

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO ACABAMENTO NA USINAGEM DE POLÍMERO REFORÇADO
COM FIBRA DE CARBONO UTILIZANDO AR COMPRIMIDO REFRIGERADO COMO
MEIO DE ARREFECIMENTO

por

Nícholas Hoffmann

Dissertação para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, março de 2021.

AVALIAÇÃO DO ACABAMENTO NA USINAGEM DE POLÍMERO REFORÇADO
COM FIBRA DE CARBONO UTILIZANDO AR COMPRIMIDO REFRIGERADO COMO
MEIO DE ARREFECIMENTO

por

Nícholas Hoffmann
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Lincoln Cardoso Brandão, PPMEC / UFSJ

Prof. Dr. Patric Daniel Neis, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Volnei Tita, DEA-EESC-USP

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 01 de março de 2021.

RESUMO

A utilização de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) tem crescido nas indústrias aeronáutica, automobilística e energética devido às suas excelentes propriedades estruturais. A fabricação de CFRP geram peças com bom acabamento; porém, frequentemente é necessária uma operação de pós-usinagem, como furação e/ou fresamento, e mesmo com recente aumento da usinagem de CFRP, ainda é um processo de fabricação que gera inúmeros defeitos na superfície do material, provocando, em alguns casos, a rejeição do componente. O controle dos parâmetros de corte busca melhorar a condição da superfície usinada e uma possível solução é a diminuição da temperatura durante o processo, buscando diminuir a delaminação e melhorar a qualidade da superfície. Para reduzir a temperatura, a aplicação de ar comprimido refrigerado (ACR) por tubo de vórtice pode ser uma solução simples e efetiva, sem os problemas que ocorrem ao utilizar fluidos de corte convencionais. Assim, este estudo busca verificar a influência dos parâmetros de corte e da aplicação de ACR na qualidade da superfície usinada de uma placa CFRP formada por tecidos bidirecionais de carbono pré-impregnados com resina epóxi orientados a $0^\circ/90^\circ$ nos processos de furação e fresamento. Para o processo de furação avaliou-se a rugosidade da parede dos furos e a delaminação do material na entrada e na saída da ferramenta. Os resultados mostraram que a utilização de ACR gerou menores rugosidades e reduziu a delaminação na entrada do furo em comparação ao corte a seco. No entanto, a delaminação na saída do furo teve influência negativa de ACR. Já no processo de fresamento, a otimização dos parâmetros de corte através do projeto de experimentos de Box-Behnken foi feita a fim de obter os menores valores de rugosidade. Os resultados revelaram que os parâmetros mais influentes sobre a rugosidade foram o efeito quadrático da profundidade de corte axial ($a_p \times a_p$) e o seu efeito combinado com o avanço ($a_p \times f$). A otimização gerou baixos valores de rugosidade e boa qualidade visual na superfície usinada. Por fim, a utilização de ACR na usinagem de CFRP mostrou-se vantajosa na maioria dos casos e, visto que essa não agride o meio ambiente, torna-se atrativa para aperfeiçoar este processo de fabricação.

Palavras-chave: Furação de CFRP; Fresamento de CFRP; Ar comprimido refrigerado; Delaminação; Rugosidade.

ABSTRACT

The use of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) has grown in the aeronautical, automotive, and energy industries due to their excellent structural properties. The manufacture of CFRP generates parts with a good finish; however, a post-machining operation, such as drilling and/or milling, is often necessary and, even with the recent increase in the machining of CFRP, it is still a manufacturing process that generates numerous defects on the surface of the material, causing, in some cases, component rejection. The control of cutting parameters seeks to improve the condition of the machined surface, and a possible solution is to decrease the temperature during the process, seeking to reduce delamination and improve the quality of the surface. To reduce the temperature, applying a cooled compressed air (ACR) by vortex tube can be a simple and effective solution, without the problems that occur when using conventional cutting fluids. Thus, this study aims to verify the influence of cutting parameters and the application of ACR on the machined surface quality of a CFRP plate formed by bi-directional carbon fabrics pre-impregnated with epoxy resin oriented at $0^\circ/90^\circ$ in the drilling and milling processes. The hole wall surface roughness and delamination at the tool's entrance and exit were evaluated for the drilling process. The results showed that the use of ACR generated low roughness values and reduced the delamination at the hole's entrance compared to dry cutting. However, delamination at the hole's exit had a negative influence on the ACR. In the milling process, the cutting parameters optimization through the Box-Behnken design of the experiment was made to obtain the lowest roughness values. The results showed that the most influential parameters on the surface roughness were the quadratic effect of the axial depth of cut ($a_p \times a_p$) and its combined effect with the feed rate ($a_p \times f$). The optimization generated low roughness values and good visual quality on the machined surface. Finally, the ACR machining of CFRP proved to be advantageous in most cases and, since this alternative does not harm the environment, it becomes attractive to improve this manufacturing process.

Keywords: Drilling CFRP; Milling CFRP; Cooled compressed air; Delamination; Surface roughness.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo Geral.....	2
1.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Organização do Trabalho.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Furação.....	5
2.2	Fresamento.....	7
2.3	Compósito Polimérico Reforçado por Fibra de Carbono	9
2.4	Meio Lubrificador	10
2.5	Delaminação	12
2.6	Acabamento da Superfície Usinada	15
2.7	Projeto de Experimentos e Análise dos Dados	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	Corpos de prova	20
3.2	Máquina-Ferramenta e Ferramenta de Corte	22
3.3	Lubrificação	24
3.4	Medição da Delaminação em Furação	25
3.5	Medição da Rugosidade.....	26
3.6	Microscopia Eletrônica de Varredura	27
3.7	Projeto de Experimentos	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1	Furação.....	32
4.1.1	Delaminação	32
4.1.2	Rugosidade.....	33
4.1.3	Análise de Variância.....	34
4.1.4	Discussão dos Resultados	35
4.1.5	Otimização dos Parâmetros de Furação.....	45
4.2	Fresamento.....	46
4.2.1	Rugosidade.....	46
4.2.2	Análise de Variância.....	47
4.2.3	Discussão dos Resultados	47

4.2.4	Otimização	53
5	CONCLUSÕES	55
5.1	Furação.....	55
5.2	Fresamento.....	56
5.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	56
	REFERÊNCIAS.....	58
	APÊNDICES	70
A.1	Determinação dos Fatores Controláveis	70
A.2	Determinação do Fator de Delaminação Ajustado	71
A.3	Valores dos Parâmetros de Rugosidade.....	72
A.4	Efeitos Principais e Interação dos Fatores sobre R_q , R_z e R_t em Fresamento.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Elementos básicos de uma broca helicoidal.....	5
Figura 2.2	Fresamento frontal: (a) avanço por dente (f_z) e avanço por volta (f); (b) profundidade de corte radial (a_e), profundidade de corte axial (a_p) e penetração de avanço (a_f).....	8
Figura 2.3	Esquema de um tubo de vórtice	11
Figura 2.4	Delaminação no material durante a entrada e saída da broca	12
Figura 2.5	Representação de um BBD com três fatores controláveis.	18
Figura 3.1	Esquema de laminação.....	21
Figura 3.2	Corpos de prova utilizados nos experimentos: (a) furação; (b) fresamento.	22
Figura 3.3	Placa polimérica de apoio para furação.	22
Figura 3.4	Centro de usinagem ROMI Discovery 308.....	23
Figura 3.5	Broca CoroDrill 860 H10F NM.....	23
Figura 3.6	Fresa Kennametal classe K600	24
Figura 3.7	Utilização de tubo vórtice para refrigeração do ar comprimido.	24
Figura 3.8	Representação da análise de delaminação.	25
Figura 3.9	Exemplo de mensuração do D_{max} e A_d do furo pelo software ImageJ.....	25
Figura 3.10	Medição da rugosidade da parede dos furos	26
Figura 3.11	Análise das superfícies: (a) preparação; (b) equipamentos. Processo de metalização: (c) equipamento; (d) superfície recoberta.....	27
Figura 4.1	Fator de delaminação ajustado na entrada do 1º e do 10º furo de cada execução.	32
Figura 4.2	Fator de delaminação ajustado na saída do 1º e do 10º furo de cada execução.	33
Figura 4.3	Valores de rugosidade R_a e R_q gerados no primeiro furo de cada combinação.....	33
Figura 4.4	Valores de rugosidade R_z e R_t gerados no 1º furo de cada combinação.....	34
Figura 4.5	Gráficos dos fatores significativos do F_{daE01} na furação: (a) efeitos principais; (b) efeitos de interação dos fatores.	36
Figura 4.6	Gráficos dos fatores significativos do F_{daE10} na furação: (a) efeitos principais; (b) efeitos de interação dos fatores.	36
Figura 4.7	Imagens dos furos da entrada da broca nas execuções 4 (seco) e 13 (ACR) com $v_c = 50$ m/min e $f = 25$ μ m/rev.	38
Figura 4.8	Gráficos dos fatores significativos do F_{daS01} na furação: (a) efeitos principais; (b) efeitos de interação dos fatores.	38

Figura 4.9	Delaminação e fibras não cortadas na saída do 1° furo das execuções com $v_c = 75$ m/min e $f = 75$ μ m/rev.	39
Figura 4.10	Gráfico da influência individual dos fatores no F_{daS10} de cada execução.....	40
Figura 4.11	Gráficos dos fatores significativos de R_a na furação: (a) efeito principal de LC ; (b) efeito de interação $v_c \times LC$	41
Figura 4.12	Gráficos dos fatores significativos de R_q na furação: (a) efeito principal de LC ; (b) efeito de interação $v_c \times LC$	41
Figura 4.13	Gráficos dos fatores significativos de R_z na furação: (a) efeito principal de LC ; (b) efeito de interação $v_c \times LC$	41
Figura 4.14	Gráficos dos fatores significativos de R_t na furação: (a) efeito principal de LC ; (b) efeito de interação $v_c \times LC$	42
Figura 4.15	Textura da parede interna do 1° furo para as condições a seco e com ACR usando $v_c = 50$ m/min e $f = 25$ μ m/rev.	44
Figura 4.16	Varição entre valores máximos e mínimos da rugosidade obtidos do 1° furo da execução 4 (Seco).	44
Figura 4.17	Varição entre valores máximos e mínimos da rugosidade obtidos do 1° furo da execução 13 (ACR).....	45
Figura 4.18	Diferenças nas superfícies das execuções 6 e 15 entre 1° e 10° furo ($v_c = 50$ m/min e $f = 75$ μ m/rev.)	45
Figura 4.19	Valores de R_a e R_q para cada combinação de parâmetros no fresamento.	46
Figura 4.20	Valores de R_z e R_t para cada combinação de parâmetros no fresamento.	47
Figura 4.21	Gráficos dos fatores significativos do R_a no fresamento: (a) efeitos principais; (b) efeito da interação $a_p \times f$; (c) efeito da interação $a_p \times LC$	48
Figura 4.22	Gráficos de superfície de R_a e R_t	49
Figura 4.23	Pontos de inflexão para: (a) R_a ; (b) R_z	50
Figura 4.24	Comparação com diferentes a_{p-R} : (a) MEV da execução 1; (b) perfil de rugosidade da execução 1; (c) MEV da execução 8; (d) perfil de rugosidade da execução 8.....	52
Figura 4.25	Execução com parâmetros otimizados: (a) MEV da superfície; (b) perfil de rugosidade da superfície.....	54
Figura A.1	Gráficos dos fatores significativos de R_q no fresamento: (a) efeitos principais; (b) efeito da interação $a_p \times f$; (c) efeito da interação $a_p \times LC$	74
Figura A.2	Gráficos dos fatores significativos de R_z no fresamento: (a) efeitos principais; (b) efeito da interação $a_p \times f$; (c) efeito da interação $a_p \times LC$	75

Figura A.3 Gráficos dos fatores significativos de R_t no fresamento: (a) efeitos principais; (b) efeito da interação $a_p \times f$; (c) efeito da interação $a_p \times LC$ 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Informações técnicas do material.....	20
Tabela 3.2	Variáveis de resposta	28
Tabela 3.3	Parâmetros do processo.....	29
Tabela 3.4	Fatores controláveis, seus níveis de investigação e fatores mantidos fixos.....	29
Tabela 3.5	Matriz experimental de furação.	30
Tabela 3.6	Matriz experimental de fresamento.....	31
Tabela 4.1	ANOVA dos fatores de delaminação ajustado.	34
Tabela 4.2	ANOVA dos parâmetros de rugosidade na furação.....	35
Tabela 4.3	ANOVA dos parâmetros de rugosidade no fresamento.....	47
Tabela 4.4	Experimento de validação.....	53
Tabela A.1	Determinação dos fatores controláveis de maior interesse de análise na furação.	70
Tabela A.2	Determinação dos fatores controláveis de maior interesse de análise no fresamento.....	70
Tabela A.3	Valores de F_d e F_{da} da entrada e saída dos furos.	71
Tabela A.4	Valores dos parâmetros de rugosidade na furação.....	72
Tabela A.5	Valores dos parâmetros de rugosidade no fresamento.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Ar comprimido
ACR	Ar comprimido refrigerado
ANOVA	Análise de variância (<i>Analysis of Variance</i>)
BBD	Box-Behnken Design
BD	Bidirecional
CFRP	Polímeros Reforçados por Fibra de Carbono (<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>)
CQ	Característica de qualidade
DOE	Projeto de experimentos (<i>Design of Experiments</i>)
GFRP	Polímeros reforçados por fibra de vidro
HSS	Aço-rápido (<i>High-Speed Steel</i>)
LC	Condição de lubrificação
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
RSM	Metodologia de superfície de resposta

LISTA DE SÍMBOLOS

A_d	Área danificada, mm ²
a_e	Penetração de trabalho (profundidade de corte radial), mm
A_{max}	Área correspondente ao diâmetro máximo, mm ²
A_o	Área correspondente ao diâmetro nominal, mm ²
a_p	Profundidade de corte (axial), mm
a_{p-R}	Profundidade de corte (axial) real, mm
a_{p-T}	Profundidade de corte (axial) teórica, mm
A_α	Superfície principal de folga
A_α'	Superfície secundária de folga
A_γ	Superfície de saída
Co	Número de pontos centrais
D_{max}	Diâmetro máximo da zona danificada, mm
D_o	Diâmetro nominal, mm
f	Avanço por volta, $\mu\text{m/volta}$
F_d	Fator de delaminação
F_{da}	Fator de delaminação ajustado
F_{daE}	Fator de delaminação ajustado na entrada
F_{daS}	Fator de delaminação ajustado na saída
f_z	Taxa de avanço por dente, mm
IE	Índice de importância relativa
IE_i	Índice de importância relativa para a variável de resposta i
k	Número de fatores controláveis
l_e	Comprimento de amostragem, mm
l_m	Comprimento de avaliação, mm
N	Número de experimentos
PR	Índice de priorização
R^2	Coefficiente de determinação
R_a	Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade, μm
R_{ij}	Relação entre a variável de resposta i e o parâmetro do processo j
R_{ku}	Fator de achatamento (curtose) do perfil de rugosidade, μm
R_q	Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade, μm
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil de rugosidade, μm
R_t	Altura total do perfil de rugosidade, μm

R_z	Altura máxima do perfil de rugosidade, μm
S	Aresta principal de corte
S'	Aresta secundária de corte
<i>Valor-P</i>	Probabilidade de erro máxima
v_c	Velocidade de corte, m/min
v_e	Velocidade efetiva de corte, m/min
v_f	Velocidade de avanço, mm/min
X	Parâmetro de entrada
Y	Variável resposta
δ	Erro de batimento da ferramenta, μm

1. INTRODUÇÃO

Os polímeros reforçados por fibra de carbono (CFRP) oferecem propriedades estruturais semelhantes ou melhores do que muitos materiais metálicos tradicionais. Devido à sua baixa densidade, a relação entre resistência e peso desses materiais compósitos são muito superiores às dos materiais metálicos [Mallick, 2007], além das suas boas resistências a fadiga e a corrosão [Gao et al., 2016]. Estas excelentes propriedades geram interesses das indústrias aeronáutica, automobilística e energética, as quais são as maiores impulsionadoras dos materiais compósitos e estão focadas no desenvolvimento destes com o objetivo de obter as melhores propriedades com o menor peso possível, para a redução dos custos energéticos e emissão de poluentes para atmosfera [Fu et al., 2018]. Como exemplos, o Boeing 787 Dreamliner e o Airbus A350 possuem 50% do peso em materiais compósitos, a maior parte sendo polímeros reforçados por fibra de carbono [Beaumont et al., 2016]

A fabricação de CFRP geram peças com bom acabamento, porém, frequentemente é necessária uma operação de pós-usinagem, como furação ou fresamento [Sheikh-Ahmad, 2009; Wang et al., 1995b].

