

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

ANÁLISE DE RUGOSIDADE E FORÇAS NO TORNEAMENTO DE POLÍMERO  
REFORÇADO POR FIBRA DE CARBONO

por

Lucas Cantelli Kroeff

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, Maio de 2022

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

KROEFF, LUCAS  
ANÁLISE DA RUGOSIDADE E FORÇAS NO TORNEAMENTO DE  
FIBRA DE CARBONO / LUCAS KROEFF. -- 1.  
31 f.  
Orientador: Heraldo Amorim.

Coorientador: Rodrigo Klein.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 1.

1. Torneamento. 2. Compósito de Fibra de Carbono. 3.  
Rugosidade. 4. Esforços. 5. Ângulo de Fibra. I.  
Amorim, Heraldo, orient. II. Klein, Rodrigo,  
coorient. III. Título.

Lucas Cantelli Kroeff

ANÁLISE DE RUGOSIDADE E FORÇAS NO TORNEAMENTO DE POLÍMERO  
REFORÇADO POR FIBRA DE CARBONO

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

Prof. Cirilo Seppi Bresolin  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Heraldo José de Amorim

Coorientador: Eng. Rodrigo Felipe Klein

Comissão de Avaliação:

Prof. André João De Souza

Prof. Heraldo José De Amorim

Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Porto Alegre, abril de 2022

*Dedico a minha formação a cada um que,  
em maior ou menor grau, colaborou para que  
este momento pudesse um dia se concretizar!*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Deise e Eduardo. Não é fácil colocar em palavras o esforço e o quanto acreditaram em mim durante todos estes anos. Os principais avanços que eu tive até hoje foram com motivação, conselhos e ajuda nas tomadas de decisão recebidas deles.

À Jessica, minha namorada, que participou da parte que julgo a mais difícil da graduação ao meu lado, seu incentivo, a confiança e o entendimento das dificuldades desta fase.

Ao colega e amigo Otávio Pinto, que ajudou muito na escrita do trabalho.

À empresa Consultec – Representações e Comércio Ltda., pelo fornecimento de insertos de usinagem e, principalmente, ao seu representante, Rogério Mendonça, pela consultoria e tempo dedicados à escolha da ferramenta de corte, que foi essencial para adaptar os objetivos à realidade do orçamento disponível.

À empresa Aços Favorit Distribuidora Ltda., especialmente pela Clarice, por ceder insumos para preparação adequada das amostras.

À empresa Carbonstore, pelo fornecimento das amostras com preço especial.

Muito obrigado a todos!

*“Genialidade é 1% inspiração e 99% transpiração”  
Thomas Alva Edison*

Kroeff, Lucas Cantelli. **Análise de Rugosidade e Forças no Torneamento de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono**. 2022. 28 fls. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

## RESUMO

A resistência mecânica, comparável a altas ligas de aço, dureza da fibra acima da encontrada em ligas de titânio, propriedades térmicas diferenciadas, resistência à corrosão, tudo isso combinado com um peso específico menor que o de ligas de alumínio, tornam polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP) materiais de destaque para aplicações nas indústrias aeronáutica e automobilística. No entanto, acabamento superficial irregular e baixo controle dimensional são problemas frequentemente encontrados na fabricação de peças em CFRP, dificultando montagens por interferência, ajustes deslizantes e vedações com este material. Tanto o acabamento superficial quanto o ajuste dimensional podem ser conferidos através de processos de usinagem, o que exige compreensão dos efeitos das variáveis de entrada no resultado. Este trabalho consiste no estudo da influência dos parâmetros de corte nas componentes da força de usinagem e no acabamento superficial gerados no torneamento de amostras de CFRP. Os resultados indicaram pouca influência dos parâmetros de processo sobre as variáveis de saída, sendo o avanço o único parâmetro a afetar a força de avanço ( $F_x$ ), indicando que, dentro da janela operacional estudada, a escolha dos parâmetros de processo pode ser feita com foco na produtividade. Todavia é necessário explorar parâmetros mais agressivos que os utilizados neste estudo para avaliar se é possível otimizar tempo de usinagem, vida útil de ferramenta e rugosidade, possivelmente aumentando a produtividade.

**PALAVRAS-CHAVE:** CFRP, torneamento, acabamento superficial, forças de usinagem.

Kroeff, Lucas Cantelli. **Surface Roughness and Machining Force Analysis in the Carbon Fiber Reinforced Polymer Turning**. 2022. 28 p. Mechanical Engineering End-of-Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

## ABSTRACT

High mechanical strength, comparable to high alloy steels, fibers with a hardness above those observed in titanium alloys, unique thermal properties, corrosion resistance, all these properties combined with a specific weight smaller than aluminum's specific weight, make carbon fiber reinforced polymers (CFRP) a suitable choice for automotive and aeronautical industries. However, irregular surface finish and difficult dimensional control are frequently found problems in the manufacture of CFRP parts, creating hindrances for interference assembly, slipping fits, and seals with these materials. Both surface finish and dimensional adjustment may be achieved through machining processes, which demands understanding the effects of the entrance variables in the result. This work deals with the study of the influence of the machining parameters in the cutting force components and the surface finish resulting from the turning of CFRP samples. The results indicate a small influence of the machining parameters on the result variables, with feed rate being the only machining parameter influencing feed force ( $F_x$ ), indicating that, in the operational window studied, machining conditions may be selected focusing productivity. However, it is necessary to explore more aggressive conditions to determine the possibility of optimizing machining time, tool lives and the roughness of produced parts, increasing productivity.

**KEYWORDS:** CFRP, turning, surface finish, machining forces.



## NOMENCLATURA

### Símbolos

$a_p$	Profundidade de corte	[mm]
$f$	Avanço	[mm/volta]
$v_c$	Velocidade de corte	[m/min]
$F_x$	Força de avanço	[N]
$F_y$	Força de corte	[N]
$F_z$	Força passiva	[N]
$R_a$	Rugosidade média	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_t$	Rugosidade total	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	Rugosidade média parcial	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_{max}$	Rugosidade pico a vale	[ $\mu\text{m}$ ]

### Símbolos gregos

$\omega$	<i>Fiber angle</i> (ângulo de malha)	[ $^\circ$ ]
----------	--------------------------------------	--------------

### Abreviaturas e acrônimos

ANOVA	Análise de Variância
BBD	<i>Box-Behnken Design</i>
CFRP	<i>Carbon fiber reinforced polymer</i> (polímero reforçado por fibra de carbono)
DOE	<i>Design of Experiments</i> (projeto de experimentos)
PCD	<i>Polycrystalline diamond</i> (diamante policristalino)
RSM	<i>Response Surface Methodology</i> (metodologia da superfície de resposta)
WC	Carboneto de Tungstênio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>1</b>
2.1	CFRP .....	1
2.1.1	Comportamento mecânico e térmico do CFRP .....	2
2.2	FORMAÇÃO DE CAVACO E MECANISMOS DE FALHA.....	4
2.3	FORÇA DE USINAGEM .....	5
2.4	RUGOSIDADE.....	5
2.5	PROJETO DE EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA .....	6
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>6</b>
3.1	EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS .....	6
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	8
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>9</b>
4.1	FORÇAS DE USINAGEM .....	9
4.2	RUGOSIDADE.....	11
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>15</b>
	<b>ANEXO .....</b>	<b>18</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>19</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Conforme aumenta a demanda por materiais de alta performance em termos da relação peso/resistência mecânica, o uso de compósito polimérico reforçado por fibra de carbono (CFRP) tem aumentado significativamente. A alta tensão de escoamento, dureza, resiliência, e baixo peso específico, aliados à possibilidade de orientar a malha e as fibras dentro da matriz polimérica do compósito para obter maior resistência em determinada orientação, são questões de alto valor para aplicação em engenharia. Porém, devido à dificuldade de processamento posterior para obtenção de ajustes e acabamentos, principalmente se forem empregados métodos não convencionais de usinagem como corte a laser e corte com jato d'água [ASHRAFI, et al., 2014], nem sempre é possível obter as tolerâncias e acabamentos necessários em aplicações que exijam ajustes específicos, como vedações ou montagens por interferência, o que motiva a pesquisa desenvolvida.

Este estudo dá continuidade ao desenvolvido por Klein (2021), que investigou as janelas de operação para o torneamento de corpos de prova cilíndricos de CFRP. A partir dessa investigação preliminar, foi executada uma análise experimental para identificar a influência dos principais parâmetros de processo sobre as componentes da força de usinagem e o acabamento superficial resultante do torneamento, buscando aumentar a compreensão sobre o torneamento de CFRP, além de definir os parâmetros de processo ótimos em termos de esforços e acabamento superficial.

Ao aplicar os conceitos básicos de torneamento ao CFRP são encontrados desafios para a definição de intervalos e conjuntos de valores ideais para a velocidade de corte ( $v_c$ ), a profundidade de corte ( $a_p$ ) e o avanço ( $f$ ) em função da ferramenta escolhida, visto que, pela usinagem de CFRP não ser uma técnica amplamente utilizada na indústria, não é uma tarefa trivial selecionar parâmetros com base em tabelas e livros como seria feito ao usinar aços SAE, por exemplo.

Portanto, com base em janelas operacionais já previamente abordadas por outros autores (vide APÊNDICE A), um conjunto de valores máximos e mínimos para  $v_c$ ,  $a_p$  e  $f$  é proposto a fim de obter dados sobre a influência dos principais parâmetros de processo sobre as componentes da força de usinagem (força de avanço  $F_x$ , força de corte  $F_y$  e força passiva  $F_z$ ) e o acabamento superficial (perfis e parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$ ) resultantes do torneamento longitudinal externo, com o objetivo de gerar um processo de usinagem controlado e otimizado com relação a custo de ferramenta, material e tempo de usinagem visando atingir os menores níveis de rugosidade com a menor variação entre os resultados possível.

