1	0,007	13,41	4,75	SIM
SQAB	0,01	2	0,004	8,27	3,89	SIM
Erro	0,01	12	0,001			
Total	0,03	17				

Já na análise de variância do fator de delaminação de saída, apenas a velocidade apresentou significância estatística, indicando que esse fator tem um influência relevante na média da variável dependente. Nesse caso a interação com o tipo da ferramenta não foi estatisticamente significativa, sugerindo que, neste contexto, a variação na delaminação de saída pode ser atribuída principalmente às diferentes velocidades.

Tabela 5 - Análise de variância dados de saída

a = 0,05

Fd saída

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	F tab.	Significância?
A - Vc	0,01	2	0,006	28,94	3,89	SIM
B - Ferramenta	0,00	1	0,000	0,09	4,75	NÃO
SQAB	0,00	2	0,001	3,71	3,89	NÃO
Erro	0,00	12	0,000			
Total	0,02	17				

4. CONCLUSÃO

Tanto na análise qualitativa quanto na quantitativa, observou-se que velocidades de corte mais altas resultaram em uma melhora na qualidade do processo de usinagem, com significativa redução na delaminação na maior parte das condições. A baixa velocidade de usinagem causou defeitos maiores, em especial com o puxamento de fibras devido ao aumento do tempo de exposição às forças de corte, maior atrito e deformação plástica do material, além de uma menor dissipação de calor. Isso enfraquece a estrutura e facilita o puxamento das fibras durante a usinagem.

A análise realizada mostrou que o tipo de ferramenta utilizada teve uma influência significativa na delaminação, especialmente na entrada dos furos. Velocidades mais altas foram mais eficazes em reduzir a delaminação em ambas as ferramentas, mas a fresa de topo demonstrou uma vantagem particular em velocidades mais baixas em termos de delaminação de entrada. A fresa de topo demonstrou uma delaminação menor em comparação com a broca helicoidal, provavelmente devido à menor pressão específica de corte induzida pela fresa.

A análise de variância confirmou a importância tanto da velocidade de corte quanto do tipo de ferramenta na delaminação. Além disso, a interação entre esses fatores também foi considerável, indicando uma dinâmica complexa na resposta do CFRP à usinagem.

A fresa de topo operando a uma velocidade de 50m/min demonstrou o melhor desempenho geral, resultando em uma menor delaminação tanto na entrada quanto na saída. Enquanto, ao utilizar a broca helicoidal, os resultados foram mais favoráveis a uma velocidade de 80 m/min, apesar do aumento na delaminação.

Os resultados sugerem que a seleção adequada da velocidade de corte e do tipo de ferramenta pode ser fundamental para minimizar a delaminação durante o processo de usinagem de CFRP, contribuindo para a melhora da qualidade do produto final.

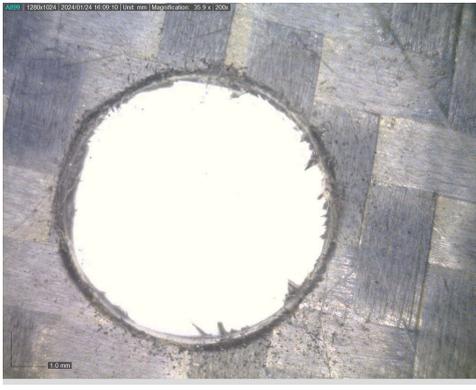
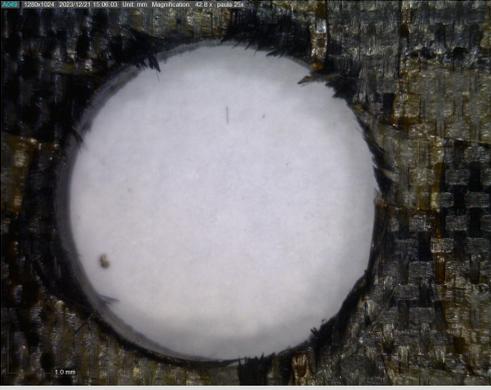
Para pesquisas futuras, recomenda-se investigar o impacto do diâmetro dos furos do suporte na placa de CFRP, bem como analisar o resultado de uma velocidade de corte constante com variação no avanço