A furação é um dos processos de usinagem mais utilizados, pois a maioria dos produtos manufaturados necessitam de um ou mais furos, os quais são dificilmente obtidos no processo de formação da peça bruta, necessitando dessa operação posteriormente [Diniz et al., 2013]. A furação é especialmente necessária quando o material usinado é CFRP, pois permite atender às tolerâncias dimensionais, gerar recursos difíceis de serem obtidos com a moldagem, gerar acabamento às bordas do compósito laminado ou, ainda, gerar furos que permitem a montagem em outras peças, seja em outro compósito ou em um material diferente (ligas de titânio, ligas de alumínio etc.) [Davim, 2013; Krishnaraj et al., 2013]. Um exemplo disso são as aeronaves, as quais podem necessitar mais de 100 mil furos [Abrão et al., 2008], os quais devem ser de boa qualidade, pois danos como delaminação afetam a capacidade de carga das peças fabricadas em CFRP, sua resistência, rigidez e confiabilidade [Durão et al, 2013; Persson et al., 1997].

O fresamento frontal é usado em diversas indústrias, incluindo a aeroespacial e a automotiva, onde a qualidade é um fator importante na produção de ranhuras, moldes e matrizes de precisão. Assim, maior atenção é dada à precisão dimensional e à rugosidade da superfície nos produtos fabricados atualmente [Reddy e Rao, 2005]. Essa demanda por uma boa rugosidade é, especialmente, por causa de seu efeito na aparência, função e confiabilidade do produto [Hamdan et al., 2012]. Além disso, uma superfície usinada de boa qualidade melhora significativamente a resistência à fadiga e à corrosão. Ainda, a qualidade da superfície é útil no diagnóstico da estabilidade do processo de usinagem, onde um acabamento deteriorado pode

indicar não-homogeneidade do material da peça, desgaste progressivo da ferramenta, vibração da ferramenta de corte etc. [Nurhaniza et al., 2016]. Por essas razões, é importante manter as tolerâncias consistentes e rugosidade adequada.

Porém, mesmo com recente aumento da utilização de fresamento em CFRP, ainda é um processo de fabricação que gera inúmeros defeitos na superfície do material [Karataş e Gökkaya, 2018], destacando os defeitos superficiais gerados no processo como o arrancamento de fibras (*fiber pull-out*) e a degradação da matriz, provocando em alguns casos a rejeição do componente, além da delaminação [Wang et al., 2017].

Além disso, outro problema causado é o rápido desgaste da ferramenta de corte devido à baixa condutividade térmica e à natureza abrasiva do material. Lascas e fibras do CFRP agem como partículas abrasivas durante o corte. Assim, o contínuo atrito com a ferramenta de corte gera desgaste abrasivo [Voss et al., 2017]. Esses fenômenos deterioram a qualidade da superfície do material durante a usinagem e reduzem a produtividade devido ao tempo de espera para a troca de ferramenta, gerando aumento nos custos de produção. Reduzir os desgastes da ferramenta e melhorar o acabamento na usinagem desse material são os principais objetivos de muitos pesquisadores [Abrão et al., 2008; Gaugel et al., 2016; Ozkan et al., 2019].

Para diminuir tais danos no material e na ferramenta de corte, alguns autores verificaram que a diminuição da temperatura durante a usinagem pode diminuir a delaminação e melhorar a qualidade da superfície [Abish et al., 2018; Ben et al., 2012], além de prolongar a vida da ferramenta [Koklu e Morkavuk, 2019]. Um método de reduzir a temperatura durante a usinagem é através da aplicação de ar comprimido refrigerado (ACR), porém, resultados variados ainda são encontrados na literatura sobre os seus efeitos na usinagem de CFRP [Abish et al., 2018; El-Hofy et al., 2017; Fu et al., 2018; Khairusshima e Sharifah, 2017].

1.1 Objetivo Geral

Gerar conhecimentos sobre a usinagem de polímeros reforçados por fibra de carbono (CFRP) nos processos de furação e fresamento, em conjunto com a utilização de ar comprimido (AC) e de ar comprimido refrigerado (ACR), comparando com o corte sem utilização de lubrificante (Seco), a respeito da qualidade da superfície usinada.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são diferentes para cada tipo de processo de usinagem, visto que para a furação, o controle da delaminação tem grande importância, enquanto que para o fresamento, o controle da rugosidade tem prioridade.

Processo de Furação:

- analisar a influência do uso de ar comprimido refrigerado (ACR) no acabamento;
- analisar a delaminação gerada pela furação na entrada e na saída da broca do material;
- obter a otimização dos parâmetros de corte.

Processo de Fresamento:

- observar a influência do uso de ar comprimido (AC) e de ar comprimido refrigerado (ACR) no acabamento da superfície fresada;
- obter a otimização dos parâmetros de corte;
- verificar a qualidade da superfície usinada com parâmetros de corte otimizados.

1.3 Organização do Trabalho

A dissertação foi organizada nas sete partes descritas abaixo:

- **Capítulo 1: INTRODUÇÃO**
Contextualização sucinta do tema abordado, apresentando a proposta de maneira breve bem como os objetivos do trabalho.
- **Capítulo 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**
Revisão concisa da literatura sobre os princípios dos processos de furação e fresamento, os compósitos poliméricos reforçados por fibra de carbono, os principais danos causados pelos processos de usinagem nesses materiais, o conceito de ar comprimido refrigerado, e o projeto de experimentos.
- **Capítulo 3: MATERIAIS E MÉTODOS**
Caracterização de materiais, ferramentas, equipamentos e procedimentos utilizados para a execução dos experimentos relativos à furação e ao fresamento frontal de CFRP, além dos instrumentos e métodos utilizados para a análise dos resultados.
- **Capítulo 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES**
Apresentação de resultados e discussões acerca das informações obtidas com os experimentos realizados conforme os procedimentos descritos.
- **Capítulo 5: CONCLUSÕES**
Exposição das principais conclusões relativas às discussões dos resultados gerados de acordo com os objetivos do estudo, bem como sugestões para trabalhos futuros.

- REFERÊNCIAS

Bibliografias citadas no texto que serviram de base para a realização do estudo.

- APÊNDICES

Informações adicionais contendo as tabelas utilizadas para a determinação dos fatores controláveis, os valores obtidos dos fatores de delaminação ajustados gerados na furação, os valores obtidos dos parâmetros de rugosidade e os efeitos dos parâmetros controláveis nas variáveis resposta para o processo de fresamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda a revisão da literatura, a fim de esclarecer tópicos pertinentes a este estudo. São apresentados os princípios dos processos de furação e fresamento, os compósitos poliméricos reforçados por fibra de carbono e os principais danos causados pelos processos de usinagem nesses materiais. Também é visto o conceito de ar comprimido refrigerado e, por fim, são abordados os projetos de experimentos.

2.1 Furação

Furação é um processo de usinagem onde o movimento de corte é circular, enquanto que o movimento de avanço é linear na direção do eixo da ferramenta de corte. A ferramenta utilizada para furação é chamada broca [Diniz et al., 2013]. A geometria da broca helicoidal, as superfícies, as arestas, os ângulos e as pontas são ilustrados na Figura 2.1. Destaca-se o ângulo de ponta (σ), que corresponde ao ângulo formado pelas arestas principais de corte.

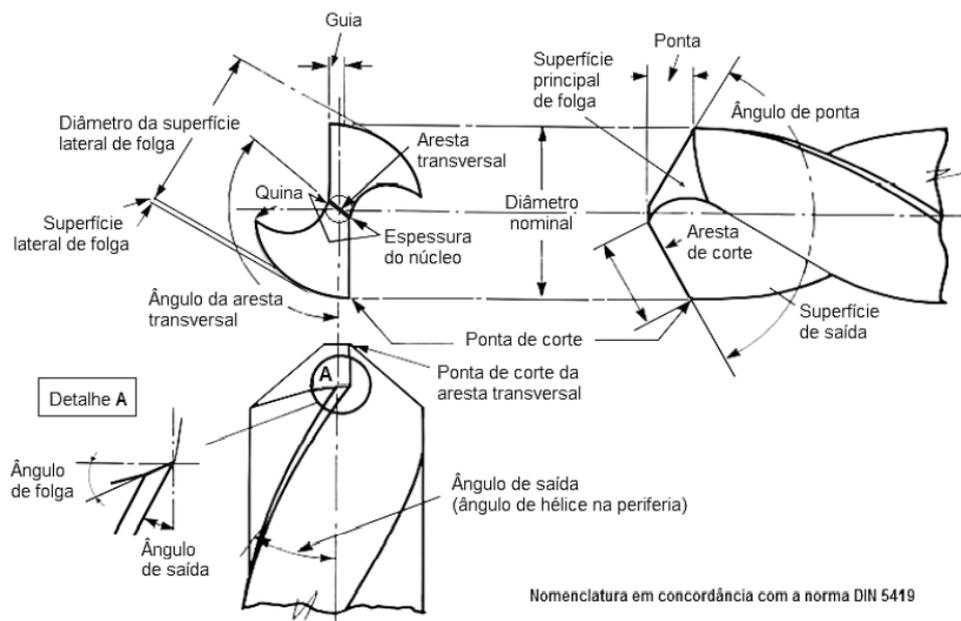


Figura 2.1 – Elementos básicos de uma broca helicoidal [Contreras *apud* Malacarne, 2017].

A furação é um dos processos de usinagem mais utilizados, pois a maioria dos produtos manufaturados necessitam pelo menos um furo [Diniz et al., 2013], principalmente quando o material é um compósito, o qual precisa ser montado em outras peças, seja em outro compósito ou em um material diferente (ligas de titânio, ligas de alumínio etc.).

A importância do processo de furação em materiais compósitos é devido a união desses com outras peças, pois os compósitos não podem ser soldados e a colagem é bastante complexa

e não pode ser desmontada posteriormente; assim, a principal solução é a união mecânica, através de hastes, pinos, fixadores, rebites etc. [Fu et al., 2018]. Como exemplo desta importância, um Airbus A350 requer mais de 55 mil furos [Muller-Hummel et al., 2008]. Os furos exigidos pela união mecânica são geralmente feitos no material compósito semiacabado e devem ser colocados na posição exata exigida e devem ter o diâmetro correto. Além disso, os furos geralmente sofrem intenso estresse localizado pois são concentradores de tensões. Desta forma, os furos devem ser especificados em termos geométricos e mecânicos [Davim, 2008].

Uma particularidade da furação é a existência de variação da velocidade de corte ao longo da aresta principal de corte, em que a velocidade é máxima na periferia, a qual gera a superfície cilíndrica, e se aproxima de zero próximo à linha central da broca, onde as arestas principais são mescladas com a aresta transversal. Porém, o ângulo de saída também sofre variação, diminuindo da periferia em direção ao centro e, na ponta de corte da aresta transversal, a ação de corte é a de uma ferramenta com um ângulo de saída muito negativo. Essas variações de velocidade de corte e ângulo de saída ao longo da aresta são responsáveis por muitos aspectos da furação que são peculiares a esta operação. Além disso, as brocas são ferramentas esbeltas e sofrem altas tensões, cujos canais devem ser cuidadosamente projetados para permitir o fluxo de cavacos sem perder a resistência adequada [Trent e Wright, 2000].

Segundo Lachaud et al., 2001, existem quatro categorias principais para a classificação dos defeitos ocasionados por furação com brocas helicoidais em compósitos laminados: defeitos na entrada do furo, defeitos na saída do furo, defeitos dimensionais e defeitos térmicos.

Durão et al., 2010, investigaram a influência da geometria e do avanço da broca na força de avanço, na delaminação e na rugosidade da parede do furo em um compósito laminado. Concluíram que a geometria da ferramenta afetou os resultados, tanto para a força de avanço quanto para a delaminação. O uso de brocas helicoidais com ângulo de ponta $\sigma = 85^\circ$ e 120° não apresentaram mudanças na delaminação com o aumento do avanço, já para as brocas tipo W e *dagger*, o aumento do avanço afetou muito a delaminação. Quanto à rugosidade, os resultados foram inconclusivos, e a broca helicoidal com $\sigma = 120^\circ$ apresentou os menores valores de delaminação e força de avanço. Heisel e Pfeifroth, 2012, observaram que o aumento do ângulo σ reduz a delaminação na entrada do furo, porém, aumenta na saída. Krishnaraj et al., 2012, também notaram a grande influência do avanço da broca na força de avanço e na delaminação durante o processo de furação de CFRP. A velocidade de corte influenciou a circularidade dos furos, com melhores resultados em maiores níveis. Merino-Pérez et al., 2015, demonstraram a grande influência de altas velocidades de corte no aumento da temperatura gerada durante o processo de furação de CFRP, gerando diversos danos no material. Wang et al., 2018, verificaram que brocas sem revestimento geraram superfícies melhores e com menos

fibras não cortadas em comparação com brocas revestidas, pois o revestimento deixou o raio da aresta de corte maior, dificultando o corte.

2.2 Fresamento

Fresamento é um método de produção de usinagem que possui movimento de corte circular de uma ferramenta, geralmente com vários dentes, para produzir superfícies de peças arbitrárias. A direção de corte é perpendicular ou transversal ao eixo de rotação da ferramenta [Klocke e Kuchle, 2009]. Quando o corte é feito com o eixo da fresa perpendicular à superfície usinada, tem-se um fresamento frontal, cujas ferramentas são denominadas fresas frontais ou de topo [Diniz et al., 2013].

A superfície é gerada conforme cada dente corta um segmento em forma de arco, cuja espessura é o avanço por dente (f_z), como mostra a Figura 2.2a. Os avanços por dente são geralmente pequenos, não maiores que 0,25 mm, porém, devido ao grande número de dentes (z), a taxa de remoção de metal costuma ser alta [Trent e Wright, 2000]. No caso, f_z corresponde à espessura de corte máxima (h_{max}).

A penetração de trabalho ou profundidade de corte radial (a_e) é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço. À medida que a_e cresce, aumenta o ângulo de contato fresa-peça (φ_o) em cada volta da ferramenta e, assim, aumenta a temperatura da ferramenta. Portanto, seu aumento tende a causar uma forte queda da vida da ferramenta. Na usinagem de rasgos, a_e é máximo, isto é, igual ao diâmetro da fresa. A profundidade de corte axial (a_p) é a profundidade de penetração da ferramenta na peça, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho. A penetração de avanço (a_f) é a penetração da ferramenta medida no plano de trabalho e na direção do avanço [Diniz et al., 2013; Machado et al., 2015; Sandvik, 2010]. As grandezas de penetração estão ilustradas na Figura 2.2b.

O fresamento frontal pode ser classificado em fresamento concordante e discordante, dependendo de como a aresta de corte se aproxima da peça de trabalho. No fresamento concordante, a direção da velocidade de corte é a mesma do avanço, já no fresamento discordante, a direção da velocidade de corte da aresta em contato com o material é oposta à direção de avanço [Klocke e Kuchle, 2009]. Na usinagem de rasgos, ocorre o fresamento combinado ou simultâneo, ou seja, começa discordante e termina concordante.

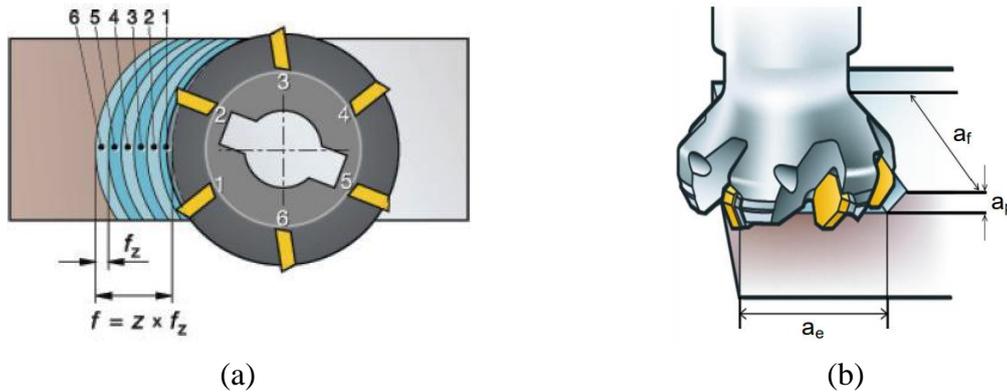


Figura 2.2 – Fresamento frontal: (a) avanço por dente (f_z) e avanço por volta (f); (b) profundidade de corte radial (a_e), profundidade de corte axial (a_p) e penetração de avanço (a_f) [Sandvik, 2010].