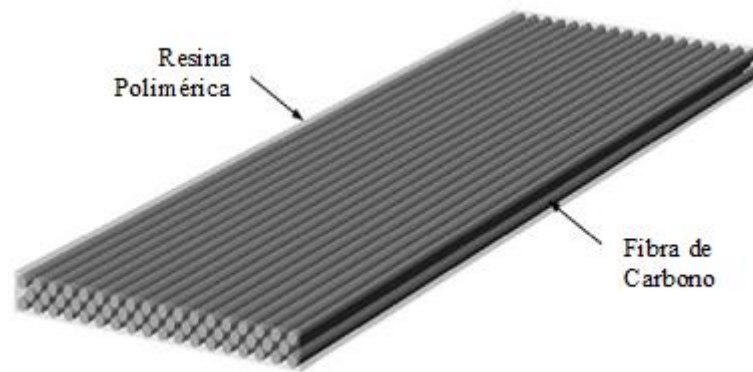
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CFRP

O CFRP é um material compósito que consiste em um tecido bidirecional composto de nano fibras de carbono agrupadas em milhares de unidades formando um cabo, que no tecido base abordado neste trabalho (T300) pode ser 1k, 3k, 6k e 12k, sendo  $k$  o número de nano fibras agrupadas por cabo, em milhares. Esses cabos definem a malha bidirecional, que ao ser embebida em resina polimérica (.Figura 1), ganha uma estrutura na qual as fibras suportam a carga principal, enquanto a resina atua como uma matriz que agrupa as fibras no arranjo desejado [LIU et al. 2015].

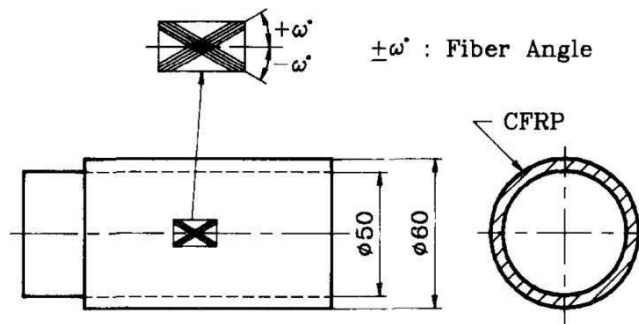
O ângulo de malha ( $\omega$ ) é o principal ângulo a ser considerado na amostra de CFRP para operações de torneamento e furação [XU e JIN, 2021]. A compreensão da influência de  $\omega$  no suporte de esforços da barra é essencial, visto que diversos fabricantes oferecem produtos de dimensões e materiais similares, mas com diversas orientações para suportar diferentes conjuntos de cargas (torcionais, flexionais, de cisalhamento e de tração). A Figura 2 ilustra o ângulo entre as fibras do tecido de carbono do produto final. Amostras produzidas através do método *filament winding* são geralmente produzidas com ângulos em “v” entre as fibras devido ao enrolamento destas em torno de um tubo (semelhante ao enrolamento de rolos de barbante) [KIM et al., 1992].

.Figura 1 – Estrutura do material compósito.



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2015).

Figura 2 – Ângulo de Malha.



Fonte: Kim et al. (1992).

Conforme investigado experimentalmente por Kim et al. (1992), para  $\omega$  de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ , a vida da ferramenta de corte diminui com os aumentos de  $v_c$  e  $\omega$ . Segundo os autores, para  $\omega = 0^\circ$ , o corte é ortogonal, mas à medida em que  $\omega$  aumenta, as fibras são cortadas de forma mais oblíqua, aumentando, conseqüentemente, as forças de usinagem e introduzindo mais efeitos de dobra nas fibras, o que é indesejado tanto para o acabamento quanto para o estado final da peça. A taxa de desgaste foi mais acentuada para  $\omega = 45^\circ$ , com o ângulo entre fibras sendo o principal fator de influência sobre o desgaste.

### 2.1.1 Comportamento mecânico e térmico do CFRP

Xu e Jin (2021) utilizaram o critério de falha de Von Mises para a propriedade plástica e o comportamento elasto-plástico da matriz de epóxi presente no compósito de CFRP foi analisado e definido através de ensaios de tensão-deformação, gerando a Eq. 1 [XU e JIN, 2021],

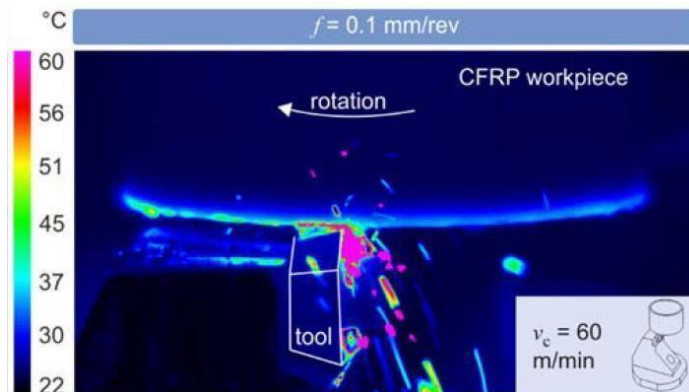
$$\sigma = \frac{E \cdot \varepsilon}{(1 - D) \bar{\sigma}} \quad (1)$$

onde  $\sigma$  é a tensão sofrida pela matriz de epóxi,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $\varepsilon$  é a deformação,  $\bar{\sigma}$  é a tensão correspondente ao estado não deformado e  $D$  é o fator de degradação, que vai de zero no início do ponto de dano permanente a um após a falha completa.

Sendo a distribuição de calor ao longo da peça e da ferramenta de corte, e seus efeitos na resposta do diagrama tensão-deformação, um fator importante para a análise do comportamento de CFRP em usinagem, foi consultado o estudo de Zimmermann et al. (2016). Os autores citam

que enquanto a maior parte da energia mecânica é convertida em calor durante o corte de metal devido à deformação plástica na peça e ao atrito com a ferramenta, no torneamento de CFRP, a peça é ligeiramente deformada plasticamente. As imagens térmicas captadas (Figura 3) mostram que a temperatura no contato peça-ferramenta fica em torno de 60 °C. Esse fenômeno pode ser atribuído pelo fato de o calor na peça ficar concentrado em um volume relativamente pequeno devido ao baixo coeficiente de condutividade térmica, conforme afirma Klein (2021).

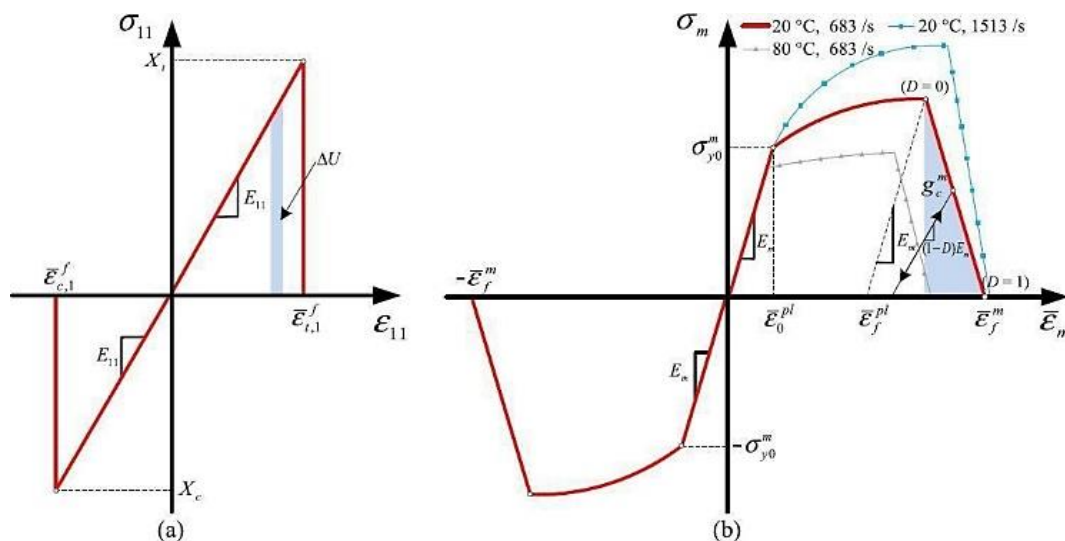
Figura 3 – Incremento de temperatura durante o torneamento de CFRP.



Fonte: Adaptado de Zimmermann et al. (2016).

Yan et al. (2019) estudaram os mecanismos de dissipação térmica no torneamento ortogonal de CFRP de malha unidimensional e constataram que as taxas de deformação variaram entre  $10^2$  e  $10^6 \text{ s}^{-1}$ , sendo observado que a variação de temperatura durante o corte ortogonal ficou em torno de 60 °C, o que não representa problema algum para a manutenção das propriedades mecânicas do material, visto que Stankovic et al. (2021) constaram que para temperaturas de até 360 °C o corpo de prova de CFRP manteve até 50% da tensão limite de ruptura à temperatura ambiente. Todavia, os efeitos da taxa de deformação e temperatura na matriz epóxi foram consideradas também. A Figura 4a mostra a resposta sob tensão uniaxial e compressão na direção longitudinal da fibra de carbono isolada, mantendo a temperatura fixa e a Figura 4b o comportamento da matriz epóxi sob tensão uniaxial e compressão em diversas temperaturas e taxas de aplicação de carga.

Figura 4 – Resposta da curva tensão-deformação: (a) na direção longitudinal da fibra de carbono isolada e temperatura fixa. (b) na matriz epóxi em diferentes cargas e temperaturas.



Fonte: Yan et al. (2019).

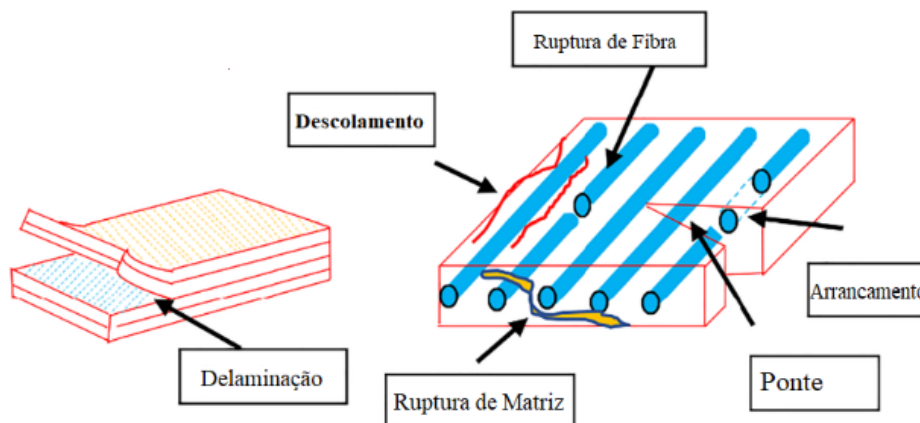
Pela Figura 4a, no regime elástico, o módulo de elasticidade da matriz se mantém inalterado, independentemente da temperatura para as três condições avaliadas. No entanto, o material se comportou de maneira bastante diferente no regime plástico: enquanto o aumento da taxa de aplicação de carga resultou num aumento da resistência da matriz polimérica, a resistência do material foi severamente reduzida quando a temperatura foi aumentada de 20 °C para 80 °C.