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

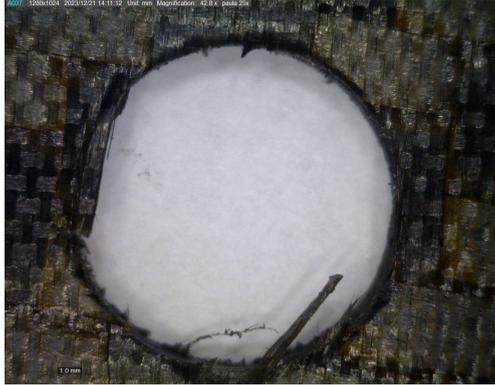
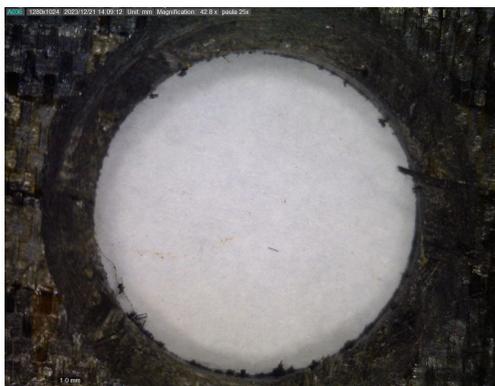
- CHEN, W.-C. (1997). **Some Experimental Investigations in the Drilling of Carbon Fiber-Reinforced Plastic (CFRP) Composite Laminates.** *Int. J. Math. Tools Mlmufaet* (Vol. 37, Issue 8). <[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8)>
- DOS SANTOS, M. Piecha, AMARAL, E., DA SILVA Cabral FRANK, M., & JOÃO DE SOUZA, A. (2023). **Análise Comparativa de Furação em Compósito Reforçado por Fibra de Carbono Utilizando uma Broca Helicoidal e uma Fresa de Topo.** <<https://doi.org/10.26678/abcm.cobef2023.cof23-0028>>
- DAVIM, J. P., & REIS, P. (2003). **Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments.** <[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00257-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00257-X)>
- FERNÁNDEZ-PÉREZ, J., Cantero, J. L., DÍAZ-ÁLVAREZ, J., & MIGUÉLEZ, M. H. (2017). **Influence Of Cutting Parameters On Tool Wear And Hole Quality In Composite Aerospace Components Drilling.** *Composite Structures*, 178, 157–161. <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.043>>
- FU, Y., YAO, X. (2022) **A Review On Manufacturing Defects And Their Detection Of Fiber Reinforced Resin Matrix Composites.** *Composites Part C: Open Access* (Volume 8). <<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100276>>
- GEIER, N., DAVIM, J. P., & SZALAY, T. (2019). **Advanced Cutting Tools And Technologies For Drilling Carbon Fibre Reinforced Polymer (Cfrp) Composites: A Review.** In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 125). Elsevier Ltd. <<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105552>>
- HARUNA, Abubakar Yakubu & WANG, Gong Dong. (2021). **An Experimental Comparative Analysis of Twist Drilling, Helical Milling and Pilot Hole Machining for Large Diameters in CFRPs.** <<https://doi.org/10.4236/oalib.1107205>>
- HEISEL, U., e PFEIFROTH, T. (2012). **Influence Of Point Angle On Drill Hole Quality And Machining Forces When Drilling Cfrp.** *Procedia CIRP*, 1(1), 471–476. <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.084>>
- HOCHENG, H. E DHARA, C.H.K. (1990) **Delamination during Drilling in Composite Laminates.** *Journal of Engineering for Industry*, 112, 236-239. <<https://doi.org/10.1115/1.2899580>>
- PERSSON, E., Eriksson, LNGVAR, & Zackrisson, L. (1997). **Effects Of Hole Machining Defects On Strength And Fatigue Life Of Composite Laminates.** In *Composites Part A* (Vol. 28).<[https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(96\)00106-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(96)00106-6)>
- RIBEIRO, José Luis Duarte & CATEN, Carla Schwengber ten (2011). **Série Monográfica Qualidade Projeto de Experimentos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VIGNESHWARAN, S., UTHAYAKUMAR, M., & ARUMUGAPRABU, V. (2018). **Review on Machinability of Fiber Reinforced Polymers: A Drilling Approach.** *Silicon*, 10(5), 2295–2305. <<https://doi.org/10.1007/s12633-018-9764-9>>

APÊNDICE A

Furo	Entrada	Saída
<p>Furo 9 Broca Vc = 20m/min</p>		
<p>Furo 16 Broca Vc = 20m/min</p>		
<p>Furo 18 Broca Vc = 20m/min</p>		
<p>Furo 2 Fresa Vc = 20m/min</p>		

<p>Furo 5 Fresa Vc = 20m/min</p>	 <p>Micrograph showing the surface of Furo 5, left view. The surface is highly reflective and shows a circular hole. The surrounding material has a woven texture. A 1.0 mm scale bar is visible at the bottom left.</p>	 <p>Micrograph showing the surface of Furo 5, right view. The surface is highly reflective and shows a circular hole. The surrounding material has a woven texture. A 1.0 mm scale bar is visible at the bottom left.</p>
<p>Furo 7 Fresa Vc = 20m/min</p>	 <p>Micrograph showing the surface of Furo 7, left view. The surface is highly reflective and shows a circular hole. The surrounding material has a woven texture. A 1.0 mm scale bar is visible at the bottom left.</p>	 <p>Micrograph showing the surface of Furo 7, right view. The surface is highly reflective and shows a circular hole. The surrounding material has a woven texture. A 1.0 mm scale bar is visible at the bottom left.</p>
<p>Furo 6 Broca Vc = 50m/min</p>	 <p>Micrograph showing the surface of Furo 6, left view. The surface is highly reflective and shows a circular hole. The surrounding material has a woven texture. A 1.0 mm scale bar is visible at the bottom left.</p>	 <p>Micrograph showing the surface of Furo 6, right view. The surface is highly reflective and shows a circular hole. The surrounding material has a woven texture. A 1.0 mm scale bar is visible at the bottom left.</p>
<p>Furo 8 Broca Vc = 50m/min</p>	 <p>Micrograph showing the surface of Furo 8, left view. The surface is highly reflective and shows a circular hole. The surrounding material has a woven texture. A 1.0 mm scale bar is visible at the bottom left.</p>	 <p>Micrograph showing the surface of Furo 8, right view. The surface is highly reflective and shows a circular hole. The surrounding material has a woven texture. A 1.0 mm scale bar is visible at the bottom left.</p>

<p>Furo 12 Broca Vc = 50m/min</p>		
<p>Furo 1 Fresa Vc = 50m/min</p>		
<p>Furo 11 Fresa Vc = 50m/min</p>		
<p>Furo 14 Fresa Vc = 50m/min</p>		

<p>Furo 3 Broca Vc = 80m/min</p>		
<p>Furo 10 Broca Vc = 80m/min</p>		
<p>Furo 17 Broca Vc = 80m/min</p>		
<p>Furo 4 Fresa Vc = 80m/min</p>		

<p>Furo 13 Fresa Vc = 80m/min</p>		
<p>Furo 15 Fresa Vc = 80m/min</p>		