Uma característica importante das operações de fresamento é a ação de cada aresta de corte, a qual é intermitente. Cada aresta de corte corta o material apenas uma fração do giro da ferramenta, o que gera impactos periódicos, à medida que a ferramenta entra em contato com o material. Assim, cada aresta da ferramenta sofre tensões mecânicas e térmicas durante parte do ciclo de corte, seguido por um período em que não há tensões e há perda do calor. Normalmente, os tempos de corte são uma pequena fração de segundo e são repetidos várias vezes por segundo, gerando fadiga térmica e mecânica da ferramenta [Trent e Wright, 2000].

O fresamento e a furação são os dois processos de usinagem mais comumente usados em fabricação de peças de CFRP. No caso, o fresamento tangencial é utilizado em operações de contorno com a finalidade de remover os defeitos originários da moldagem de chapas e de estabelecer características dimensionais. Porém, o acabamento superficial não representa um fator restritivo do processo, mas sim as características dimensionais visando a montagem das peças fresadas. No caso de furação, o mesmo caso ocorre, pois geralmente, são realizados furos passantes para fixação [Hintze et al., 2011; Martins, 2014]. Porém, para o fresamento frontal (objeto do estudo), o acabamento superficial foi importante.

Khairusshima et al., 2012, concluíram que a melhor qualidade da superfície é obtida ao utilizar valores altos de velocidade de corte e avanço no fresamento de CFRP. Voss et al., 2017, também observaram o mesmo, além de demonstrar que ângulos maiores de saída e folga aumentam a qualidade da superfície e diminuem o desgaste de ferramenta.

Yashiro et al., 2013, constataram a grande influência das altas velocidades de corte no aumento da temperatura gerada durante o processo de fresamento de CFRP, gerando danos ao material. Wang et al., 2016a, realizaram o fresamento de CFRP e observaram que, para uma melhor qualidade da superfície e uma alta taxa de remoção de material, deve-se utilizar avanço

e velocidade de corte baixos e alta profundidade de corte axial. Resultados semelhantes foram obtidos por Azmi et al., 2013, para o fresamento frontal de compósito reforçado por fibra de vidro (GFRP). Os autores verificaram a grande influência do avanço na rugosidade da superfície usinada. Para as forças de usinagem, a profundidade de corte axial e o avanço foram influentes.

Quanto ao material da ferramenta de corte, diversos tipos são utilizados na usinagem de CFRP. Gao et al., 2016, e Wang et al., 2016b, empregaram fresa de metal-duro com revestimento de diamante policristalino (PCD). Já Kiliçkap et al., 2015, usaram fresa de metal-duro sem revestimento.

2.3 Compósito Polimérico Reforçado por Fibra de Carbono

Os compósitos poliméricos reforçados por fibra de carbono (CFRP – *carbon fiber reinforced polymer*) consistem em reforços de alta resistência e rigidez, geralmente descontínuos, combinados com uma matriz, geralmente menos rígida e resistente, formando duas interfaces distintas entre eles. Dessa forma, os reforços e a matriz mantêm suas identidades físicas e químicas, mas produzem uma combinação de propriedades que não podem ser alcançadas com somente um dos elementos [Campbell Jr., 2003].

Em geral, os reforços atuam na resistência às cargas, enquanto a matriz mantém os reforços no local e na orientação desejada, atua como um meio de transferência de carga entre os reforços e os protege de danos químicos e mecânicos [Callister Jr e Rethwisch, 2012]. Ainda, os reforços podem ser particulados, fibras descontínuas ou contínuas.

As principais características do CFRP são a alta resistência por peso específico, a alta capacidade de amortecimento, a boa estabilidade dimensional, a excelente tolerância a danos, e as boas resistências à corrosão e à fadiga. Isso o torna amplamente utilizado em aplicações aeroespaciais, robóticas [Wang et al., 2003], construção, transporte, artigos esportivos, aplicações médicas e militares [Dandekar et al., 2012].

Os principais reforços de uso comercial são de carbono, vidro e aramida (Kevlar®). Outros como boro, carboneto de silício e óxido de alumínio também podem ser utilizados [Mallick, 2007]. A matriz pode ser de polímero, metal ou cerâmica. As matrizes de polímero podem ser feitas de resina polimérica termoplástica ou termorrígida, essa última sendo a mais utilizada pelas suas melhores propriedades mecânicas e menor custo [Davim, 2008].

Os CFRP podem ser classificados de acordo com a direção de suas fibras, as quais podem ser unidirecionais, bidirecionais ou multidirecionais (camadas unidirecionais empilhadas em diferentes direções). Conseqüentemente, estes possuem propriedades mecânicas balanceadas em todas as direções [Mallick, 2007].

A fabricação de CFRP pode ser por moldagem em autoclave, moldagem por compressão ou enrolamento de filamentos, os quais geram bom acabamento [Koplev et al., 1983]. Atualmente, a fabricação de peças em CFRP tem sido feita aplicando tecidos ou fitas pré-impregnadas (*prepreg*), que são materiais compósitos que têm uma quantidade predeterminada de resina não curada impregnada na fibra pelo fornecedor do material, necessitando apenas moldagem e cura final [Campbell Jr., 2003].

Porém, processos como fresamento (operações de desbaste e acabamento) ou furação (geração de furos passantes para fixação) são geralmente executados na fabricação de peças em CFRP [Hintze et al., 2011; Martins, 2014]. Devido às propriedades das fibras e sua estrutura heterogênea, a usinagem de CFRP difere significativamente da usinagem convencional de metais, apresentando diferentes tipos de danos ao material [Ferreira et al., 1999; Teti, 2002]. A falta de homogeneidade e anisotropia do CFRP pode levar ao arrancamento das fibras [Grilo et al., 2013] e ao dobramento das mesmas durante a sua usinagem [Dandekar et al., 2012]. Ainda, problemas como delaminação e rachaduras podem ocorrer por causa das fibras [Haeger et al., 2016]. O processo de formação de cavacos na usinagem CFRP consiste em uma série de fraturas frágeis e é fortemente dependente da orientação das fibras no material [Koplev et al., 1983]. A orientação das fibras também influencia a sua usinagem, com mudança no modo de fratura das fibras para diferentes orientações, além de alterações nas forças de corte e na rugosidade da superfície usinada [Che et al., 2014; Wang et al., 1995a].

A alta resistência ao calor e abrasividade do CFRP impõem às ferramentas de corte um ambiente severo e levam a processos de desgastes térmicos associados [Sreejith et al., 2000]. Assim, taxas de desgaste relativamente altas nas ferramentas de metal-duro podem produzir danos graves ao CFRP, incluindo delaminação, trincas na matriz e perda de fibras na interface entre as camadas [Haeger et al., 2016; Rawat e Attia, 2009]. Além da ferramenta, defeitos térmicos podem ocorrer no material, com a qualidade da superfície usinada diminuindo com o aumento da temperatura. Esse aumento da temperatura pode provocar a redução da rigidez da matriz, que acarreta em muitos danos tais como delaminação, trincas transversais, aumento da porosidade e lascas [Ben et al., 2012; Fu et al., 2018].

2.4 Meio Lubrificador

Ao usinar CFRP, a fratura dos compósitos não requer tanta energia quanto o cisalhamento nos metais; assim, a força de corte e a temperatura são muito menores no primeiro que no segundo [El-Hofy et al., 2017]. Essa baixa temperatura elimina completamente a chance de ocorrer desgaste por difusão na ferramenta durante a usinagem de CFRP [Wang et al., 2013].

Porém, defeitos térmicos originados do atrito entre a ferramenta de corte e o compósito laminado podem ocorrer. Isso pode afetar as propriedades do material, principalmente a matriz polimérica [Akay, 1993], além de aumentar o descolamento e o arrancamento das fibras [Fu et al., 2018]. A temperatura gerada pode chegar a valores acima da temperatura de transição vítrea da matriz polimérica em parâmetros de corte abusivos. No caso, o polímero amolecido e as fibras de carbono podem formar uma superfície irregular [Ha et al., 2017].

Uma alternativa, visando reduzir a temperatura na região de corte, é a utilização de ar comprimido refrigerado (ACR) durante a operação de furação utilizando um tubo de vórtice [Dixit et al., 2012], pois em aplicações aeronáuticas, o uso de fluidos refrigerantes líquidos pode prejudicar as propriedades do CFRP devido à sua absorção, ocorrendo separação entre fibra e matriz, e gerando pequenos vales e trincas [El-Hofy et al., 2017; Kim et al., 2018].

A utilização do ACR é feita através de um sistema de tubo de vórtice, no qual o ar comprimido entra tangencialmente em uma câmara cilíndrica, formando um fluxo turbulento em movimento semelhante a um parafuso, e sai por ambas as extremidades do tubo. O fluxo de ar rotativo produz uma região de alta pressão perto da parede interna do cilindro e uma região de baixa pressão perto do eixo [Dixit et al., 2012]. Uma extremidade do cilindro é fechada por um diafragma que permite a saída de ar em temperatura reduzida somente da região central. A outra extremidade possui uma válvula que controla o fluxo do ar mais externo em temperatura elevada [Ko et al., 1999]. Assim, há uma troca de calor entre as porções de ar, em que a quantidade de calor removida de uma parcela do ar é absorvida pela outra parcela. Um esquema representativo de um tubo vórtice está demonstrado na Figura 2.3.



Figura 2.3 – Esquema de um tubo de vórtice [Vortec, 2020].

A utilização de ACR durante a usinagem é uma alternativa para aumentar a vida ferramenta também. Diferentes autores [Khairusshima et al., 2013; Khairusshima e Sharifah, 2017; Voss et al., 2017] utilizaram ACR no fresamento de CFRP e conseguiram aumentar a vida da ferramenta de metal-duro sem revestimento, em comparação ao corte a seco, principalmente em altas velocidades de corte, devido ao desgaste abrasivo ser muito afetado pelo calor gerado pelo atrito (mecanismo de desgaste também confirmado por Iliescu et al.,

2010). A refrigeração se mostrou mais eficaz em altas velocidades, pois há melhor transferência de calor por convecção forçada; além disso, o ACR afetou significativamente o corte, sobretudo com valores maiores de avanço por dente.

A alta temperatura durante o corte a seco aumenta o surgimento de danos no material como delaminação, trincas e porosidade [Ben et al., 2012]. Assim, a utilização do ACR aumenta a rigidez da matriz do CFRP, diminuindo a quantidade de fibras arrancadas (*pull out*), e reduzindo a delaminação e a rugosidade ao facilitar o corte tanto no fresamento [Ha et al., 2017; Khairusshima et al., 2017], quanto na furação [Abish et al., 2018; Fu et al., 2018].

Morkavuk et al., 2018, verificou que, apesar de aumentarem as forças de corte, menores valores de delaminação foram encontrados no fresamento de CFRP submerso em nitrogênio líquido comparado ao corte a seco devido à maior facilidade da quebra dos cavacos

Vale ressaltar que o cavaco gerado na usinagem do CFRP pode estar na forma de partículas finas [Nguyen-Dinh et al., 2020], e essas partículas podem estar suspensas, causando perigo ao operador [Ngoc et al., 2020], principalmente ao utilizar ar comprimido (AC) e ar comprimido refrigerado (ACR). Assim, é fortemente recomendável usar somente em máquinas-ferramenta fechadas, com sistema de exaustão, e o operador deve utilizar máscara de proteção.

2.5 Delaminação

A delaminação pode ser definida como a separação entre as camadas adjacentes do laminado, representando um tipo de dano que ocorre durante a usinagem. Em furação, a delaminação pode ocorrer na entrada do furo (Figura 2.4a) e na saída do mesmo (Figura 2.4b).

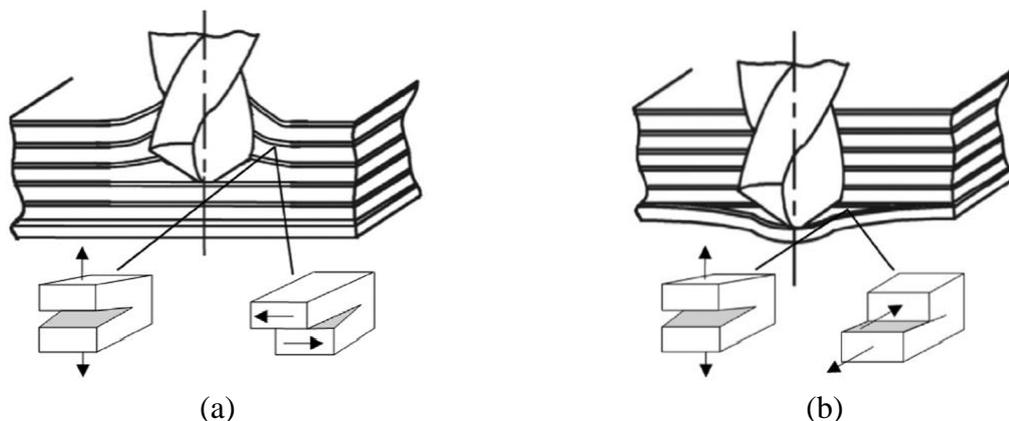


Figura 2.4 – Delaminação no material durante a entrada e saída da broca [Geng et al., 2019].

Na entrada, a delaminação ocorre no contato da broca com as camadas superiores do laminado, onde o material tende a ser puxado pela hélice da broca [Ho-Cheng e Dharan, 1990].

Já a delaminação na saída é ocasionada pelo efeito de compressão da extremidade da broca sobre as camadas inferiores do laminado, onde o material tende a ser empurrado; esse dano é mais difícil de evitar [Lee, 1989]. A delaminação na saída possui pior influência nas propriedades mecânicas dos materiais compósitos em comparação com a delaminação na entrada [Lissek et al., 2016]. Os danos causados pela delaminação podem ser reduzidos através da redução da força de avanço exercida pela broca [Lee, 1989].

Diversas técnicas foram utilizadas para detectar a delaminação tanto na entrada quanto na saída do furo. Davim e Reis, 2003, utilizaram microscopia para avaliar a delaminação na furação CFRP. A fim de obter uma quantificação e parâmetro de comparação da delaminação no processo de furação de compósitos laminados, Chen, 1997, propôs o conceito do fator de delaminação (F_d), apresentada na Equação (1), como sendo a razão entre o diâmetro máximo da região danificada (D_{max}) e o diâmetro nominal do furo (D_o). Davim et al., 2007, propuseram um fator de delaminação ajustado (F_{da}), representado pela Equação (2), que considera o fator de delaminação clássico e uma componente que compara área danificada (A_d) com A_{max} (área calculada a partir de D_{max}) e A_o (área nominal do furo).

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

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{A_{max} - A_o} (F_d^2 - F_d) \quad (2)$$

Tsao et al., 2010, propuseram outra forma de avaliar a delaminação ao utilizar um diâmetro equivalente de delaminação ao invés do diâmetro máximo. Joshi et al., 2018, criaram um modelo a fim de prever a delaminação ocorrida durante a usinagem. Além dessas, outras técnicas foram criadas a fim de mensurar a delaminação de materiais compósitos como fator de delaminação de duas dimensões e fator de delaminação refinado [Babu et al., 2016]. Ainda, há vários tipos de testes não destrutivos para obter os valores necessários para o cálculo da delaminação. Há a fotografia digital, feita através de microscópio digital, a utilização de ultrassom e ainda é possível a utilização de tomógrafo computadorizado, utilizando a técnica de raios-X [Vaziri Sereshk et al., 2016].

Vários estudos foram realizados para analisar a delaminação na entrada e na saída dos furos em CFRP. Os trabalhos mostram que os defeitos são influenciados pela escolha dos parâmetros de usinagem [Dharan e Won, 2000], pela geometria da ponta da broca [Durão et al., 2010; Rubio et al., 2008; Singh et al., 2008], pela natureza do material [Davim e Reis, 2003; Di

Ilio et al., 1996; Langella et al., 2005], e pelo processo de fabricação do compósito e a forma de laminação (unidirecional ou tecida) [Shyha et al., 2010; Zitoune et al., 2008].

Velayudham e Krishnamurthy, 2007, verificaram que a delaminação foi influenciada negativamente pelo aumento do avanço. Há ainda a relação da delaminação com a força de avanço. Sorrentino et al., 2018, explicam que ao aumentar o avanço, a força de avanço cresce e a delaminação também.

Ben et al., 2012, e Krishnaraj et al., 2012, observaram que ao aumentar a velocidade de corte, tem-se um aumento da delaminação no corte a seco devido ao aumento da temperatura. Como supracitado, este aumento da temperatura diminui a rigidez da matriz e aumenta a ocorrência de danos. Porém, Joshi et al., 2018 e Karnik et al., 2008, citam que essa diminuição da rigidez da matriz diminui a força de avanço; consequentemente, a delaminação na saída do furo fica menor, mesmo com altos avanços.