Tal comportamento de falha total quando a matriz de epóxi perde completamente a capacidade de tolerar carga teve seu mecanismo simulado e observado por Fu et.al. (2022) ao analisar a furação da junta híbrida Ti-6Al-4V/CFRP: quando o sentido de furação foi “metal  $\Rightarrow$  compósito”, a fase metálica acabou penetrando a fase do CFRP, causando a ruptura da matriz epóxi.

## 2.2 FORMAÇÃO DE CAVACO E MECANISMOS DE FALHA

Conforme Pervaiz et. al (2020), as formas mais comuns de falha do CFRP são a delaminação, o descolamento e a ruptura da matriz, o rompimento e arrancamento das fibras e a formação de vãos no material. A Figura 5 ilustra estes mecanismos.

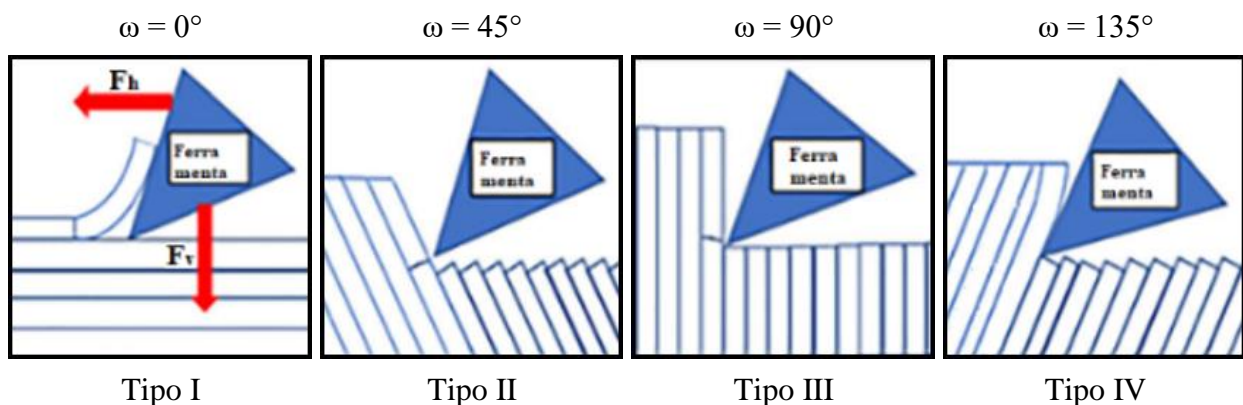
Figura 5 – Principais mecanismos de falha ao furar CFRP.



Fonte: Adaptado de Pervaiz et al. (2020).

A Figura 6 representa a forma de interação entre a ferramenta, as componentes horizontal ( $F_h$ ) e vertical ( $F_v$ ) da força de usinagem e o ângulo de malha  $\omega$ . Para matérias bidirecionais (90° e 0°) os mecanismos de interação material-ferramenta esperados são os do tipo I e III (delaminação e corte das fibras).

Figura 6 – Interação ferramenta-peça no corte de CFRP



Fonte: Adaptado de Pervaiz et al. (2020).

## 2.3 FORÇA DE USINAGEM

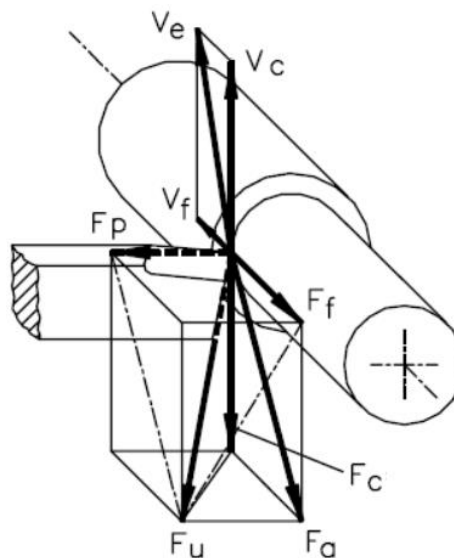
A força de usinagem ( $F_u$ ) é um parâmetro fundamental para projetar uma máquina-ferramenta, pois é a partir dela que se determina a quantidade de potência necessária no sistema, ou seja, é a força de usinagem que fornece a informação para o dimensionamento do motor de acionamento do eixo-árvore da máquina [MACHADO et al., 2015].

De acordo com Ferraresi (1970) e Machado et al. (2015), as três componentes básicas da força de usinagem são:

- Força de avanço ( $F_f$ ): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço ( $v_f$ ).
- Força de corte ( $F_c$ ): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte ( $v_c$ ).
- Força passiva ( $F_p$ ): é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.
- Força ativa ( $F_a$ ): é a resultante das forças  $F_f$  e  $F_c$  na direção efetiva, dada pela velocidade efetiva ( $v_e$ ).

A Figura 7 ilustra as componentes da força de usinagem em torneamento.

Figura 7 – Decomposição da força de usinagem no torneamento cilíndrico externo



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015)

As componentes  $F_f$ ,  $F_c$  e  $F_p$  são facilmente determinadas, pois elas agem em direções conhecidas ( $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente). Dinamômetros, principalmente, à base de cristais piezoelétricos ou extensômetros elétricos, são utilizados para este fim. Dessas componentes, a força de corte é a de maior importância na usinagem, uma vez que ela é responsável pela maior parcela da potência de usinagem [MACHADO et al., 2015]. Além disso, a força de corte é influenciada diretamente pelos parâmetros de corte (principalmente  $f$  e  $a_p$ ) e pelo desgaste da ferramenta.

## 2.4 RUGOSIDADE

Se não for feita uma escolha otimizada para as condições de entrada na usinagem de materiais com baixa usinabilidade haverá uma tendência natural de obtenção de acabamentos abaixo do ideal. Segundo Astakhov (2011), além de ser um importante requisito de projeto, o acabamento superficial, em algumas aplicações, pode ser considerado um indicador da qualidade

da usinagem e a avaliação numérica da rugosidade pode ser uma forma de quantificá-lo.

Machado et al. (2015) citam que a rugosidade descreve os erros ou imperfeições microgeométricos inerentemente gerados através da ação de corte, podendo ser representada por diferentes parâmetros de corte. A distribuição de rugosidades nada mais é do que um conjunto de picos e vales distribuídos acima ou abaixo de uma linha média da superfície medida, sendo esta realizada geralmente através de uma agulha com ponta diamantada de um rugosímetro. A rugosidade média ( $Ra$ ) fornece a média aritmética das distâncias entre a linha média e os picos e vales do perfil, medidos no comprimento de medição ( $l_m$ ). Apesar deste parâmetro ser recomendado para operações de usinagem devido à produção de sulcos bem orientados, o  $Ra$  apresenta algumas desvantagens, como o fato de valores de vales ou picos atípicos não serem percebidos, o que pode ser importante principalmente em outras formas de usinagem. Há casos em que se necessitam informações adicionais da condição superficial da peça e, portanto, os maiores valores de picos e vales podem representar um bom indicador. Nestes casos pode-se utilizar a rugosidade total ( $Rt$ ) obtida pela distância do maior pico ao maior vale no comprimento de medição. Conforme Carpinetti et al. (1996) em algumas situações é mais importante obter informações sobre a altura das irregularidades (i.e., pico-a-vale) ao invés de obter apenas a altura média fornecida por  $Ra$ . Para esse caso, vários são os parâmetros usados: o mais comum,  $Rmax$ , corresponde à distância vertical entre os pontos mais baixos e mais altos do perfil dentro do comprimento de medição. O valor de  $Rmax$  pode, entretanto, ser alterado substancialmente pela presença de um único risco ou partícula de sujeira sobre o comprimento de medição. Já o  $Rz$  corresponde à média dos cinco maiores picos e cinco maiores vales, ao longo do comprimento de medição. Segundo o mesmo autor a ondulação ou textura secundária é o conjunto das irregularidades causadas por vibrações ou deflexões do sistema de produção ou ainda por tratamento térmico e a rugosidade pode apresentar-se sozinha ou superposta à ondulação (inscrita).

## 2.5 PROJETO DE EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Segundo Larson et al. (2004), o projeto de experimentos (DOE) é um processo de planejamento experimental que foi criado para que dados apropriados possam ser coletados e usados em futuras análises estatísticas, resultando em conclusões válidas e objetivas, permitindo melhorias significativas nas experimentações em usinagem.

Conforme Hoffmann (2021) destacou, o objetivo do DOE é encontrar uma correlação entre a variável de resposta (força de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade etc.) e os fatores controláveis de entrada (velocidade de corte, profundidade de corte, avanço, etc.). É necessário levar em consideração todos os fatores essenciais, os quais são variados simultaneamente. Os fatores que não podem ser controlados no experimento são chamados de fatores de ruído e são responsáveis pelo erro experimental, variabilidade residual ou variância do erro [WALPOLE, 2009]. De acordo com Ferreira et al. (2007) existem diferentes metodologias DOE, como a matriz de Doehlert (DM), o Projeto Composto Central (CCD) e o Box-Behnken Design (BBD).

O BDD constitui uma classe de experimentos rotativos ou quase rotativos de segunda ordem baseados em experimentos fatoriais incompletos de três níveis com ponto central para dispersão, o que equivale a três experimentos  $2^2$  com mais um ponto central [BOX e BEHNKEN, 1960].