A temperatura aumenta muito ao longo da usinagem, tendo seu pico na parcela final usinada devido ao calor acumulado [Ha et al., 2017]. Há o aquecimento acumulado da ferramenta após usinar uma sequência de furos ininterruptos, aumentando a ocorrência de danos [Fu et al., 2018]. Além disso, a temperatura na ferramenta de corte é superior à temperatura no CFRP durante a usinagem [Yashiro et al., 2013]. Assim, o uso do ar comprimido refrigerado (ACR) diminui a temperatura, mantendo parte da rigidez da matriz. Com isso, as forças de avanço são maiores em comparação ao corte a seco [Abish et al., 2018; Joshi et al., 2018].

Joshi et al., 2018, verificaram que durante o corte a seco, com o aumento da velocidade de corte, inicialmente o F_{da} na saída do furo diminui devido ao amolecimento da matriz e há diminuição das forças de avanço. Então, as altas temperaturas acabaram gerando danos como fibras queimadas e espalhamento da matriz, fazendo com que o uso do ACR tenha menores valores de delaminação. Assim, ao utilizar ACR, o modo de corte das fibras passou de fratura de dobramento para fratura por cisalhamento, diminuindo a delaminação. Além disso, Koklu e Morkavuk, 2019, explicam que o ACR ajuda a diminuir a ocorrência de fibras não cortadas.

A delaminação causada pelo processo de fresamento também foi investigada por diferentes autores. Davim e Reis, 2005, observaram a influência dos parâmetros de corte no acabamento da superfície gerada por fresamento de CFRP e constataram um efeito negativo na rugosidade e na delaminação ao aumentar o avanço. Sreenivasulu, 2013, concluiu através da Análise de Variância (ANOVA) que a profundidade de corte axial e a velocidade de corte no fresamento de GFRP são os fatores mais significativos sobre a delaminação. Kiliçkap et al., 2015, verificaram um aumento da delaminação durante o fresamento frontal de CFRP ao aumentar o avanço e a velocidade de corte, e uma diminuição da mesma aplicando uma ferramenta com maior número de dentes.

A influência da aplicação de ar comprimido refrigerado (ACR) no fresamento de CFRP foi estudada por Khairusshima et al., 2013, que constataram menor delaminação com ACR em relação ao corte a seco, mesmo em diferentes velocidades de corte e avanços.

2.6 Acabamento da Superfície Usinada

A confiabilidade dos componentes usinados, especialmente em aplicações de alta resistência, é criticamente dependente da qualidade das superfícies produzidas pela usinagem [Sheikh-Ahmad, 2009]. As irregularidades da superfície, principalmente vales ou sulcos, são concentradores de tensões que facilitam a deformação plástica do material e a propagação de trincas. Então, uma superfície lisa apresenta menor risco de iniciar trincas [Davim, 2008] e propicia um aumento na resistência à fadiga do material [Klocke e Kuchle, 2009].

A rugosidade de uma superfície também determina diretamente funções tribológicas ao determinar a área real de contato entre superfícies, influenciando no atrito, no desgaste e na lubrificação. Além disso, é importante em aplicações que necessitam desempenho óptico, elétrico e térmico, em aplicação de pintura e na aparência [Machado et al., 2015].

A qualidade da superfície usinada é frequentemente caracterizada pela morfologia da superfície (ou textura) e pela integridade da superfície. A textura preocupa-se com as características geométricas da superfície gerada. A integridade descreve as mudanças físicas e químicas da superfície após a usinagem, incluindo o arrancamento de fibras, a delaminação, a remoção ou decomposição da matriz, entre outros [Sheikh-Ahmad, 2009].

A morfologia da superfície que foi gerada por um processo de usinagem é a combinação de rugosidade, ondulações e falhas. A rugosidade é composta por erros microgeométricos e é causada por fatores inerentes dos processos de usinagem como parâmetros de corte, geometria da ferramenta de corte, desgaste da ferramenta, entre outros [Petropoulos et al., 2010]. As ondulações são erros macrogeométricos ou irregularidades superficiais repetidas, com comprimento de onda constante e maiores que as irregularidades consideradas rugosidade. Vibrações e flexões da peça ou máquina-ferramenta, temperatura de corte, problemas na fixação da peça ou ferramenta podem causar as ondulações [Bhushan, 2000]. As falhas são interrupções na topografia natural da superfície que ocorrem de forma inesperada e não intencional, geradas por defeitos inerentes ao processo de usinagem e por defeitos presentes no material usinado tais como trincas, marcas, inclusões e bolhas [Machado et al., 2015].

As ondulações e falhas podem e devem ser evitadas, pois, representam erros de fabricação. Por outro lado, a rugosidade deve seguir especificações conforme a aplicação da peça usinada, e pode ser usada como variável de controle do processo [Machado et al., 2015].

Os principais parâmetros de rugosidade de acordo com a NBR ISO 4287, 2002, são:

- Desvio aritmético médio (R_a): Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de avaliação (l_m).
- Desvio médio quadrático (R_q): Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de avaliação.
- Altura total do perfil (R_t): Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
- Altura máxima do perfil (R_z): Média aritmética dos valores obtidos em cada comprimento de amostragem da soma da maior altura de pico e da maior profundidade de vale do perfil.
- Fator de assimetria do perfil (R_{sk}): Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e ao cubo, no comprimento de avaliação.
- Fator de curtose do perfil (R_{ku}): Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de à quarta potência no comprimento de avaliação.

Além dos parâmetros de rugosidade, é preciso selecionar os comprimentos de amostragem (l_e) e de avaliação (l_m). O l_e é o comprimento paralelo à superfície usado para descrever as características do perfil de medição, enquanto l_m é o comprimento para estabelecer o perfil sob avaliação, que contém determinados l_e . Os comprimentos l_e e l_m dependem do valor de rugosidade média (R_a) do perfil analisado e devem estar de acordo com especificação da NBR ISO 4288, 2008, junto com o número de l_e necessários.

Diversos pesquisadores abordam os efeitos dos parâmetros de corte na rugosidade da superfície gerada por furação e fresamento de CFRP.

Diferentes trabalhos [Abish et al., 2018; Ben et al., 2012; Joshi et al., 2018; Pérez-Pacheco et al., 2011] constataram que o aumento da velocidade de corte (v_c) aumenta a rugosidade da parede do furo na furação de CFRP. Assim, menores valores de v_c geram uma temperatura menor, o que diminui a rugosidade. Abish et al., 2018, e Joshi et al., 2018, também obtiveram menores valores de rugosidade na furação ao empregar ar comprimido refrigerado (ACR) em relação ao corte a seco. Entretanto, Abish et al., 2018, citam que em v_c muito altas, o ACR não é capaz de diminuir a temperatura, gerando resultados semelhantes ao corte a seco.

Çolak e Sunar, 2016, e Yashiro et al., 2013, concluíram que o avanço (f) é o parâmetro de corte que apresenta a maior influência estatística e física na rugosidade e na delaminação da superfície do CFRP gerada por fresamento, pois o menor f diminui a rugosidade ao diminuir os danos superficiais causados pelo processo. Entretanto, El-Hofy et al., 2017, verificaram que altas velocidades de corte (v_c) e altos avanços por dente (f_z) diminuem o tempo de usinagem.

No caso, altas v_c aumentam a temperatura; já altos f_z a diminuem. Assim, altos valores de f_z propiciaram uma melhora da rugosidade, pois reduz os danos gerados pela temperatura.

Gao et al., 2016, observaram que o aumento da profundidade de corte axial (a_p) afeta negativamente a rugosidade do CFRP em fresamento e aumenta as forças de corte. Os autores notaram grande dispersão dos valores de rugosidade média (R_a) em valores de a_p maiores devido às características do material.

Ao utilizar ACR no fresamento, Khairusshima et al., 2013, e Yalçın et al., 2009, concluíram que os valores de rugosidade são menores que no corte a seco.

2.7 Projeto de Experimentos e Análise dos Dados

A usinagem é um dos processos de fabricação mais antigos. Entretanto, a principal forma de obtenção de resultados, como vida da ferramenta, forças de corte, rugosidade da superfície usinada, é através da experimentação. Geralmente estes estudos são onerosos e demorados. Assim, a estratégia, o método e a aquisição de dados são preocupações intrínsecas a esses estudos experimentais [Astakhov, 2006].

O projeto de experimentos (DOE – *Design of Experiments*) é um processo de planejamento experimental para que dados apropriados possam ser coletados e usados em futuras análises estatísticas, resultando em conclusões válidas e objetivas, e permitindo melhorias significativas nas experimentações em usinagem [Larson et al., 2004].

O objetivo do DOE é encontrar uma correlação entre a variável de resposta (desgaste da ferramenta, força de corte, rugosidade etc.) e os fatores controláveis de entrada (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte 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].

A seleção dos fatores controláveis e fixos é feita com a definição das variáveis de resposta que se deseja avaliar, atribuindo um índice de importância relativa dessa variável em relação as demais, e a listagem de todos os parâmetros do processo que possam influenciar na variável de resposta, atribuindo um valor de intensidade dessa influência, variando de “inexistente” até a intensidade “forte”. Então, é calculado o índice de priorização (PR) a partir da Equação (3), onde R_{ij} é a relação entre a variável de resposta i e o parâmetro do processo j e IE_i é o índice de importância relativa para a variável de resposta i . Assim, define-se os parâmetros do processo que serão controláveis como aqueles que possuem os maiores valores de PR , mantendo os demais fixos [Ribeiro e Caten, 2001].

$$PR(x_j) = \frac{\sum_i R_{ij} \cdot IE_i}{\sum_i IE_i} \quad (3)$$

De acordo com Ferreira et al., 2007, existem diferentes metodologias de DOE como por exemplo, matriz de Doehlert (DM), Projeto Composto Central (CCD – *Central Composite Design*) e Box-Behnken Design (BBD). Segundo os autores, deve-se selecionar a metodologia mais apropriada dependendo do objetivo do experimento e dos recursos disponíveis.

Box-Behnken Design (BBD) constitui uma classe de experimentos rotativos ou quase rotativos de segunda ordem baseados em experimentos fatoriais incompletos de três níveis [Box e Behnken, 1960]. Para três fatores, sua representação gráfica é ilustrada pela Figura 2.5. O número de experimentos (N) necessários para o desenvolvimento do BBD é definido pela Equação (4), onde k é o número de fatores controláveis e C_o é o número de pontos centrais.

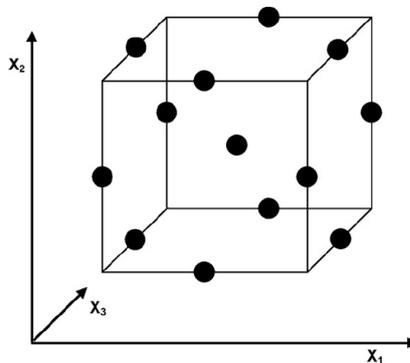


Figura 2.5 – Representação de um BBD com três fatores controláveis.

$$N = 2 \cdot k \cdot (k - 1) + C_o \quad (4)$$

Com o DOE definido e executado, deve-se realizar a análise dos dados. A análise de variância (ANOVA – *Analysis of Variance*) 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]. Na ANOVA, verifica-se se as médias dos valores da variável de resposta diferem significativamente nos diferentes níveis dos fatores controláveis do estudo e, para isso, as médias devem ser maiores que os fatores de ruídos. O fator estudado não é significativo quando as médias da variável resposta não diferem entre os diferentes níveis do fator para um dado intervalo de confiança, geralmente 95%, ou seja, uma probabilidade de erro máxima denominada $Valor-P = 0,05$ [Ribeiro e Caten, 2001].

Para a otimização dos resultados, é utilizada a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM – *Response Surface Methodology*), conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas para modelar e analisar as variáveis de resposta e buscar fatores controláveis otimizados [Montgomery, 2013]. A RSM permite a análise dos experimentos executados de modo a gerar informações suficientes para a modelagem das respostas de interesse através de superfícies n-dimensionais. Com a modelagem, busca-se o ajuste ótimo dos fatores controláveis para obter as variáveis de resposta requeridas, não restrito aos níveis dos fatores controláveis ensaiados [Ribeiro e Caten, 2001]. No entanto, a qualidade do ajuste do modelo deve ser suficiente, descrito pelo coeficiente de determinação (R^2), cujo valor deve ser superior a 70%. Isto garante que o modelo estatístico seja adequado para ser utilizado e que há pouca variabilidade nos resultados em relação a resposta verdadeira [Montgomery, 2013].

Diversos estudos de usinagem de materiais compósitos utilizam o BBD como DOE [Konneh et al., 2015; Sankar e Umamaheswarrao, 2016; Vinayagamoorthy, 2017] pois possui a vantagem da redução do número de execuções que precisam ser efetuadas, gerando menor consumo de materiais e consideravelmente menos trabalho de laboratório. Para a análise dos dados, ANOVA e RSM também são muito utilizadas na usinagem de compósitos [Gao et al., 2016; Krishnamoorthy et al., 2009; Palanikumar, 2007; Sreenivasulu, 2013].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão detalhados os materiais, ferramentas de corte e demais equipamentos utilizados para a execução dos experimentos. Para a análise dos resultados, será demonstrado o planejamento dos experimentos.

3.1 Corpos de prova

O material a ser usinado em ambos os processos é uma placa de matriz polimérica reforçada por fibra de carbono de tecido bidirecional (BD) de carbono-epóxi pré-impregnado, com orientações das fibras de 0°/90° com dimensões de 300 x 300 mm. A espessura final da chapa foi $8,7 \pm 0,3$ mm (variação devido ao processo de fabricação). As demais especificações do material são vistas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Informações técnicas do material.

Material	Urdume	Roving de fibra de carbono		
	Trama	Fio <i>hot melt</i>		
Composição do tecido		96% fibra de carbono + 4% fibra de vidro <i>hot melt</i>		
Temperatura de transição vítrea		130°C		
		Mínimo	Nominal	Máximo
N° de fios [fios/cm]	Urdume	9,5	10,0	10,5
	Trama	0,9	1,0	1,1
Carga de ruptura [kgf/cm]	Urdume	414	518	570
	Trama	1,9	2,4	2,6
Peso [g/m²]		187	208	229
Espessura [mm]		0,25	0,29	0,33

O método de laminação do CFRP está descrito a seguir e os materiais utilizados durante a laminação do material são vistos na Figura 3.1. Primeiramente, é utilizado uma placa de vidro como molde para o laminado, prevenindo empenamento durante a cura do mesmo. O item A é um filme de Teflon[®] para facilitar a retirada do laminado do molde. Então, na sequência, são colocadas as camadas de fibra de carbono com resina pré-impregnada. O item B é um filme perfurado utilizado para controle do fluxo de precipitação da resina durante o processo. O filme de polyester *peel-ply*, item C, serve para absorção do excesso de resina enquanto que a malha

de redistribuição de pressão, item D, homogeneiza o vácuo interno na bolsa de vácuo. O item E é uma camada de tecido respirador para conduzir voláteis e ar de dentro da bolsa de vácuo até a tomada de pressão, visto como item F. Ainda, é utilizada uma placa metálica para servir de apoio para a modelagem do laminado, uma nova camada de tecido respirador e, por fim, o filme da bolsa de vácuo, selado com fita selante.

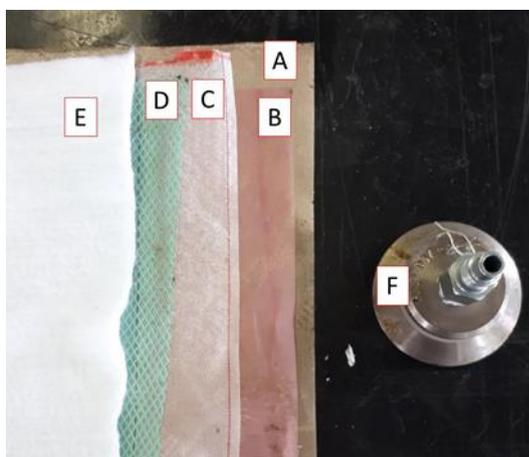


Figura 3.1 – Esquema de laminação.

Com o laminado montado, é feita a cura através do seguinte ciclo: 30 min de aquecimento da temperatura ambiente até 90 °C; 2 h em temperatura constante de 90 °C; 30 min de aquecimento de 90 a 120 °C; 2 h em temperatura constante de 120 °C (temperatura de cura); resfriamento do laminado até a temperatura ambiente sem auxílio da estufa, levando o tempo que for necessário.

Para o processo de fresamento, a variação de $\pm 0,3$ mm na espessura da chapa de CFRP gerou alterações na real profundidade de corte axial (a_p). Assim, definiu-se o a_{p-T} (valor teórico utilizado no DOE) e o a_{p-R} (valor real mensurado após a usinagem).