A análise de variância (ANOVA) avalia a significância dos efeitos dos fatores controláveis e suas interações, permitindo avaliar se os efeitos identificados na aquisição dos dados podem ser extrapolados para a população [BOX et al., 1978].

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS



Amostras de fibra de carbono de uso representativo na indústria foram obtidas a fim de atender ao requisito do trabalho. Através de um fabricante local, foi obtido um cilindro oco (tubo) de CFRP com as medidas e especificações conforme a Tabela 1. Com o propósito de comparar o comportamento esperado do CFRP com outros materiais comumente utilizados na indústria e pesquisa, foram compiladas pelo autor (APÊNDICE B) algumas características-chave de vários materiais representativos de Engenharia e os três principais tecidos de fibra de carbono (T300, T700 e T800), sendo o T300 o utilizado na malha do corpo de prova principal.

Conforme Jinjiuyi (2020), Sonelastic (2019), ArcelorMittal. (2015), Fort Wayne Metals (2022), Beam it (2020), ASM (2015), Huachuang-Al (2020) e MatWeb (2022), a fibra de carbono em isolado apresenta dureza e resistência à tração diversas vezes superior aos outros materiais comuns e representativos de Engenharia analisados, como o aço SAE 1045, as principais ligas de alumínio estrutural e de componentes mecânicos, a liga de titânio Ti 6Al-4V, fato que deverá ser levado em conta na escolha da ferramenta e dos parâmetros de corte, além de possuir rigidez equivalente à do aço SAE 1045 e menor peso específico que as ligas de alumínio.

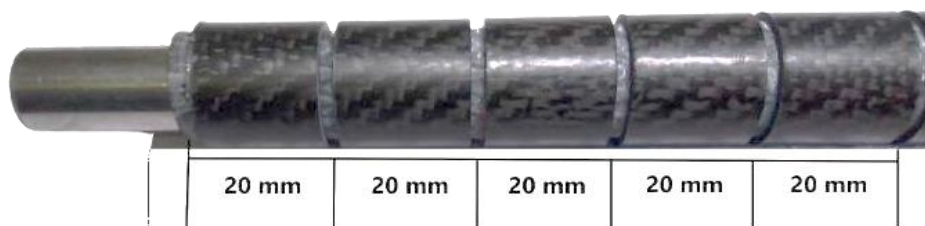
Tabela 1 – Características da amostra de CFRP

Diâmetro externo (mm)	20,5
Diâmetro interno (mm)	14
Comprimento (mm)	450
Fio	T300 - 3K
Trama	Sarja 2x2
Resistência	Bidirecional 0°/90°
Material da resina	Epóxi à base de Bisfenol A
Gramatura	240 g/m <sup>2</sup>
Material utilizado	Fibra de Carbono Pré-Impregnada (Prepeg)
Matriz polimérica termofixa	Resina Epóxi
Processo	Moldagem por compressão

Fonte: O autor.

Uma vez definido o material, foi necessário preparar o corpo de prova (CP). Para aumentar a rigidez do CP, permitindo a fixação no torno entre placa e ponto, e evitar danificar o tubo de CFRP durante o aperto na placa, foi produzida uma alma interna de 14 mm de diâmetro, fabricada com aço SAE 1045 trefilado, além de um anel externo, fabricado em nylon, para fixação na placa. Para evitar folgas entre a alma e o tubo, envolveu-se a primeira com uma fina camada de fita teflon. O anel de nylon foi fabricado com 20,5 mm de diâmetro interno e 25 mm externo, e permitiu fixar a parte central do corpo de prova na placa sem danificar as amostras. Foram executados rasgos transversais no torno convencional ROMI I-20 com bedame a fim de facilitar a entrada e saída da ferramenta e separar fisicamente as amostras a serem usinadas. Devido à quantidade de material disponível, foram fabricadas 19 amostras com 20 mm de comprimento (Figura 8).

Figura 8 – Corpo de prova com as amostras prontas para o experimento.



Fonte: O autor.

A experimentação foi executada no torno CNC Mazak Quick Turn Nexus 100-II utilizando o inserto KORLOY tipo TNMG160408-HA, classe H01, para aços não ferrosos. Por ser do tipo triangular, dupla face e possuir seis arestas de corte, o inserto foi selecionado por possuir o melhor custo por aresta. Para possibilitar as execuções dos passes utilizando uma aresta de corte nova em cada uma das 15 amostras necessárias ao BBD, foram adquiridos três insertos idênticos.

A medição de forças foi obtida com uso do dinamômetro piezelétrico Kistler 9129A, com um condicionador de sinais Kistler 5070A. A aquisição de dados foi feita com uma placa Measurement Computing PCIM-DAS1602/16. Foram usados 5000 pontos por segundo e foram extraídos os valores médio e desvio padrão amostral de cada componente ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) em cada passe.

Para obtenção dos perfis de rugosidade e medição dos parâmetros  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$  das amostras foi utilizado o rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201P com resolução de 0,01  $\mu\text{m}$ . Foram realizadas medições em três pontos equidistantes espaçados 120° cada no meio longitudinal de cada amostra. Para analisar a rugosidade e a ondulação na superfície foi utilizado o microscópio digital USB Dino-Lite Pro modelo AM413-ZT com ampliação de 50x.

### 3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Klein (2021) observou os resultados de diversos autores sobre a usinagem de CFRP e sugeriu a execução de ensaios compilando os limites dos parâmetros executados por outros autores, variando os três parâmetros mais relevantes para o estudo (ANEXO A). O objetivo inicial era executar exatamente os parâmetros propostos por ele. Porém, ensaios com ferramentas revestidas de diamante policristalino (PCD) foram descartados por questões de custo. Devido à baixa variação de geometrias e ângulos de ferramentas disponíveis no mercado, não foi possível encontrar opções viáveis de ferramental para variar o ângulo de folga ( $\alpha$ ), mantendo os outros inalterados. Portanto, optou-se por variar outro parâmetro ao invés de  $\alpha$  e variá-lo entre 3 níveis (mínimo, médio e máximo), de forma que pudesse ser aplicado um projeto de experimentos com três parâmetros em três níveis cada, e então analisá-lo estatisticamente. O parâmetro que veio a substituir a geometria da ferramenta foi o avanço ( $f$ ) visto que o recomendado por Klein (2021) era mantê-lo fixo em 0,1 mm/volta por questões de preservação de ferramentas de corte. A configuração final escolhida está descrita na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros selecionados para os ensaios.

Parâmetro	Mínimo (-1)	Médio (0)	Máximo (+1)
Velocidade de corte $v_c$ (m/min)	50	100	150
Profundidade de corte $a_p$ (mm)	0,4	0,8	1,2
Avanço $f$ (mm/volta)	0,05	0,1	0,15

Fonte: O autor.

A escolha dos valores para  $a_p$  baseou-se no valor do raio de ponta do inserto (50, 100 e 150% do raio de ponta). Com os parâmetros e limites definidos, partiu-se para a escolha do DOE mais adequado levando em conta os recursos disponíveis.

Neste trabalho foi selecionado o experimento de Box-Behnken que resultou em 15 ensaios dos quais 12 destes se destinam à combinação dos valores máximos ou mínimos de dois dos parâmetros e o valor médio da outra variável, enquanto os três restantes se referem à interação dos valores médios dos três fatores. Tal projeto de experimentos foi escolhido devido à sua maior relação custo-benefício de implementação quando comparado aos demais projetos, por permitir um menor número de experimentos, mantendo os resultados satisfatórios [GABINESKI, 2020; BAUMGAERTNER FILHO E GONZALEZ, 2017; GARCIA et al., 2019].

Os passes foram aleatorizados através da ferramenta Minitab®21 e depois dispostos por ordem

crecente de  $a_p$  no software Excel para posicionar os ensaios de profundidade igual lado a lado, de forma a não haver contato não intencional entre ferramenta e peça e com isso foi criada a coluna ordem, que indica a ordem de ensaio. O desgaste de flanco foi monitorado em todas as 15 arestas de corte utilizadas, sem nenhum desgaste perceptível/relevante identificado. Hoffmann (2021) não observou desgaste significativo na broca de metal duro sem revestimento durante a furação de CFRP com o uso de ar comprimido como refrigerante, mesmo após a realização de 180 furos. Isso mostra que o desgaste da ferramenta ao usinar CFRP pode, em muitos casos, ser menor que o esperado diante da abrasividade do material.

Para a otimização dos resultados foi utilizada a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), que é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas para modelar e analisar as variáveis de resposta e buscar fatores controláveis otimizados [MONTGOMERY, 2013].

A ANOVA (análise de variância) indica de forma objetiva as variáveis controláveis que exerceram maior influência sobre as variáveis de resposta durante os ensaios. Na análise das forças foi avaliada a força média nos três eixos ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) em função das três variáveis de entrada revela que o fator é significativo, isto é, que tem forte influência na variável de resposta; quanto menor for o valor-p, maior será a influência. Para efeito de análise, considerou-se também que o fator é parcialmente significativo quando  $0,05 < \text{valor-p} < 0,10$ , ou seja, possui um intervalo de confiança entre 90 e 95%.