A Figura 3.2 apresenta o desenho esquemático dos corpos de prova para os experimentos de: a) furação; b) fresamento. Os corpos de prova foram originados da mesma placa, a qual foi cortada para a realização dos diferentes experimentos.

Na Figura 3.3 tem-se a montagem de uma placa polimérica pré-furada, com furos de 8 mm de diâmetro, fixada na mesa do centro de usinagem. Esta placa foi posicionada abaixo da placa de CFRP para que os furos realizados ocorressem sem vibrações e possíveis outros efeitos indesejáveis (por exemplo, flexão) durante a operação de corte.

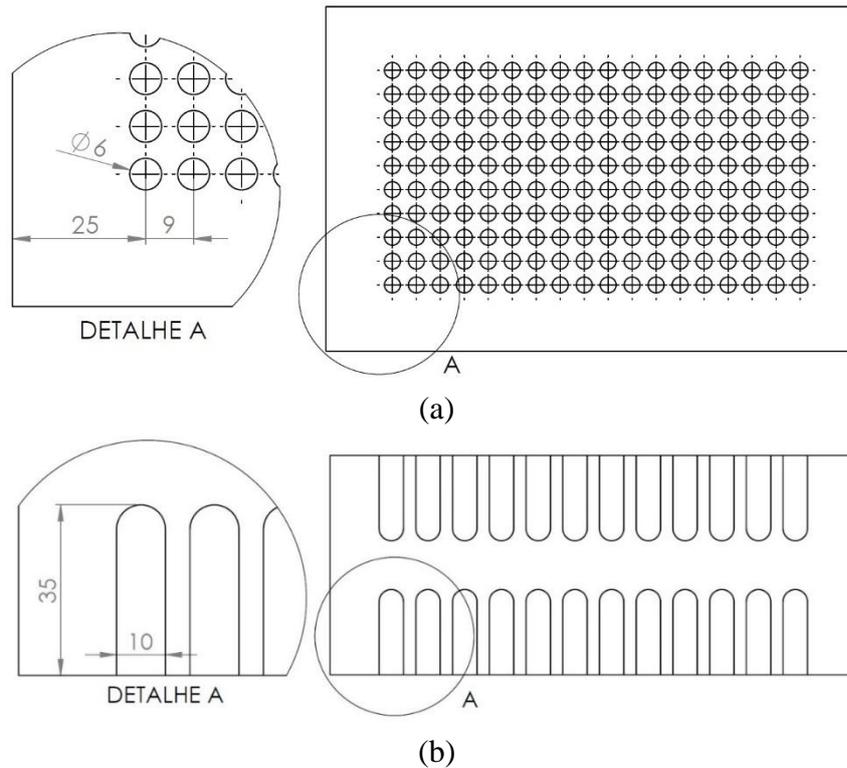


Figura 3.2 – Corpos de prova utilizados nos experimentos: (a) furação; (b) fresamento.



Figura 3.3 – Placa polimérica de apoio para furação.

3.2 Máquina-Ferramenta e Ferramenta de Corte

Os experimentos de furação e fresamento foram realizados no centro de usinagem ROMI Discovery 308 (Figura 3.4), o qual possui rotação máxima de 4000 rpm e potência máxima de 5,5 kW (7,5 cv), disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS/UFRGS).



Figura 3.4 – Centro de usinagem ROMI Discovery 308

A furação foi realizada com a broca Sandvik CoroDrill 860 H10F NM de metal-duro não revestida com substrato H10F, diâmetro de 6 mm e ângulo de ponta de 130°. A broca foi fixada na máquina-ferramenta utilizando um mandril pneumático e uma bucha cilíndrica. Os erros de batimento da broca e da fresa (δ) foram verificados utilizando um relógio comparador Starrett com resolução de 1 μm . O erro máximo encontrado ficou abaixo de 20 μm em ambos os casos. A Figura 3.5 mostra a broca utilizada na experimentação.

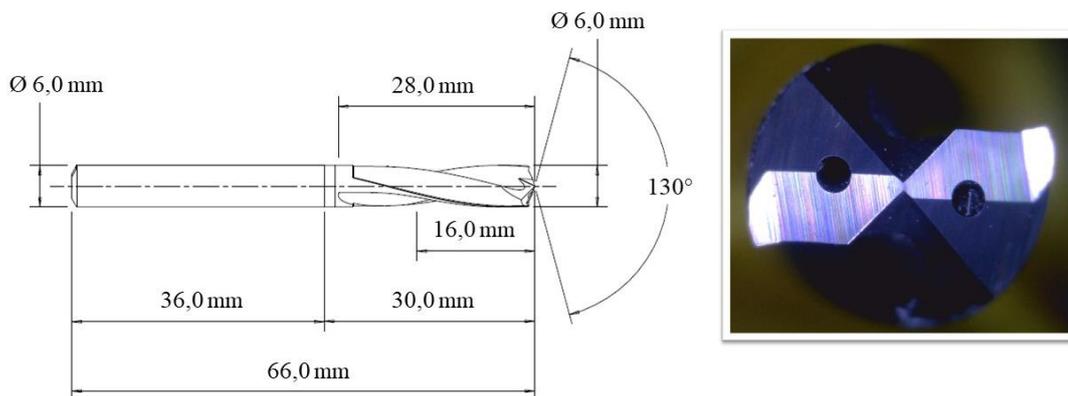


Figura 3.5 – Broca CoroDrill 860 H10F NM

No fresamento, a ferramenta utilizada foi uma fresa de topo helicoidal Kennametal F4AJ1000AWL30 K600, inteiriça de metal-duro, sem revestimento, 10 mm de diâmetro, quatro dentes e ângulo de hélice 30°. A profundidade máxima de corte permitida é 40 mm, ângulo de saída radial igual a 30° e ângulo de saída axial igual a 0°. A Figura 3.6 exhibe a fresa utilizada.

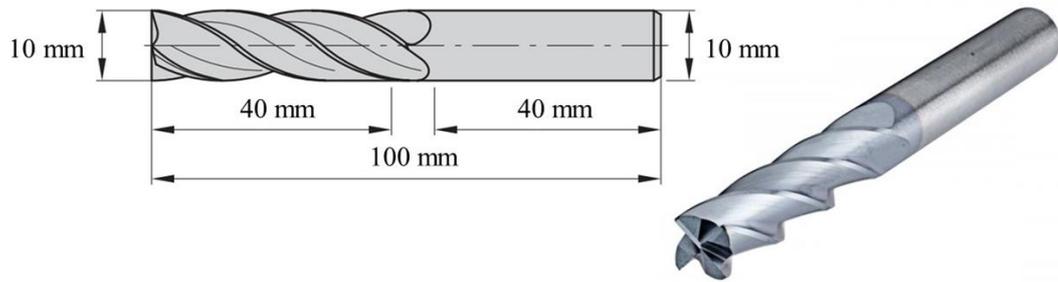


Figura 3.6 – Fresa Kennametal classe K600

3.3 Lubrificação

As condições de lubrificação (LC) utilizadas durante a furação foram a seco com a aplicação de ar comprimido refrigerado (ACR). O processo de fresamento contou com as condições a seco, com ACR, além da utilização de ar comprimido sem refrigeração (AC).

O ACR utilizado foi provido por um tubo vórtice Turbo Air da marca Eurotools modelo FTA-12-MC ligado à linha de ar comprimido a 3 bar (300 kPa), cuja temperatura medida na região de corte foi de 6 °C. A temperatura do AC foi de 17 °C. O bocal de aplicação das duas condições foi cilíndrico, com 6 mm de diâmetro, a uma distância de 30 mm da região de corte, a qual foi a menor distância possível.

A Figura 3.7 ilustra a montagem do tubo vórtice para refrigeração do ar comprimido e aplicação durante a usinagem.



Figura 3.7 – Utilização de tubo vórtice para refrigeração do ar comprimido.

3.4 Medição da Delaminação em Furação

A análise da delaminação foi realizada através de imagens do 1º e do 10º furo usinados em cada execução com o intuito de verificar as diferenças que podem ocorrer em uma furação sequencial, comum na indústria. As imagens foram registradas através do microscópio digital portátil Dino-Lite Pro AM-413ZT, com ampliação de 50x, na entrada e na saída da broca do 1º e do 10º furo na placa de CFRP (Figura 3.8).

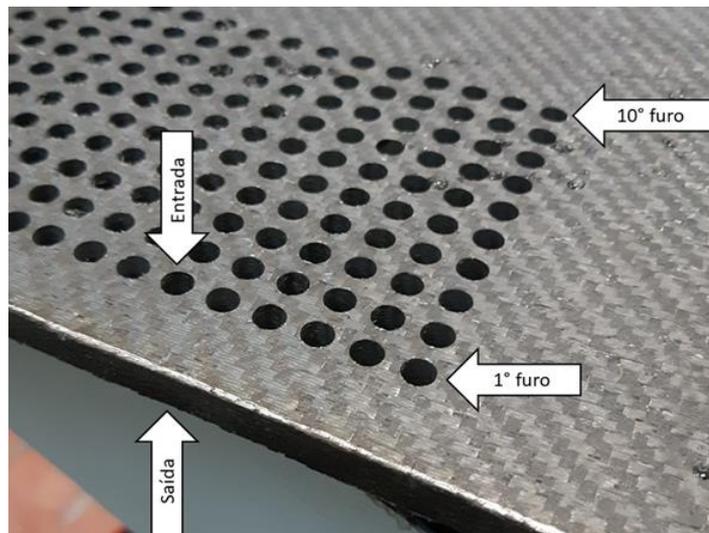


Figura 3.8 – Representação da análise de delaminação.

Com as imagens coletadas, as medidas das áreas danificadas (A_d) e do diâmetro máximo da zona danificada (D_{max}) foram obtidas via software ImageJ, como mostra a Figura 3.9. O software realiza o cálculo através da contagem de pixels contidos na área analisada da imagem.

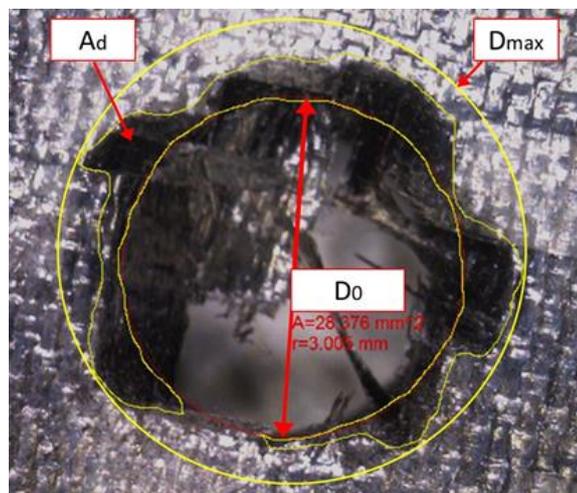


Figura 3.9 – Exemplo de mensuração do D_{max} e A_d do furo pelo software ImageJ.

Em seguida, efetuou-se o cálculo dos fatores de delaminação ajustado através da Equação (2). Apesar de essa ser uma maneira mais simples de se avaliar a delaminação ocorrida, ao verificar os danos ocorridos apenas na superfície do material, sem obter informações nas camadas mais profundas e regiões mais distantes do corte do laminado, é uma forma muito utilizada na literatura.

3.5 Medição da Rugosidade

Os valores de rugosidade das paredes dos primeiros furos de cada execução foram determinados através da média aritmética de três medições realizadas com o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201P, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$, utilizando um comprimento de amostragem $l_e = 0,8 \text{ mm}$ e um comprimento de avaliação $l_m = 5 \cdot l_e = 4 \text{ mm}$. De acordo com a norma NBR ISO 4288, 2008, seria necessária a aplicação de $l_e = 2,5 \text{ mm}$ e $l_m = 12,5 \text{ mm}$, que foi mantida no fresamento. Na furação, como a espessura da placa de CFRP variou de $8,4 \text{ mm}$ (mínimo) a $9,0 \text{ mm}$ (máximo), utilizou-se $l_e = 0,8 \text{ mm}$. A medição da rugosidade da parede dos furos é ilustrada na Figura 3.10. Nota-se que, devido à altura da ponta do apalpador ($6,0 \text{ mm}$) do SJ-201P ser a mesma do diâmetro nominal dos furos ($\varnothing 6,0 \text{ mm}$), foi necessário realizar um corte com arco de serra na seção transversal da placa para a medição de todos os primeiros furos. Além disso, foi utilizado o filtro 2CR75 para gerar os valores de rugosidade média (R_a), desvio médio quadrático (R_q), rugosidade média parcial (R_z) e rugosidade total (R_t).



Figura 3.10 – Medição da rugosidade da parede dos furos

Os valores de rugosidade das superfícies fresadas foram obtidos na região de corte com avanço constante, ignorando a parcela inicial, de entrada da ferramenta, e final, de saída da ferramenta, em que há o giro da fresa sem movimento de avanço. Além disso, cada execução

foi medida pelo menos três vezes. No entanto, devido à grande dispersão dos resultados, em certos casos o número de medições foi superior a sete para que se tivesse uma maior confiabilidade dos resultados, realizando a média aritmética desses valores.

3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

Imagens das superfícies usinadas foram obtidas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) Zeiss Evo Ma10 disponível no Centro de Microscopia e Microanálise (CMM-UFRGS) para uma análise aprofundada. Cada amostra da superfície usinada foi cortada, limpa e seca para então, realizar a captura das imagens. As amostras prontas para a análise são mostradas na Figura 3.11a e o MEV utilizado na Figura 3.11b. Foi necessário utilizar a metalizadora Bal-Tec SCD 050 (Figura 3.11c) para criar um filme de ouro sobre as superfícies das amostras (Figura 3.11d), a fim de obter melhor qualidade das imagens.

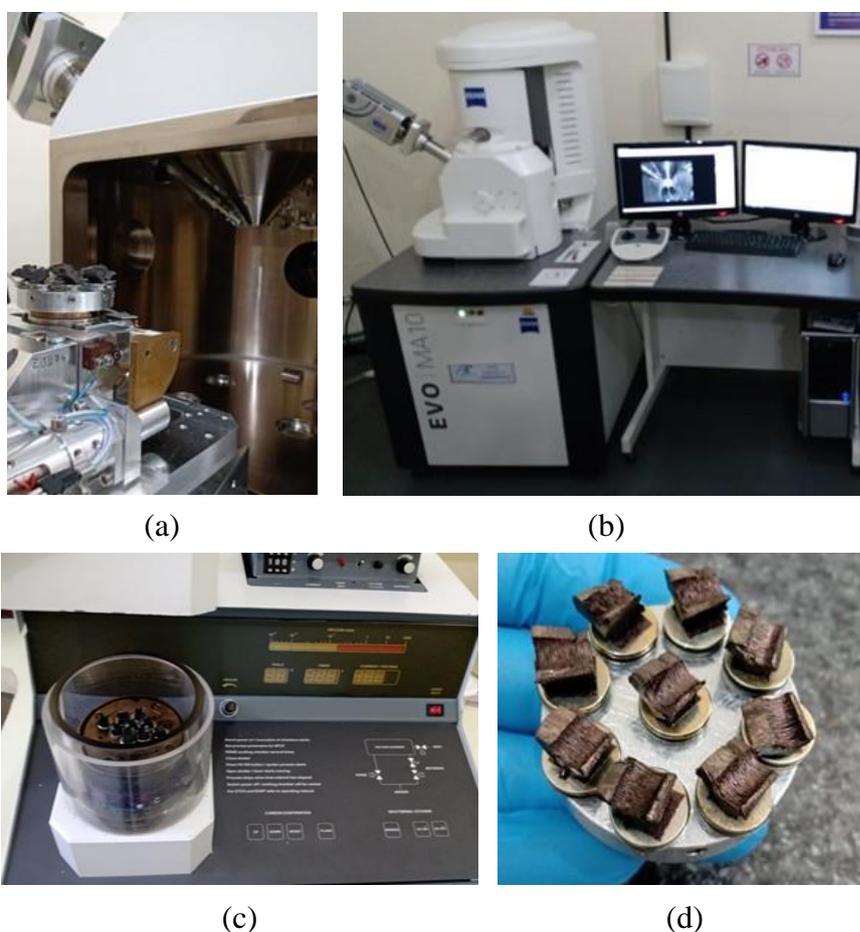


Figura 3.11 – Análise das superfícies: (a) preparação; (b) equipamentos. Processo de metalização: (c) equipamento; (d) superfície recoberta

3.7 Projeto de Experimentos

Com o objetivo de verificar a delaminação e rugosidade das superfícies usinadas, foram calculados os índices de prioridade PR dos principais parâmetros de processos que influenciam nessas variáveis de resposta. É importante selecionar corretamente os fatores controláveis para evitar que eles virem fatores de ruído, prejudicando a análise. Então, primeiramente, foram selecionadas as variáveis de resposta (Y_s) quantitativas que avaliam as características de qualidade delaminação e rugosidade. Foi atribuído uma nota de 1 a 10 para a importância relativa (IE) de cada variável de resposta (Tabela 3.2). Para o fresamento, a característica de qualidade selecionada é somente a rugosidade. Além das variáveis de resposta, são listados todos os parâmetros de entrada do processo (X_s) e seus níveis de investigação (

Tabela 3.3).