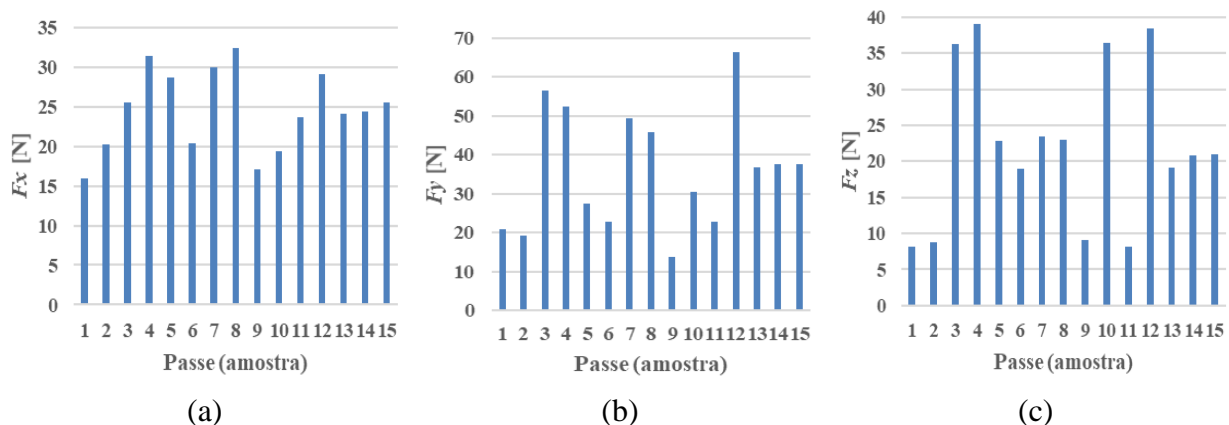
## 4 RESULTADOS

O APÊNDICE C apresenta os valores médios das componentes da força de usinagem ( $F_x$  representa a força de avanço,  $F_y$  a força de corte e  $F_z$  a força passiva) e dos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$  para os 15 passes definidos no BBD.

### 4.1 FORÇAS DE USINAGEM

A Figura 9 apresenta gráficos de colunas para  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ , respectivamente. Observa-se que houve tanto uma variação menor quanto valores menores para  $F_x$  se comparado a  $F_y$  e  $F_z$ , e isto é comprovado no APÊNDICE C através da observação da média e do desvio padrão das componentes das forças.

Figura 9 – Gráficos de colunas para as componentes de  $F_u$ : (a) avanço; (b) corte; (c) passiva.



Fonte: O autor.

Ao analisar a ANOVA dos valores médios das forças em relação às variáveis de entrada,

constatou-se que somente a componente de avanço ( $F_x$ ) foi influenciada de forma estatisticamente significativa por uma das variáveis de entrada. A Tabela 3 apresenta os valores da ANOVA para  $F_x$ . Observa-se que o efeito quadrático do avanço foi o parâmetro de influência mais significativa sobre a força de avanço, possuindo um p-valor = 0,042, e uma contribuição de 21%.

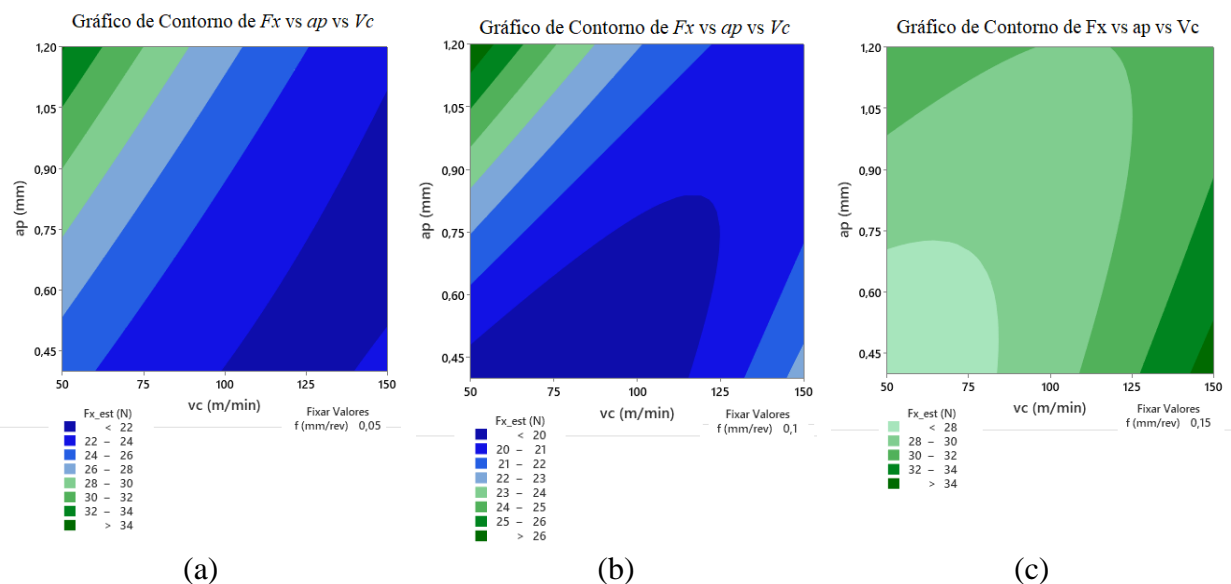
A Figura 10 apresenta os gráficos de contorno gerados para  $F_x$ . Com  $f$  mínimo, o incremento de  $v_c$  tende a reduzir  $F_x$ , enquanto o aumento de  $a_p$  causa o crescimento de  $F_x$ . Para  $f$  mais alto, há uma tendência de formação de zona estável favorecendo valores mais baixos de  $v_c$  e  $a_p$ . Tal fenômeno pode haver relação com a temperatura, dado que com  $f$  baixo, valores mais altos de  $v_c$  causariam um aquecimento da zona de corte e favoreceriam o processo. Com  $f$  mais alto, o calor gerado não faria diferença, ao menos até que  $v_c$  atingisse um valor elevado o suficiente para afetar significativamente as propriedades do material.

Tabela 3 – Resultados da ANOVA para  $F_x$ .

Fator	Valor-P	Contribuição
$v_c$	0,608	1%
$a_p$	0,423	2%
$f$	0,148	8%
$v_c \times v_c$	0,51	1%
$a_p \times a_p$	0,768	0%
$f \times f$	0,042	21%
$v_c \times a_p$	0,335	3%
$v_c \times f$	0,267	4%
$a_p \times f$	0,673	1%
Erro	-	14%
Falta de ajuste	0,32	11%
Erro puro	-	3%
$R^2$	-	74,4%

Fonte: O autor.

Figura 10 – Gráfico de contorno de  $F_x$  em função de  $v_c$  e  $a_p$  para: (a)  $f = 0,05$  mm/volta; (b)  $f = 0,1$  mm/volta; (c)  $f = 0,15$  mm/volta.



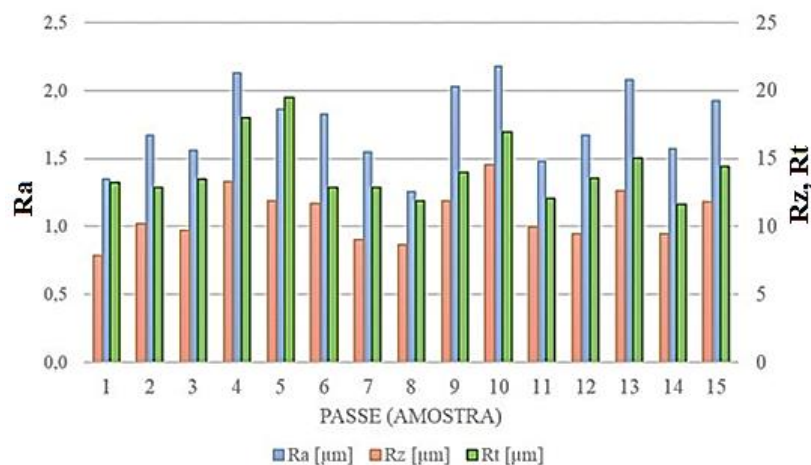
Fonte: O autor.

Os resultados das análises de variância para  $F_y$  e  $F_z$  são apresentados no APÊNDICE D. Em ambos os casos, o erro puro obteve a maior contribuição, sem nenhum p-valor menor que 0,05 e com um  $R^2$  menor que 75%.

## 4.2 RUGOSIDADE

No presente estudo foram avaliados a rugosidade média ( $Ra$ ), a rugosidade média parcial ( $Rz$ ) e a rugosidade total ( $Rt$ ) em função das variáveis de entrada. Os resultados obtidos para os passes 1 a 15 são apresentados na Figura 11. As análises de variância realizadas não indicaram influência significativa de nenhum dos parâmetros de processo ou mesmo de suas interações sobre a rugosidade e comportamentos semelhantes foram encontrados para  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$ .

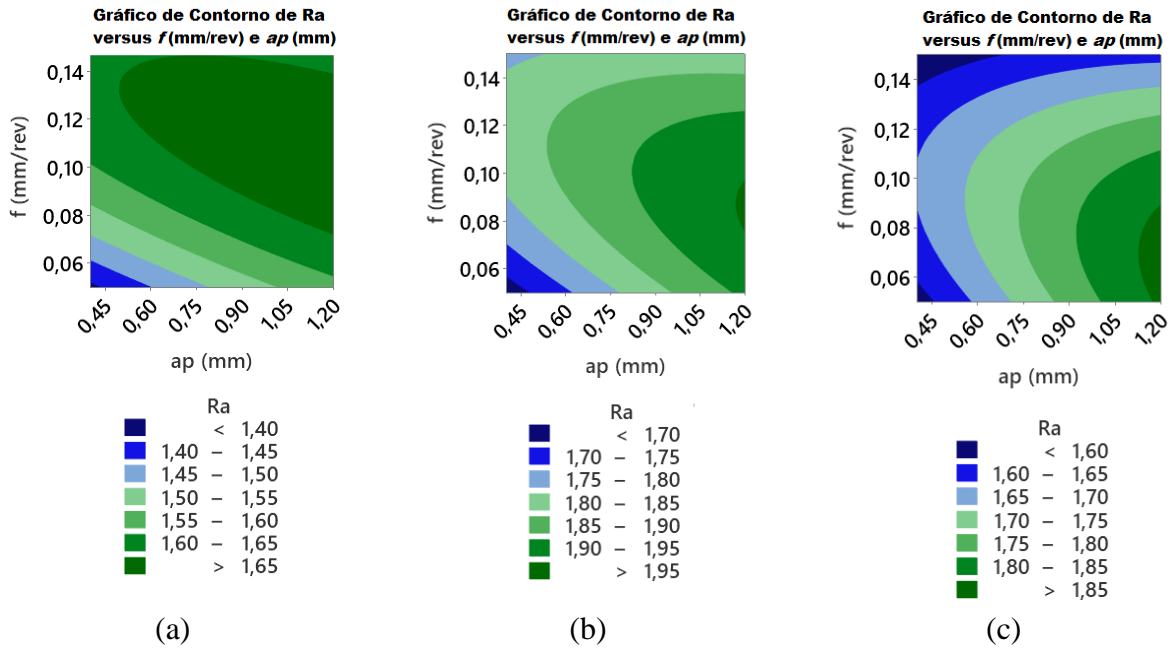
Figura 11 – Resultados de rugosidade para os passes 1 a 15.