Com as variáveis de resposta e parâmetros do processo definidos, foram calculados os índices de priorização PR , considerando a importância relativa de cada variável resposta e a sua relação com o parâmetro do processo, conforme Equação (3). A determinação dos fatores controláveis de maior interesse para os processos de furação e fresamento está descrita no **Apêndice A.1**. Os resultados dos PR foram colocados em ordem decrescente na Tabela 3.4.

Assim, foram selecionados os parâmetros do processo que são controláveis e os que são fixos. Os fatores controláveis são aqueles que apresentam o maior valor de PR , o que significa que são os parâmetros que mais influenciam nas variáveis de resposta e devem ser investigados. Os demais parâmetros permaneceram fixos em um nível. O parâmetro velocidade de corte no fresamento apresenta valor de PR igual aos fatores controláveis selecionados, no entanto, diversos autores já comprovaram a sua influência na rugosidade da superfície usinada (variável de resposta) [Khairusshima et al., 2012; Kiliçkap et al., 2015; Voss et al., 2017], não havendo necessidade de estudá-lo novamente.

Tabela 3.2 – Variáveis de resposta

Características de Qualidade (CQ)	Variáveis de Resposta	Tipo	Alvo	IE
Menor delaminação possível na entrada	Y1: F_{dE}	Menor-é-melhor	1	7
	Y2: F_{daE}		1	8
Menor delaminação possível na saída	Y3: F_{dS}		1	9
	Y4: F_{daS}		1	10
Menor rugosidade possível	Y5: R_a e R_q		1 a 3 μm	9
	Y6: R_z e R_t		6 a 12 μm	9

Tabela 3.3 – Parâmetros do processo

Parâmetros do processo	Níveis de investigação
X1: Diâmetro da ferramenta	6 mm (broca) e 10 mm (fresa)
X2: Parâmetro de processo (v_c)	25, 50, 75 m/min (furar); 120 m/min (fresar)
X3: Parâmetro de processo (f)	25, 50, 75 $\mu\text{m/rev.}$ (furar); 70, 140, 210 $\mu\text{m/rev.}$ (fresar)
X4: Parâmetro de processo (a_p)	0,6, 1,0, 1,4 mm (fresar)
X5: Parâmetro de processo (LC)	Seco, AC, ACR
X6: Temperatura do ar comprimido	Com refrigeração (6 °C) ou sem (17 °C)
X7: Revestimento da ferramenta	Não
X8: Tipo de ferramenta	Broca helicoidal, fresa de topo
X9: Material da ferramenta	Metal-duro
X10: Ângulo de ponta (broca)	130°
X11: Orientação das fibras	Bidirecional (BD)
X12: Orientação das fibras	0°/90°

Tabela 3.4 – Fatores controláveis, seus níveis de investigação e fatores mantidos fixos.

Furação			Fresamento		
Fatores controláveis	PR	Intervalo de Investigação	Fatores controláveis	PR	Intervalo de Investigação
X3	468	25, 50, 75 $\mu\text{m/rev.}$	X3	162	70, 140, 210 $\mu\text{m/rev.}$
X2	447	25, 50, 75 m/min	X4	162	0,6, 1,0, 1,4 mm
X5	447	Seco, ACR	X5	162	Seco, AC, ACR
Fatores constantes	PR	Níveis fixos	Fatores constantes	PR	Níveis fixos
X1	414	6 mm	X1	108	10 mm
X6	420	6 °C	X2	162	120 m/min
X7	312	Sem revestimento	X6	108	6 °C e 17 °C
X8	414	Broca helicoidal	X7	108	Sem revestimento
X9	369	Metal-duro	X8	108	Fresa de topo
X10	393	130°	X9	108	Metal-duro
X11	393	BD	X11	108	BD
X12	393	0°/90°	X12	108	0°/90°

Os parâmetros referentes às ferramentas de corte e ao material usinado, mesmo não apresentando os maiores valores de *PR*, não seriam estudados devido às restrições de quantidade de material e variedades de ferramenta de corte.

Após, foi determinado o modelo estatístico para a execução dos experimentos. Como a furação utiliza pouco material, decidiu-se realizar o fatorial cruzado completo, considerando diferentes velocidades de corte (25, 50 e 75 m/min) e diferentes avanços (25, 50 e 75 $\mu\text{m}/\text{rev.}$), comparando ainda a furação a seco [nível baixo (1)] e com ACR [nível alto (2)]. Isto, portanto, resulta em $3^2 \cdot 2^1 = 18$ combinações de parâmetros, como mostra a Tabela 3.5. Ainda, decidiu-se realizar 10 furos em cada combinação de parâmetros, totalizando 180 furos.

Tabela 3.5 – Matriz experimental de furação.

Seco (1)			ACR (2)		
Execução	v_c [m/min]	f [$\mu\text{m}/\text{rev.}$]	Execução	v_c [m/min]	f [$\mu\text{m}/\text{rev.}$]
1	25	25	10	25	25
2	25	50	11	25	50
3	25	75	12	25	75
4	50	25	13	50	25
5	50	50	14	50	50
6	50	75	15	50	75
7	75	25	16	75	25
8	75	50	17	75	50
9	75	75	18	75	75

No fresamento, utilizou-se o método BBD para utilizar menos material devido ao tamanho mínimo de cada execução ocupar uma boa porção do CFRP. A matriz experimental através do BBD foi montada no software Minitab[®]19. Variou-se o avanço (70, 140 e 210 $\mu\text{m}/\text{rev.}$), profundidade de corte axial (0,6, 1,0 e 1,4 mm) e condição de lubrificação [Seco (-1), ar comprimido (0) e ar comprimido refrigerado (+1)], conforme a Tabela 3.6. O número de interações dos três parâmetros controláveis de entrada em três níveis cada gerariam 27 execuções em um experimento Fatorial Completo. Entretanto, com BBD, pôde-se reduzir o número de amostras para 15 (Fatorial Incompleto) e torná-las aleatórias.

Após a execução dos experimentos, o software Minitab[®]19 foi utilizado para realizar a Análise de Variância (ANOVA). Para os resultados do fresamento, foi necessário utilizar a ANOVA reduzida, no qual o efeito com maior *Valor-P* na análise é eliminado. Após eliminá-lo, realiza-se uma nova análise e uma nova eliminação do efeito com maior *Valor-P*, repetindo

o processo até que todos estejam abaixo de 0,05 (garantindo confiabilidade de 95%) ou até atingir o valor mínimo de $R^2 = 70\%$ (admitindo-se um erro máximo de 30%).

Tabela 3.6 – Matriz experimental de fresamento

Ordem de execução	f [$\mu\text{m}/\text{rev.}$]	a_p [mm]	LC
1	210	0,6	AC
2	140	1,0	AC
3	70	1,0	ACR
4	140	0,6	ACR
5	210	1,0	ACR
6	70	0,6	AC
7	140	0,6	Seco
8	210	1,4	AC
9	70	1,4	AC
10	210	1,0	Seco
11	140	1,4	ACR
12	140	1,4	Seco
13	70	1,0	Seco
14	140	1,0	AC
15	140	1,0	AC

Após o processamento estatístico de todas as informações, a otimização dos parâmetros controláveis foi realizada com auxílio do software Minitab® 19.

Um ensaio de validação foi efetuado posteriormente utilizando os níveis ótimos dessas variáveis para o processo de fresamento e verificou-se a qualidade dessas superfícies usinadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram divididos entre os processos de furação e fresamento, devido às diferenças de variáveis de resposta e fatores controláveis analisados em cada processo.

4.1 Furação

Esta seção apresenta os valores dos fatores de delaminação ajustados, os valores dos parâmetros de rugosidade, a ANOVA, a discussão dos resultados e a otimização dos fatores controláveis. Vale destacar que durante o experimento, o desgaste de flanco (VB) foi analisado. Porém, o valor de VB não foi significativo mesmo após a realização dos 180 furos.

4.1.1 Delaminação

A delaminação foi investigada com o fator de delaminação ajustado (F_{da}) nas superfícies do material por onde a broca entrou (F_{daE}) e por onde ela saiu (F_{daS}), tanto no primeiro quanto no décimo furo de cada combinação de parâmetros. Os resultados estão mostrados no **Apêndice A.2** e representados graficamente na Figura 4.1 (entrada dos furos) e na Figura 4.2 (saída dos furos). As discussões serão apresentadas na subseção **4.1.4 – Discussão dos Resultados**.

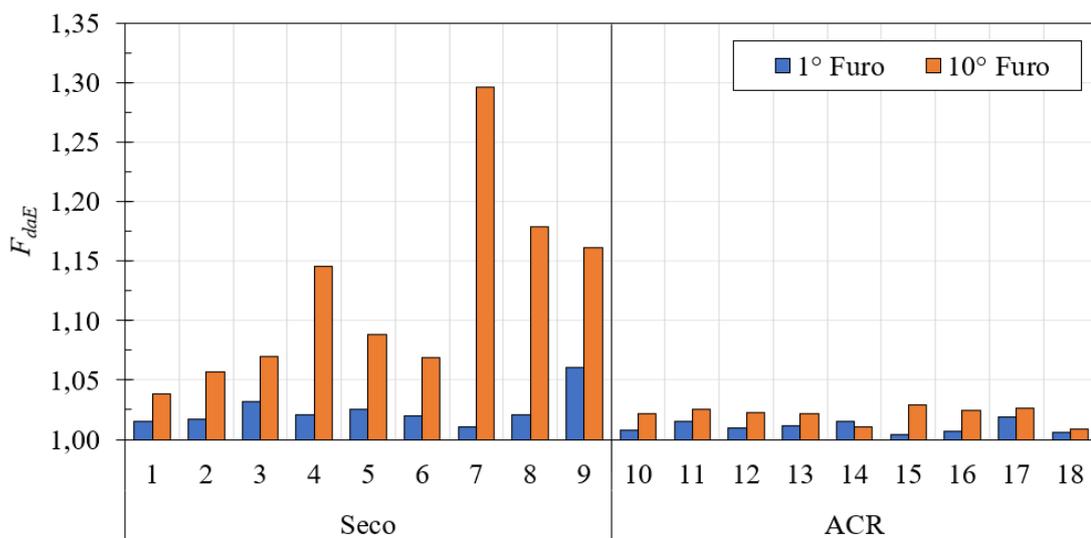


Figura 4.1 – Fator de delaminação ajustado na entrada do 1º e do 10º furo de cada execução.

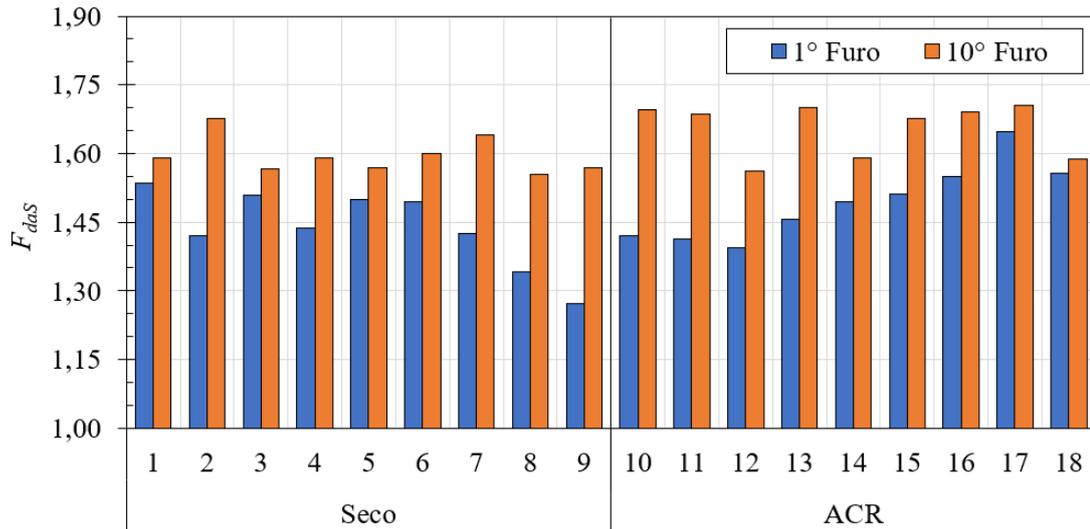


Figura 4.2 – Fator de delaminação ajustado na saída do 1° e do 10° furo de cada execução.

4.1.2 Rugosidade

Os valores dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_z e R_t mensurados nas paredes dos primeiros furos nas diferentes combinações de fatores controláveis estão no **Apêndice A.3** e são representados graficamente na Figura 4.3 (R_a e R_q) e na Figura 4.4 (R_z e R_t). As discussões serão apresentadas na subseção **4.1.4 – Discussão dos Resultados**.

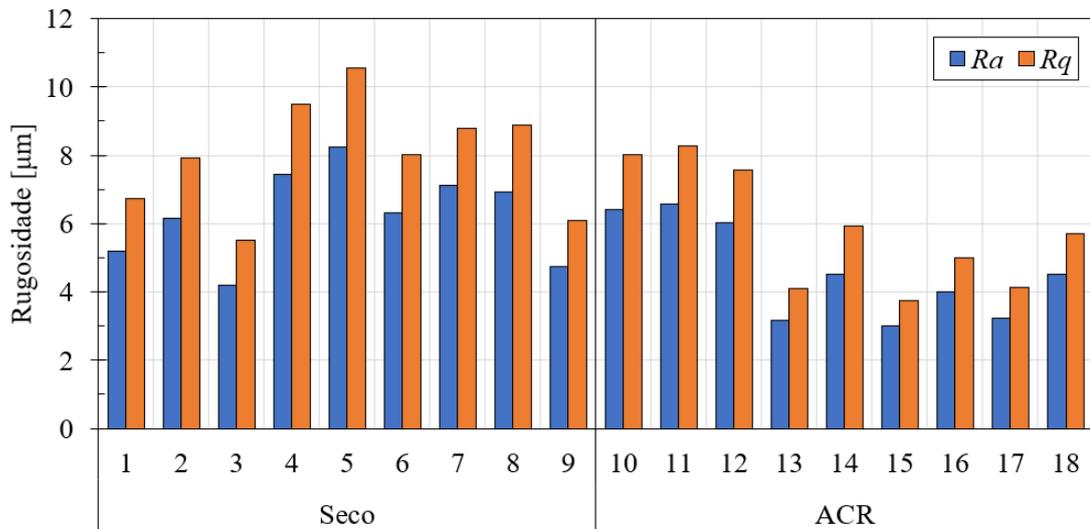


Figura 4.3 – Valores de rugosidade R_a e R_q gerados no primeiro furo de cada combinação.

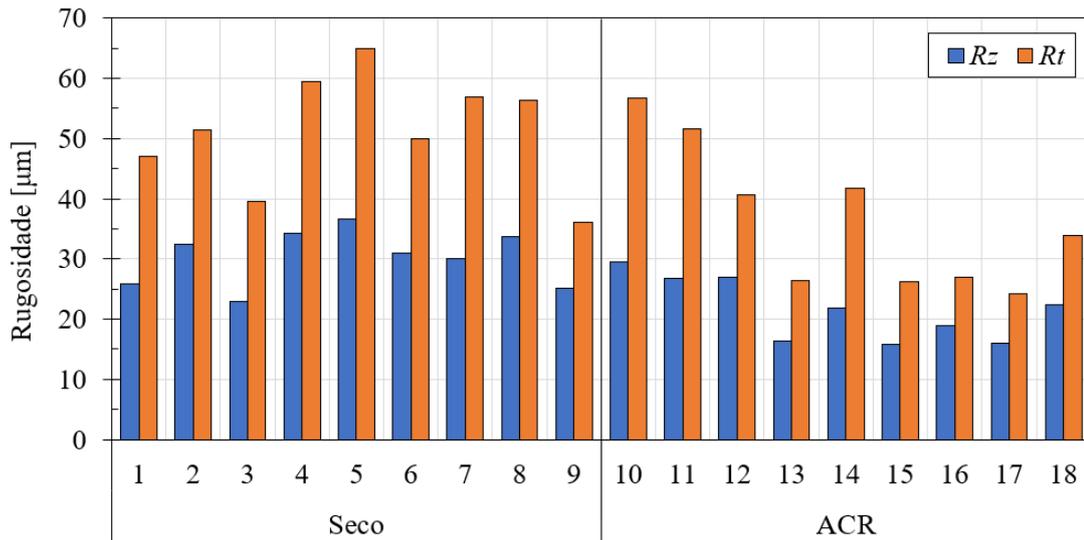


Figura 4.4 – Valores de rugosidade R_z e R_t gerados no 1º furo de cada combinação.