Fonte: O autor

Conforme o gráfico evidencia, o comportamento dos valores de  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$  segue uma variação semelhante, excetuando alguns picos de  $Rt$ , o que permite analisar somente  $Ra$  como sendo representativa dos demais parâmetros. A Figura 12 apresenta os gráficos de contorno de  $Ra$  em função de  $a_p$  e  $f$  para os três níveis avaliados de  $v_c$ .

Figura 12 – Gráfico de contorno de  $Ra$  em função de  $a_p$  e  $f$  para: (a)  $v_c = 50$  m/min; (b)  $v_c = 100$  m/min; (c)  $v_c = 150$  m/min.

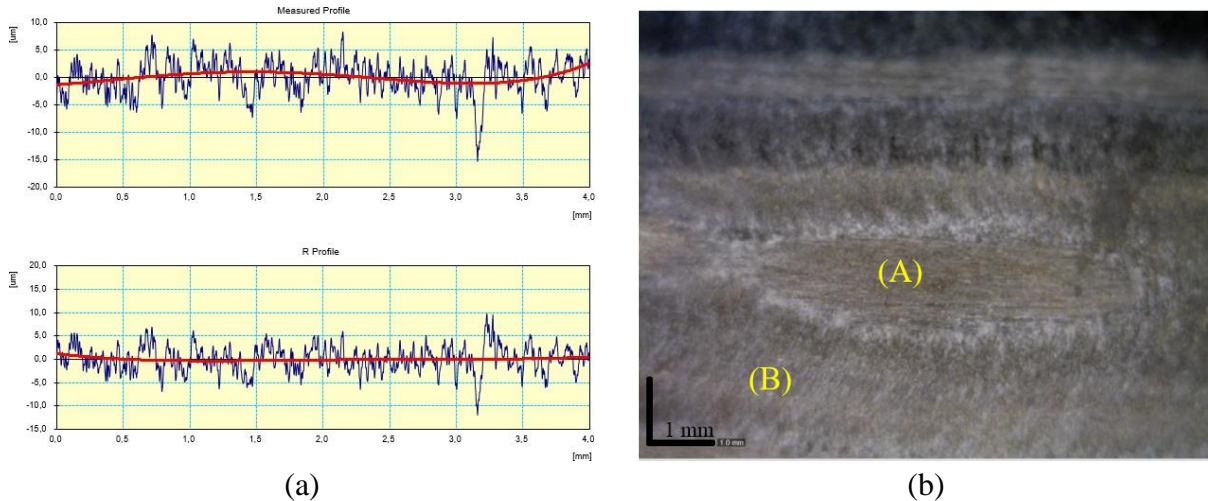


Fonte: O autor

Nota-se que o aumento de  $Ra$  ocorre de forma aparentemente linear com o aumento de  $a_p$ , mas de forma quadrática em relação a  $f$  em todos os valores testados de  $v_c$ . A rugosidade aumenta com o aumento de  $f$  até atingir um máximo com  $a_p$  máximo e  $f$  médio e então passa a diminuir com o avanço de  $f$ . Este comportamento é semelhante ao encontrado por Rajasekaran et al. (2012). Os pontos de inflexão de  $f$  em que a rugosidade atinge o valor máximo são aproximadamente iguais a 0,14 mm/volta (Figura 12a); 0,90 mm/volta (Figura 12b) e 0,80 mm/volta (Figura 12c).

Ainda é possível fazer uma aproximação de quais são os valores máximos e mínimos para a rugosidade, destacando as amostras com maior e menor valores de rugosidade do APÊNDICE C. Os passes que geraram acabamentos superficiais considerados ruins nas amostras segundo os critérios considerados foram os passes 10, 4 e 13. A Figura 13 apresenta o perfil de rugosidade com menor ondulação e a morfologia da superfície usinada medido dentro do grupo de pior acabamento (amostra 4, medida 1). O perfil com maior ondulação observado dentro do grupo (amostra 4, medida 2) é apresentado na Figura 14.

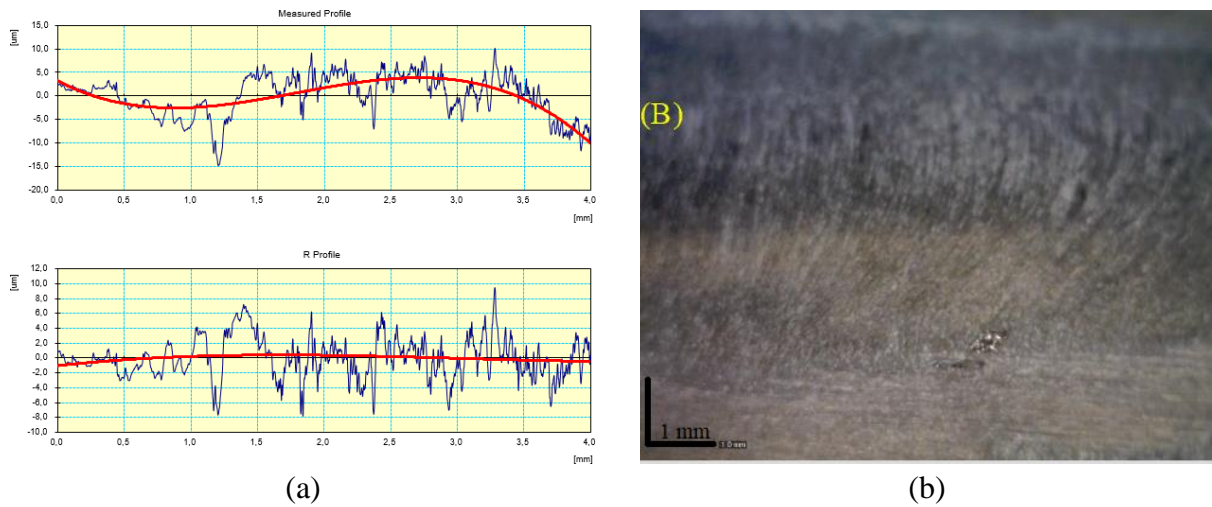
Figura 13 – Amostra gerada pelo passe 4 ( $v_c = 100$  m/min,  $a_p = 0,4$  mm,  $f = 0,15$  mm/volta), medida 1: (a) perfil de rugosidade; (b) imagem do microscópio.





Fonte: O autor

Figura 14 – Amostra gerada pelo passe 4 ( $v_c = 100$  m/min,  $a_p = 0,4$  mm,  $f = 0,15$  mm/volta), medida 2: (a) perfil de rugosidade; (b) imagem do microscópio.

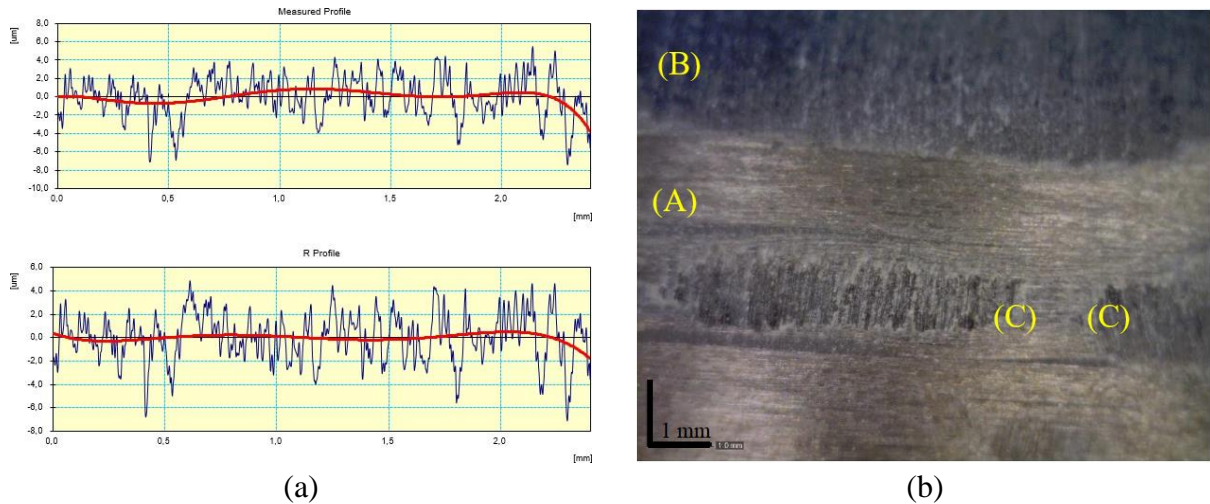


Fonte: O autor.

Ao comparar os perfis de rugosidade com as imagens de microscópio na Figura 13 e na Figura 14, nota-se uma possível causa para maiores e menores ondulações, representadas pela linha vermelha, e variações na rugosidade. Isto provavelmente se deve à separação/desfiamento dos componentes do material, resultando em espaços vazios entre fibras, visto que com este efeito a camada mais superficial das fibras se torna uma malha unidirecional de espaçamento de centésimos de milímetros. As zonas foram denominadas de lisa (A) e filamentar interrompida (B). A Figura 13b mostra uma zona A que foi o provável caminho percorrido pelo apalpador (*pick-up*) que gerou o perfil (Figura 13a) e uma zona B com maior irregularidade, mas que provavelmente não foi interceptada pela agulha apalpadora. No caso da Figura 14b só é perceptível a zona B, portanto a agulha obrigatoriamente percorreu este tipo de zona, o que ocasionou o perfil de rugosidade de alta ondulação presente na Figura 14a. A diferença de superfície e de perfil de rugosidade/ondulação provavelmente se dá por esta diferença entre as zonas destacadas.