4.1.3 Análise de Variância

Os resultados de fator de delaminação ajustado e rugosidade da parede dos furos foram analisados através das análises de variância (ANOVA). O coeficiente de determinação (R^2) foi inferior a 70% para o F_{das} do 10º furo de cada execução e para os resultados de R_a e R_q , indicando que o somatório das contribuições dos fatores significativos foi inferior a 70%. A Tabela 4.1 apresenta os resultados da análise de F_{da} , e a Tabela 4.2 dos parâmetros de rugosidade. As discussões serão apresentadas na subseção 4.1.4 – Discussão dos Resultados.

Tabela 4.1 – ANOVA dos fatores de delaminação ajustado.

Fatores controláveis	F_{daE01}		F_{daE10}		F_{daS01}		F_{daS10}	
	Valor-P	Contrib. (%)						
v_c	0,026	19,0	0,003	14,9	0,637	0,6	0,881	0,1
f	0,031	17,5	0,167	2,1	0,692	0,4	0,087	18,6
LC	0,052	13,3	0,001	39,5	0,067	11,4	0,040	29,0
$v_c \times v_c$	0,645	0,6	0,167	2,1	0,409	2,0	0,816	0,3
$f \times f$	0,537	1,1	0,249	1,4	0,832	0,1	0,770	0,5
$v_c \times f$	0,126	7,6	0,025	6,7	0,575	0,9	0,919	0,1
$v_c \times LC$	0,495	1,4	0,001	21,2	0,001	59,2	0,576	1,7
$f \times LC$	0,038	15,7	0,075	3,8	0,448	1,6	0,369	4,5
R^2	76,0%		91,7%		76,3%		54,7%	

Tabela 4.2 – ANOVA dos parâmetros de rugosidade na furação.

Fatores controláveis	R_a		R_q		R_z		R_t	
	Valor-P	Contrib. (%)						
v_c	0,380	3,1	0,330	3,7	0,309	3,8	0,113	8,2
f	0,319	4,0	0,328	3,7	0,539	1,3	0,151	6,5
LC	0,020	29,0	0,015	31,5	0,005	45,8	0,006	35,0
$v_c \times v_c$	0,976	0,0	0,910	0,1	0,985	0,0	0,766	0,3
$f \times f$	0,250	5,5	0,203	6,6	0,249	5,0	0,154	6,5
$v_c \times f$	0,896	0,1	0,944	0,0	0,762	0,3	0,698	0,4
$v_c \times LC$	0,037	21,7	0,041	19,7	0,077	13,0	0,033	16,8
$f \times LC$	0,320	4,0	0,343	3,5	0,518	1,5	0,368	2,4
R^2	67,3%		68,7%		70,7%		76,0%	

4.1.4 Discussão dos Resultados

As análises mostraram que os fatores de delaminação ajustado na entrada dos furos (F_{daE}), causados pelo efeito *peel-up* das fibras, sempre foram menores que na saída (F_{daS}) causados pelo efeito *push-down*. Em alguns casos, a diferença chega a quase 50%, estando o resultado de acordo com Geng et al., 2019.

A utilização do ACR reduziu de maneira expressiva os valores de F_{daE} em comparação ao corte a seco, principalmente no décimo furo de cada execução, mesmo para valores elevados de velocidades de corte e avanços, mostrando a influência da temperatura durante o processo. Abish et al., 2018, e Fu et al., 2018, também observaram melhora na qualidade da superfície na furação com a aplicação de ACR.

4.1.4.1 Fator de delaminação ajustado na entrada dos furos

Para o F_{daE} do primeiro furo de cada experimento (F_{daE01}), o parâmetro que mais influenciou foi a velocidade de corte v_c (19%), seguidos pelo avanço f (17,5%) e pela condição lubrificante LC (13,3%), mas a combinação $f \times LC$ (15,7%) também apresentou elevada influência. A Figura 4.5 apresenta os gráficos dos efeitos principais e as interações que foram significativas para o F_{daE01} . Krishnaraj et al., 2012, mostraram que altos valores de v_c aquecem o material, aumentando o fator de delaminação. Velayudham e Krishnamurthy, 2007, verificaram que a delaminação foi influenciada negativamente pelo aumento de f . Então, ao

utilizar o ACR, que se mostra positivo na diminuição da delaminação, com um f baixo, tem-se uma redução no grau de delaminação. Porém, todos valores ficaram muito próximos, com os menores valores obtidos ao utilizar ACR. O uso deste possibilitou uma diminuição máxima do F_{daE01} de apenas 4% em relação ao corte a seco (execuções 9 e 18). Isso porque a broca pode não ter tido tempo suficiente para aumentar muito a temperatura na entrada do primeiro furo.

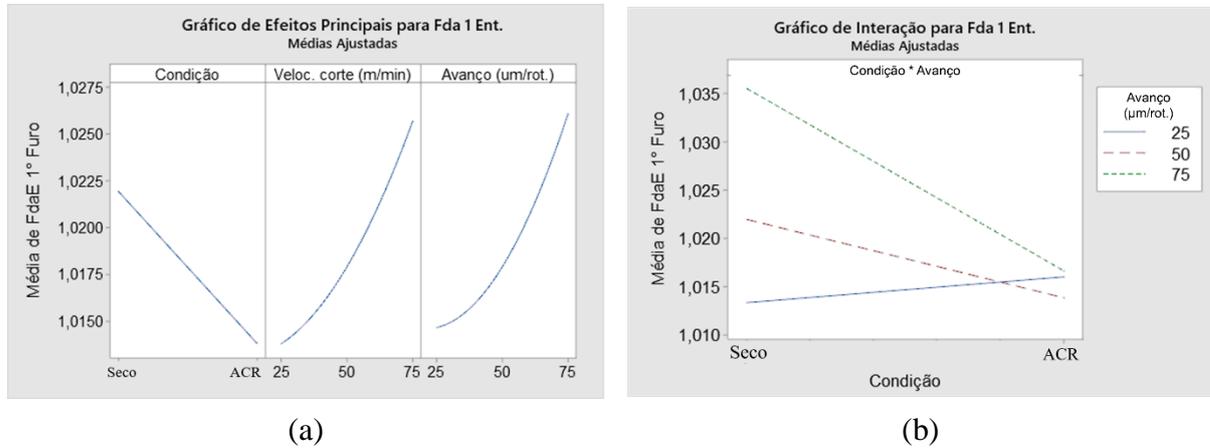


Figura 4.5 – Gráficos dos fatores significativos do F_{daE01} na furação: (a) efeitos principais; (b) efeitos de interação dos fatores.

Para o F_{daE} do décimo furo de cada experimento (F_{daE10}), o parâmetro mais significativo foi LC (39,5%), seguido por v_c (14,9%), mas as combinações $v_c \times LC$ (21,2%) e $v_c \times f$ (6,7%) também apresentam influência significativa. A combinação $f \times LC$ foi parcialmente significativa (intervalo de confiança entre 90 e 95%), pois teve $Valor-P = 0,075$ e contribuição de 4,1%. Os efeitos principais e as interações são mostrados nos gráficos da Figura 4.6.

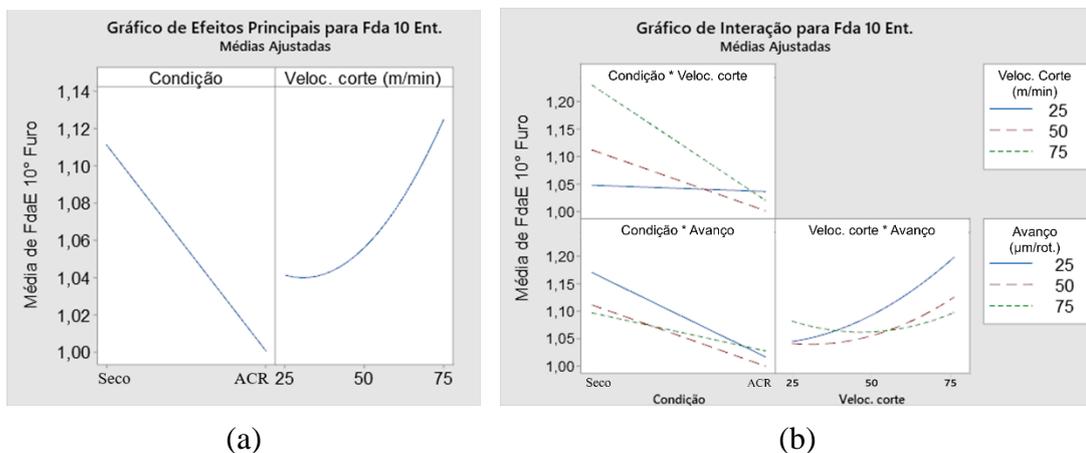


Figura 4.6 – Gráficos dos fatores significativos do F_{daE10} na furação: (a) efeitos principais; (b) efeitos de interação dos fatores.

Ha et al., 2017, citam que a temperatura aumenta muito durante a usinagem, tendo seu pico no final devido ao calor acumulado, o que diminui ao utilizar o ar resfriado. Ainda para o F_{daE10} , os valores foram todos maiores em relação aos de F_{daE01} ao usinar a seco e semelhantes ou maiores ao utilizar ACR, o que se deve ao aquecimento acumulado da ferramenta após usinar uma sequência de furos ininterruptos, aumentando a ocorrência de danos conforme constatado por Fu et al., 2018. Há maior influência do ACR no F_{daE10} em relação ao F_{daE01} devido à maior temperatura da broca com a sequência de furos, mostrando que ACR influi na diminuição da temperatura da broca e não do CFRP, visto que o material está em temperatura ambiente tanto para o primeiro furo quanto para o décimo furo, conforme cita Yashiro et al., 2013.

Ao comparar o F_{daE10} dos experimentos a seco e com ACR, todos tiveram valores menores com o ACR, chegando até a 25% de diminuição em relação ao corte a seco (execuções 7 e 16). Os menores valores a seco foram com $v_c = 25$ m/min devido à baixa velocidade de corte (execuções 1, 2 e 3), velocidade que não aumentou significativamente a temperatura da ferramenta, gerando valores semelhantes aos encontrados ao utilizar o ACR. Para Ben et al., 2012, e Krishnaraj et al., 2012, o incremento de v_c aumenta a delaminação no corte a seco por causa do aumento da temperatura, a qual diminui a rigidez da matriz. Com o aumento de v_c , as diferenças de F_{daE10} entre o corte a seco e com ACR também aumentaram e, na $v_c = 75$ m/min, houve melhorias de 25%, 13% e 15% nos avanços $f = 25, 50$ e 75 $\mu\text{m}/\text{rev.}$, respectivamente.

Um exemplo da diferença de delaminação gerada na entrada entre o 1° e o 10° furo e entre as condições a seco e com ACR para $v_c = 50$ m/min e $f = 25$ $\mu\text{m}/\text{rev.}$ é apresentado na Figura 4.7. No caso, a diminuição da rigidez da matriz facilita o efeito de *peel-up*, aumentando o valor do F_{daE10} . Já com o uso de ACR, o *peel-up* é menor, mesmo no 10° furo.

4.1.4.2 Fator de delaminação ajustado na saída dos furos

O F_{daS} do 1° primeiro furo de cada experimento (F_{daS01}) foi influenciado pela combinação $v_c \times LC$ (59.2%). A condição de corte foi parcialmente significativa (*Valor-P* = 0.067 e contribuição de 11.4%). A Figura 4.8 apresenta os gráficos de efeito principal e de interação dos fatores significativos. A ANOVA permitiu identificar que os valores de F_{daS01} possuem tendências contrárias dependentes da v_c e da LC . Em baixo nível de v_c , o uso de ACR gera menores resultados de F_{daS01} enquanto em maiores v_c , a condição de corte a seco proporciona os menores valores, que se observa na Figura 4.8.

Quatro execuções tiveram F_{daS01} menores com ACR em relação ao corte seco; porém, as execuções 8, 9 (Seco) e 17, 18 (ACR) ($v_c = 75$ m/min, $f = 50$ e 75 $\mu\text{m}/\text{rev.}$) tiveram aumento de até 22% ao usar o ACR. Deste modo, percebe-se a influência da força de avanço sobre F_{daS} , assim como em Sorrentino et al., 2018.

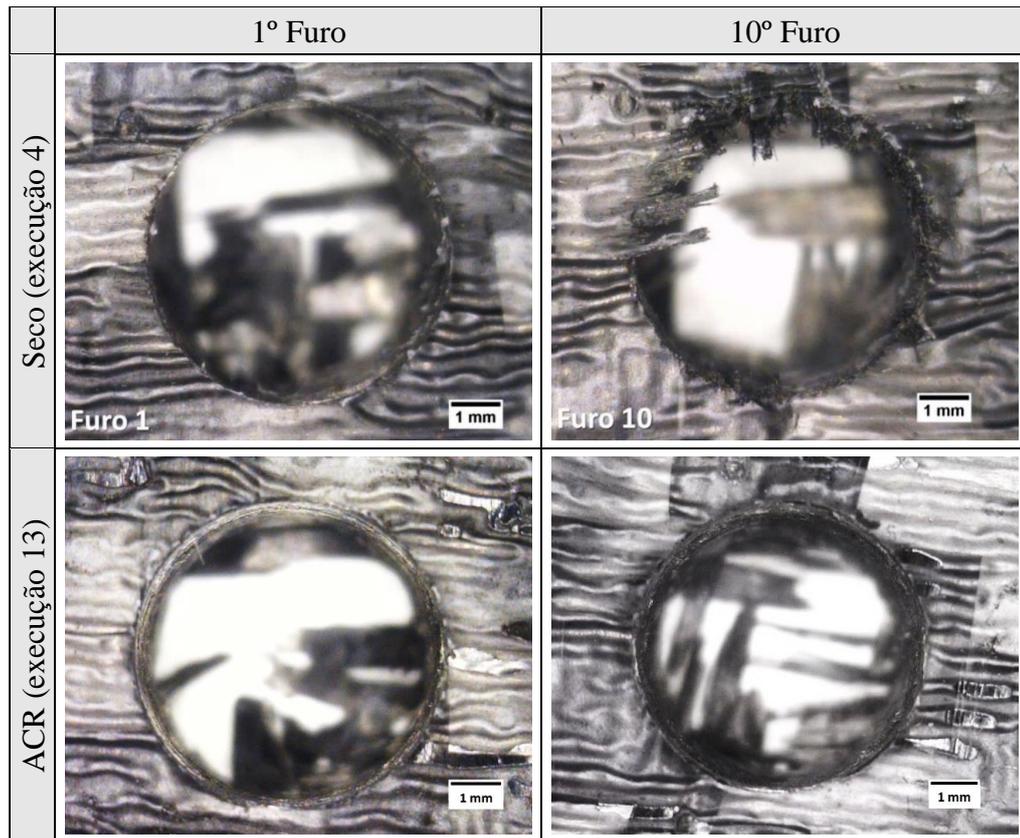


Figura 4.7 – Imagens da delaminação na entrada dos furos nas execuções 4 (seco) e 13 (ACR) com $v_c = 50$ m/min e $f = 25$ μ m/rev.

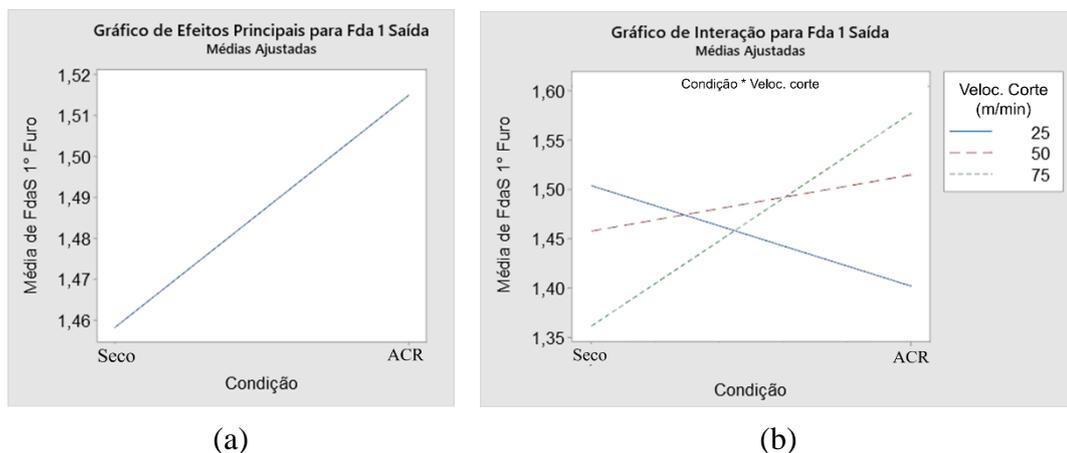


Figura 4.8 – Gráficos dos fatores significativos do F_{daS01} na furação: (a) efeitos principais; (b) efeitos de interação dos fatores.