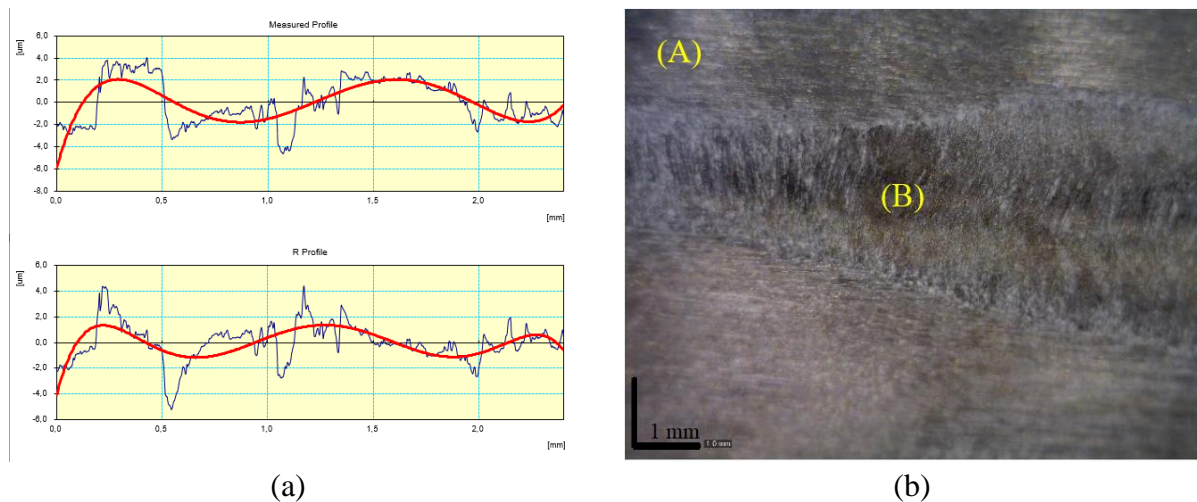
As amostras que apresentaram bons acabamentos superficiais segundo os critérios considerados foram aquelas geradas pelos passes 8, 1 e 11. A Figura 15 apresenta o perfil de rugosidade com menor ondulação dentro do grupo considerado (amostra 11, medida 1) e a respectiva imagem da superfície, enquanto a Figura 16 apresenta o perfil com a maior ondulação (amostra 11, medida 2).

Figura 15 – Amostra gerada pelo passe 11 ( $v_c = 100$  m/min,  $a_p = 0,8$  mm,  $f = 0,15$  mm/volta), medida 1: (a) perfil de rugosidade; (b) imagem do microscópio.



Fonte: O autor

Figura 16 – Amostra gerada pelo passe 11 ( $v_c = 100$  m/min,  $a_p = 0,8$  mm,  $f = 0,15$  mm/volta), medida 2: (a) perfil de rugosidade; (b) imagem do microscópio.



Fonte: O autor.

Ao submeter as amostras dos passes de menor rugosidade à comparação entre perfil de rugosidade, ondulação e imagem no microscópio, é evidenciado novamente uma possível relação entre o caminho percorrido pela agulha do apalpador nas fibras e as ondulações registradas pelo rugosímetro. Conforme a Figura 15b evidencia, pode-se destacar três diferentes zonas: a primeira mais íntegra, com orientação visível de  $0^\circ$  (A), a segunda uma superfície extremamente interrompida, com filamentos de fibras e/ou matriz suspensa com vãos entre filamentos (B), e a terceira uma zona de mudança de orientação de malha ( $90^\circ - 0^\circ - 90^\circ$ ), provavelmente devido à variação de espessura de camada da malha “prepeg” ao ser enrolada na fabricação (C). Vale ressaltar que a matriz polimérica de resina epóxi reflete a luz com intensidade muito maior que os conjuntos de fibras de carbono. Portanto, onde aparece material esbranquiçado ou reflexo da luz há predominância de matriz polimérica. Na Figura 16b observa-se com mais clareza as zonas A e B de mesmo tipo das apresentadas na Figura 15b, mas com efeito da separação na B mais proeminente.

Após a execução dos passes e o processamento dos dados, os resultados obtidos no presente trabalho foram comparados com os obtidos por diversos autores sobre a usinagem de CFRP. Esta compilação está presente no APÊNDICE A.



## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram avaliadas as forças de usinagem e o acabamento da superfície usinada no torneamento de amostras de CFRP. A partir dos resultados experimentais, é possível concluir que:

- foi observada pouca influência dos parâmetros de processo sobre as forças de corte e passiva e sobre a rugosidade;
- o efeito quadrático do avanço mostrou influência significativa sobre a força de avanço;
- não se observou desgaste significativo nas arestas de corte da ferramenta;
- a análise dos perfis de rugosidade e das imagens das superfícies das amostras indica forte variação dentro da mesma amostra possivelmente devido a efeitos da medição sobre matriz e fibra, além do efeito de delaminação e rompimento da matriz polimérica;
- baixa rugosidade média se comparada a resultados obtidos por outros estudos, conforme apresenta o APÊNDICE A, mesmo levando em conta a forma como o CFRP foi fabricado.

Como sugestão para trabalhos futuros, fica a execução dos ensaios programados por Klein (2021) com diferentes geometrias de ferramenta, com medição de temperatura durante os ensaios e uso da câmera de alta velocidade, visando maior aprofundamento sobre a resposta do material a condições extremas de torneamento.

## 6 REFERÊNCIAS

- ARCELOR MITTAL, **Guia do Aço**, Piracicaba, São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/pdf/produtos-solucoes/catalogos/catalogo-guia-aco.pdf?asCatalogo=pdf>>. Acesso em 04 de Abril de 2022.
- ASHRAFI, S. A., Sharif, S., Farid, A. A.; Yahya, M. Y. “Performance evaluation of carbide tools in drilling CFRP-Al stacks”. **Journal of Composite Materials**, v. 48, p. 2071-2084, 2014.
- ASM, **7000 Series Aluminum Alloy**, Aerospace Specification Metals Inc., 2015. Disponível em: <<https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma7075t6>>. Acesso em 04 de Abril de 2022.
- ASTAKHOV, V.P. **Modern Machining Technology - A Practical Guide**. p. 22-55, Cambridge. Woodhead Publishing, 2011.
- BAUMGAERTNER FILHO, A.J; GONZALEZ, A.R. “Estudo dos parâmetros de polaridade negativa na soldagem MIG/MAG polaridade variável para revestimento”. **Soldagem & Inspeção**, v. 22, n. 1, p. 46-58, 2017.
- Beam it. **Titanium 20Ti6Al4V Datasheet**, Forno di Taro, Itália, 2020. Disponível em <[https://www.3t-am.com/sites/threeT/files/Titanium%20Ti6Al4V\\_Datasheet.pdf](https://www.3t-am.com/sites/threeT/files/Titanium%20Ti6Al4V_Datasheet.pdf)>. Acesso em 04 de Abril de 2022.
- BOX, G. E., Hunter, W. H., e HUNTER, S. **Statistics for Experiments**. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- CARPINETTI L. C. RIBEIRO, FILHO E. V. GONÇALVES, PORTO A. J. VIEIRA, JASINEVICIUS R. C. **Rugosidade Superficial** UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA, V.1, n.1, p. 3 – 21, 2020,
- DOLD, C.; HENERICHS, M.; BOCHMANN, L.; WEGENER, K. “Comparison of ground and laser machined polycrystalline diamond (PCD) tools in cutting carbon fiber reinforced plastics (CFRP) for aircraft structures”. **Procedia CIRP**, v. 1, p. 178-183, 2012.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, São Paulo: Edgard Blucher, 1970.

- FERREIRA, S. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., e Dos Santos, W. N. L. “Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods”. **Analytica Chimica Acta**, v. 597, n. 2, p. 179-186, 2007.
- FORT WAYNE METALS, **Ti 6Al-4V ELI**, Fort Wayne, Indiana, Estados Unidos, 2022. Disponível em: <<https://fwmetals.com.br/materials/titanium/ti-6al-4v-eli/>>. Acesso em 04 de Abril de 2022.
- FU, Q.; WU, S.; LI, C.; XU, J.; & WANG, D. “Delamination and chip breaking mechanism of orthogonal cutting CFRP/Ti6Al4V composite”. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 73, p. 183-196, 2022.
- GABINESKI, Henrique A. **Influência da Utilização de Nanofluido à Base de Grafeno Multicamadas no Acabamento Gerado por Fresamento Frontal em Aço Hardox® 450**, Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2021.
- GARCIA, R.F., FEIX, E.C., MENDEL, H.T.; GONZALEZ, A.R.; SOUZA, A.J. “Optimization of cutting parameters for finish turning of 6082-T6 aluminum alloy under dry and RQL conditions”. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, A. 317, 2019.
- HENERICHS, M.; VOSS, R.; KUSTER, F.; WEGENER, K. “Machining of carbon fiber reinforced plastics: influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces”. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v. 9, p. 136-145, 2015.
- HOFFMANN, Nicholas. **Avaliação do Acabamento na Usinagem de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono Utilizando Ar Comprimido Refrigerado como Meio de Arrefecimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, 2021.
- HUACHUANG-AL, **6000 Series Aluminum Sheet Plate**, Jinan, Província de Shandong, China, 2020. Disponível em: <[https://www.hcaluminum.com/prodcat/6000-series-aluminum-sheet-plate/?gelid=CjwKCAjw\\_tWRBhAwEiwALxFPob9Vj1oapHPzXLUwgHdE3BjD8\\_0b8jAFj\\_0KrtSeT4pVbfRIZ0IAmRoCmB0QAvd\\_BwE](https://www.hcaluminum.com/prodcat/6000-series-aluminum-sheet-plate/?gelid=CjwKCAjw_tWRBhAwEiwALxFPob9Vj1oapHPzXLUwgHdE3BjD8_0b8jAFj_0KrtSeT4pVbfRIZ0IAmRoCmB0QAvd_BwE)>. Acesso em 04 de Abril de 2022.
- Jinjiuyi. **What's the difference between T300 T700 and T800 carbon fiber?** Shenzhen, China, 2020. Disponível em: <<https://www.jinjiuyi.net/news/difference-between-t300-t700-and-t800-carbon-fiber.html>>. Acesso em 04 de Abril de 2022.
- KIM, K. S.; LEE, D. G.; KWAK, Y. K.; NAMGUNG, S. “Machinability of carbon fiber-epoxy composite materials in turning”. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 32, p. 553-570, 1992.
- KLEIN, Rodrigo F. **Study of Chip Formation Mechanism in CFRP Turning**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2021.
- LIU, Y.; ZWINGMANN, B.; SCHLAICH, M. “Carbon fiber reinforced polymer for cable structures: A review”. **Polymers**, v. 7, p. 2078-2099, 2015.
- MACHADO, Á.R; ABRÃO, A.M; COELHO, R.T; SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3.ed., São Paulo: Edgard Blucher, 2015.
- MatWeb, **Overview of materials for Epoxy/Carbon Fiber Composite**, 2019. Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=39e40851fc164b6c9bda29d798bf3726>>. Acesso em 04 de Abril de 2022.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, 2013.
- PERVAIZ, S., KANNAN, S., HUO, D., & MAMIDALA, R. “Ecofriendly inclined drilling of carbon fiber-reinforced polymers (CFRP)”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 111, p. 2131-2137, 2020.

- RAJASEKARAN, T.; PALANIKUMAR, K.; VINAYAGAM, B. K. “Turning CFRP composite with ceramic tool for surface roughness analysis”. **Procedia Engineering**, v. 38, p. 2922-2929, 2012.
- SAUER, K.; HERTEL, M.; FICKERT, S.; WITT, M.; PUTZ, M. “Cutting parameter study of CFRP machining by turning and turn-milling”. **Procedia CIRP**, v. 88, p. 457-461, 2020.
- SONELASTIC, **Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson de Materiais Metálicos Ferrosos**, 2019. Disponível em: <<https://www.sonelastic.com/pt/fundamentos/tabelas-propriedades-materiais/metais-ferrosos.html>>. Acesso em 04 de Abril de 2022.
- STANKOVIC, D., BISBY, L. A.; TERRASI, G. P. “Influence of temperature on the mechanical performance of unidirectional carbon fiber reinforced polymer straps”. **Materials**, v. 14, n. 8, A. 1903, 2021.
- WALPOLE, R. E. **Probabilidade & Estatística para Engenharia e Ciências**. Pearson Prentice-Hall, 2009.
- XU, X.; JIN, X. “3-D finite element modeling of sequential oblique cutting of unidirectional carbon fiber reinforced polymer”. **Composite Structures**, v. 256, p. 113-127, 2021.
- YAN, X.; REINER, J.; BACCA, M.; ALTINTAS, Y.; VAZIRI, R. “A study of energy dissipating mechanisms in orthogonal cutting of UD-CFRP composites”. **Composite Structures**, v. 220, p. 460-472, 2019.
- ZIMMERMANN, M.; HEBERGER, L.; SCHNEIDER, F.; EFFGEN, C.; AURICH, J. C. “Investigation of chip formation and workpiece load when machining carbon-fiber-reinforced-polymer (CFRP)”. **Procedia Manufacturing**, v. 6, p. 124-133, 2016.

**ANEXO**

ANEXO A – Tabela de parâmetros propostos por Klein (2021).

Tabela 4 – Ensaios propostos por Klein (2021)

Material da ferramenta	Parâmetro	Mínimo	Médio	Máximo
Carboneto de Tungstênio (WC)	Velocidade de corte (m/min)	50	100	150
	Profundidade de corte (mm)	0.5	1.0	1.5
	Ângulo de folga ( $\alpha$ ) (°)	7°	-	21°
Diamante Policristalino (PCD)	Velocidade de corte (m/min)	200	400	600
	Profundidade de corte (mm)	0.5	1.0	1.5
	Ângulo de folga ( $\alpha$ ) (°)	7°	-	21°

Fonte: Adaptado de Klein (2021).

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Parâmetros e resultados obtidos por diversos autores sobre a usinagem de CFRP.

Tabela 5 – Parâmetros e resultados obtidos por diversos autores

Parâmetros	Henerichs (2015)	Sauer (2020)	Kim (2021)	Rajasekaran (2012)	Zimmerman (2016)	Dold (2012)	Hoffman (2021)	O autor
$\theta$ (°)	0, 30, 60, 90, 150	15	-	-	45, 135	30, 90, 150	90/0°	90/0°
$v_c$ (m/min)	90	100	25 - 30	100, 200, 300	20, 40, 60, 80, 100	200	25, 50,75 (furar) 120 (fresar)	50, 100, 150
$f$ (mm/volta)	0,30	0,05 - 0,20	0,11	0,05 - 0,15	0,025 - 0,40	0,1	0,025; 0,050; 0,075 (furar) 0,07, 0,14, 0,21 (fresar)	0,05; 0,10; 0,15
$a_p$ (mm)	5	0,1; 0,4; 0,6	0,2	0,5 - 1,50	-	1	0,6; 1,0;1,4 (fresar)	0,4; 0,8; 1,2
$\gamma$ (°)	0 - 30	5	6	-	0	0	-	15
$\alpha$ (°)	7, 14 e 21	7	-	-	15	7	-	6
Material da ferramenta	WC	WC	WC	Cerâmica	WC	PCD	WC	WC
Fenômeno avaliado	Superfície Forças Desgaste de ferramenta	Superfície Forças	Superfície Desgaste de ferramenta	Superfície	Formação do cavaco Temperatura	Desgaste de ferramenta	Rugosidade	Rugosidade Forças
Tipo de inserto	C	Inserto para fresa	T	-	-	-	Fresa e Broca	T
$Ra$ ( $\mu$ m)	-	12	1,4	1,73	-	9,5	6,0	1,74
Desgaste da ferramenta	0,05mm	-	0,7 mm $v_c = 134$ (m/min)	-	-	intenso	não observado	não observado

Adaptado de Klein (2021).

APÊNDICE B – Tabela comparativa das principais características constitutivas dos principais materiais de construção mecânica.

Tabela 6 – Comparativo de materiais representativos de engenharia.

Propriedades	Aço normalizado e laminado a quente		Liga de Al		Liga de Ti	CFRP		
	SAE 1020	SAE 1045	6061	7075-T6	Ti-6Al-4V	T300	T700	T800
Dureza Vickers (HV)	117	171	> 101	158	300	772	772	772
Modulo de Elasticidade (GPa)	207	207	68,9	71,7	105	227	227	294
Resistência à tração (GPa)	0,38	0,57	0,31	0,572	0,86	3,53	4,90	5,88
Alongamento máximo (%)	25	16	12 - 17	11	10	1,3	2,1	2
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	7,8	7,8	2,7	2,81	4,41	1,76	1,8	1,8

Fonte: Adaptado de Jinjiuyi (2020), Sonelastic (2019), ArcelorMittal. (2015), Fort Wayne Metals (2022), Beam it (2020), ASM (2015), HUACHUANG-AL (2020) e MatWeb (2022).

## APÊNDICE C – Variáveis de resposta em função das variáveis controláveis de entrada.

Tabela 7 – Variáveis de resposta em função das variáveis controláveis de entrada.

Passe	Ordem	Variáveis de Controle			Variáveis de Resposta					
		$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]	$f$ [mm/rev]	$F_X$ [N]	$F_Y$ [N]	$F_Z$ [N]	$R_a$ [ $\mu$ m]	$R_z$ [ $\mu$ m]	$R_t$ [ $\mu$ m]
8	8	150,00	0,80	0,15	32,41	45,76	22,91	1,26	8,66	11,87
1	1	50,00	0,40	0,10	15,99	20,80	8,13	1,35	7,85	13,27
11	15	100,00	0,80	0,10	23,61	22,76	8,22	1,48	9,97	12,05
7	7	50,00	0,80	0,15	29,92	49,44	23,49	1,55	9,04	12,88
3	9	100,00	0,40	0,05	25,54	56,44	36,27	1,56	9,71	13,49
14	10	100,00	1,20	0,05	24,41	37,62	20,79	1,57	9,46	11,66
2	2	150,00	0,40	0,10	20,24	19,25	8,70	1,67	10,24	12,90
12	3	50,00	1,20	0,10	29,14	66,43	38,47	1,67	9,46	13,54
6	6	150,00	0,80	0,05	20,30	22,68	18,99	1,83	11,72	12,87
5	5	50,00	0,80	0,05	28,73	27,56	22,75	1,86	11,89	19,51
15	12	100,00	1,20	0,15	25,46	37,63	20,95	1,93	11,85	14,42
9	13	100,00	0,80	0,10	17,12	13,68	9,04	2,03	11,86	13,98
13	4	150,00	1,20	0,10	24,06	36,84	19,12	2,08	12,63	15,07
4	11	100,00	0,40	0,15	31,42	52,39	39,02	2,13	13,30	18,04
10	14	100,00	0,80	0,10	19,38	30,50	36,35	2,18	14,54	16,93
Média					25,32	32,60	29,85	1,74	10,81	14,17
Desvio Padrão					8,16	16,3	15,7	0,3	1,77	2,16

Fonte: O autor.

APÊNDICE D – Resultados da ANOVA para as forças  $F_y$  e  $F_z$ Tabela 8 – ANOVA para  $F_y$ 

Fator	Valor-P	Contribuição
$v_c$	0,482	3%
$a_p$	0,606	2%
$f$	0,478	3%
$v_c \times v_c$	0,841	0%
$a_p \times a_p$	0,286	8%
$f \times f$	0,267	8%
$v_c \times a_p$	0,482	3%
$v_c \times f$	0,976	0%
$a_p \times f$	0,934	0%
Falta de ajuste	0,122	25%
Erro puro	-	2%
$R^2$	-	49,1%

Tabela 9 – ANOVA para  $F_z$ 

Fator	Valor-P	Contribuição
$v_c$	0,624	2%
$a_p$	0,873	0%
$f$	0,867	0%
$v_c \times v_c$	0,705	1%
$a_p \times a_p$	0,643	2%
$f \times f$	0,403	6%
$v_c \times a_p$	0,552	3%
$v_c \times f$	0,923	0%
$a_p \times f$	0,943	0%
Falta de ajuste	0,557	21%
Erro puro	-	15%
$R^2$	-	28,79%

Fonte: O autor