A força de avanço depende fortemente dos parâmetros de corte e não é possível controlá-la diretamente. Como o avanço(f) é o parâmetro mais significativo sobre a força de avanço, esta pode ser controlada indiretamente por f [Karimi et al., 2016]. No corte a seco, ao aumentar a

velocidade de corte (v_c), a temperatura também aumenta. Isso diminui a rigidez da matriz de forma que, mesmo com altos valores de f , a força de avanço é baixa e a delaminação fica menor [Joshi et al., 2018; Karnik et al., 2008]. No entanto, a utilização de ACR diminui o aumento de temperatura, mantendo parte da rigidez da matriz. Assim, a força de avanço gerada na furação com o uso de ACR é maior em comparação com o corte a seco [Abish et al., 2018; Joshi et al., 2018]. Então, com altos valores de v_c e f nas execuções 16, 17 e 18 ($v_c = 75$ m/min e $f = 25, 50$ e 75 $\mu\text{m}/\text{rev}$.), a força de avanço aumentou ainda mais [Eneyew e Ramulu, 2014] e prejudicou a delaminação, ao comparar com as execuções 7, 8 e 9 realizadas a seco.

Observou-se que a utilização de ACR resultou em aumento do diâmetro máximo da delaminação (D_{max}) na saída. As fibras permaneceram rígidas e foram dobradas em uma região mais afastada da borda do furo, aumentando a ocorrência de *push-down*. Porém, o ACR ajudou a diminuir a ocorrência de fibras não cortadas, observado por Koklu e Morkavuk, 2019, e que está mostrado na comparação da Figura 4.9.

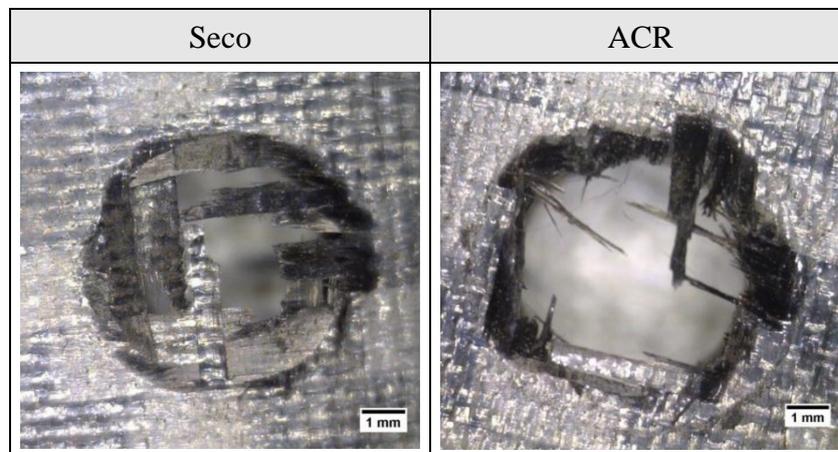


Figura 4.9 – Delaminação e fibras não cortadas na saída do 1º furo das execuções com $v_c = 75$ m/min e $f = 75$ $\mu\text{m}/\text{rev}$.

Quanto ao F_{das} do 10º furo de cada execução (F_{das10}), a ANOVA teve um $R^2 = 54,7\%$ (abaixo do recomendado de 70%), indicando que a resposta não se ajusta muito bem ao modelo devido ao tamanho do erro (45,3%). O único fator influente foi a condição lubrificante (LC) com $Valor-P = 0,040$ e contribuição de 29%. O fator f foi quase significativo (intervalo de confiança entre 90 e 95%), pois teve um $Valor-P = 0,087$ e sua contribuição foi de 18,6%. A Figura 4.10 apresenta os gráficos dos efeitos principais desses fatores.

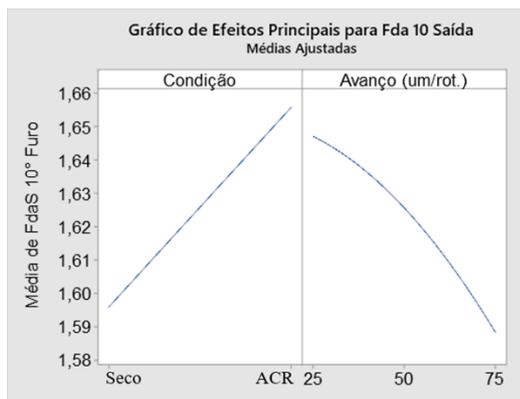


Figura 4.10 – Gráfico da influência individual dos fatores no F_{daS10} de cada execução.

Os resultados de F_{daS10} apresentaram valores maiores em relação ao do F_{daS01} , tendência semelhante aos resultados na entrada dos furos, mesmo que o fenômeno de delaminação do furo seja diferente na entrada (*peel-up*) e na saída (*push-down*). A utilização de ACR não melhorou o F_{daS10} em relação ao corte a seco, aumentando a delaminação em até 9% nas execuções 8 (Seco) e 17 (ACR) ($v_c = 75$ m/min e $f = 50$ μ m/rev.). A delaminação na saída é causada principalmente pela força de avanço, que aumenta com o uso de ACR. Quanto à velocidade de corte (v_c) e ao avanço (f), não há uma tendência clara de efeito sobre F_{daS10} .

A análise da temperatura na ferramenta de corte poderia esclarecer os resultados. Como o material possui elevada espessura ($8,7 \pm 0,3$ mm), essa temperatura pode ser crucial aos danos causados no CFRP. Devitte et al., 2021, verificaram que a temperatura não ultrapassou 50°C ao furar a seco uma placa de CFRP com 2,4 mm de espessura utilizando uma broca com 6 mm de diâmetro. Assim, acredita-se que a temperatura atingida no presente trabalho foi relativamente maior (não sendo possível saber quanto). Porém, suspeita-se que a mesma ainda não alcançou o valor da temperatura de transição vítrea da matriz polimérica (130°C).

4.1.4.3 Rugosidade da parede do furo

A ANOVA mostrou os fatores controláveis que afetaram os parâmetros de rugosidade.

A variável de resposta R_a foi influenciada por LC , com contribuição de 29% e da combinação $v_c \times LC$, com contribuição de 21,7%. A Figura 4.11 mostra os gráficos dos efeitos principais e interações significativas para o R_a . O R_q também foi influenciado por LC , com contribuição de 31,5% e da combinação $v_c \times LC$, com contribuição de 19,7%. O efeito principal LC e a interação $v_c \times LC$ estão apresentados nos gráficos da Figura 4.12.

R_z teve influência significativa apenas de LC (64,8%); porém, a combinação $v_c \times LC$ foi parcialmente significativa (18,4%), isto é, um intervalo de confiança entre 90 e 95%. A Figura 4.13 apresenta o efeito principal e a interação dos fatores significativos para R_z .

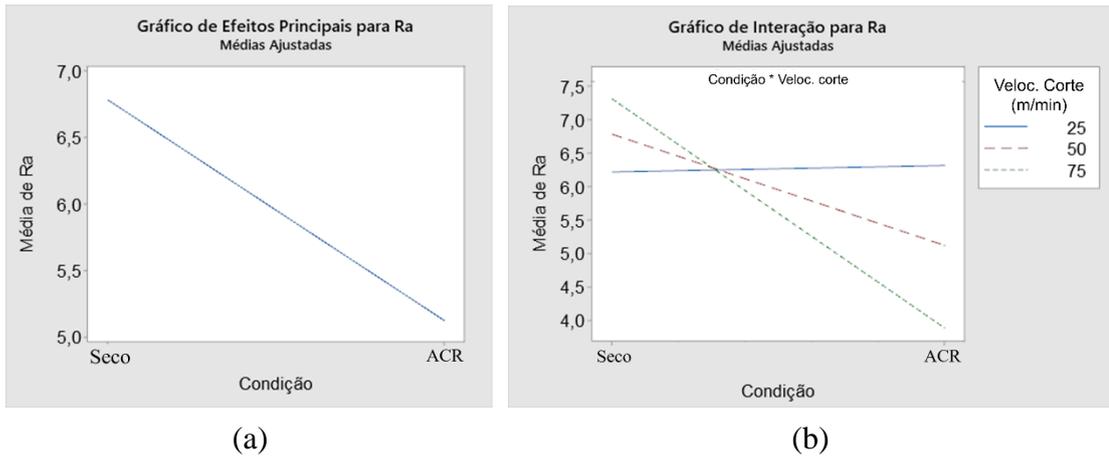


Figura 4.11 – Gráficos dos fatores significativos de R_a na furação: (a) efeito principal de LC ; (b) efeito de interação $v_c \times LC$.

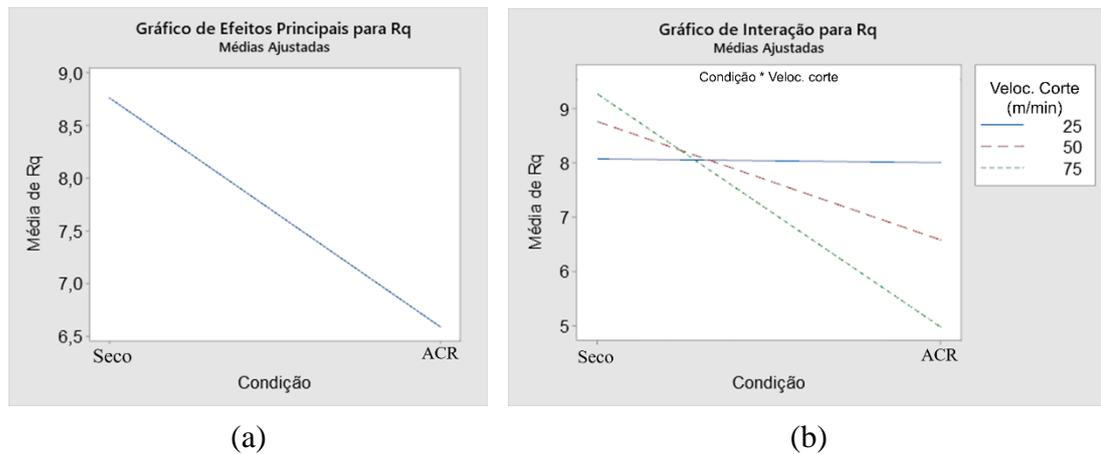


Figura 4.12 – Gráficos dos fatores significativos de R_q na furação: (a) efeito principal de LC ; (b) efeito de interação $v_c \times LC$.

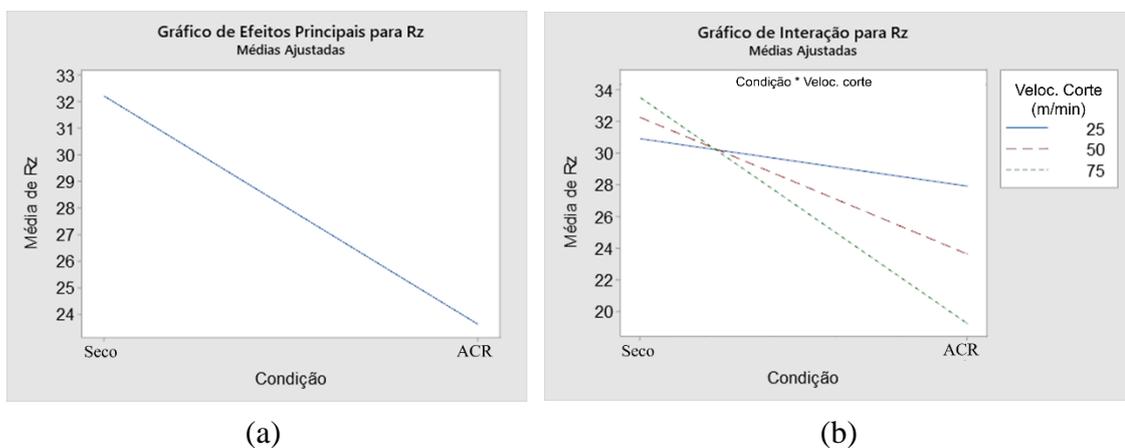


Figura 4.13 – Gráficos dos fatores significativos de R_z na furação: (a) efeito principal de LC ; (b) efeito de interação $v_c \times LC$.

Já sobre R_t , a influência foi significativa de LC (46%) e da combinação $v_c \times LC$ (22.1%). O efeito principal LC e a interação $v_c \times LC$ são mostrados na Figura 4.14.

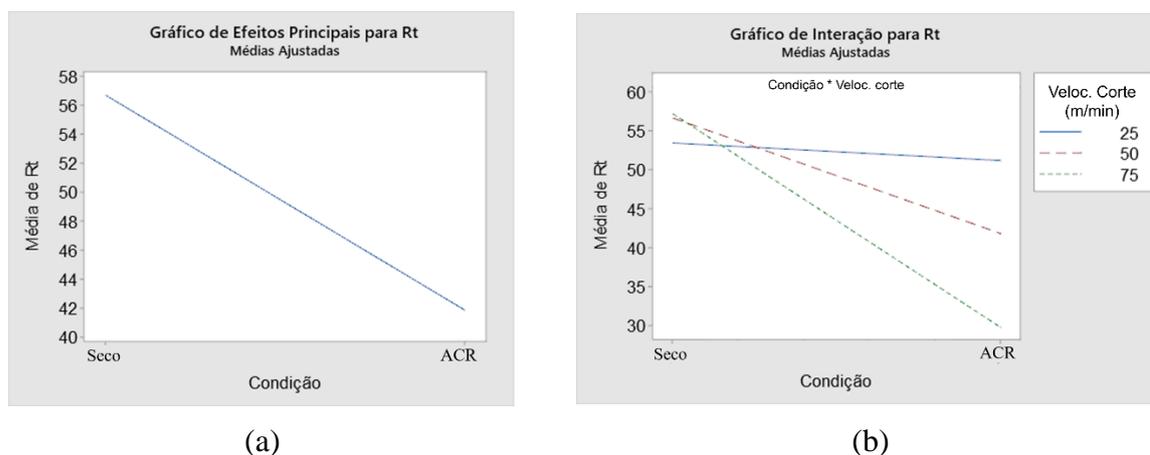


Figura 4.14 – Gráficos dos fatores significativos de R_t na furação: (a) efeito principal de LC ; (b) efeito de interação $v_c \times LC$.

Nota-se que todos os parâmetros tiveram comportamento bem semelhante. Ainda, os parâmetros R_a e R_q não obtiveram um R^2 superior a 70%, porém, o parâmetro R_t já seria o suficiente para avaliar a superfície [Eneyew e Ramulu, 2014].

O aumento de v_c prejudicou a qualidade da superfície porque a placa de CFRP utilizada possui elevada espessura ($8,7 \pm 0,3$ mm) em relação ao diâmetro da broca (6 mm). Isso ajuda a aumentar a temperatura da ferramenta durante o corte e seus efeitos negativos na qualidade da superfície, justificando o ACR como o fator mais influente para a rugosidade. O resultado está em conformidade com Abish et al., 2018.

Durante o corte a seco, as menores velocidades de corte ($v_c = 25$ m/min) produziram melhores resultados em relação a $v_c = 50$ e 75 m/min por causa da menor temperatura gerada [Ben et al., 2012; Pérez-Pacheco et al., 2011]. Além disso, o menor avanço diminui os danos superficiais [Yashiro et al., 2013]. O aumento da v_c causa o aumento da temperatura, que prejudica a superfície. Nota-se que a execução 9 ($v_c = 75$ m/min) gerou um resultado melhor em comparação às outras execuções a seco, e resultado semelhante às usinadas com ACR. El-Hofy et al., 2017, citam que o referido fenômeno é devido à elevada velocidade de avanço (no caso, 300 mm/min na execução 9) que reduz o tempo de corte e o tempo de contato entre a broca e a peça, diminuindo assim a temperatura na região de corte.

Nas execuções com v_c e f maiores, a utilização de ACR (execuções de 13 a 17) resultou em menores valores de rugosidade em comparação ao corte a seco (execuções de 4 a 8), com diminuição de até 58% em R_a , 52% em R_z , 57% em R_q e 57% em R_t . O uso de ACR minimizou

os danos referentes à temperatura em altas v_c , o que gerou melhores resultados, pois a maior v_c é benéfica para a rugosidade [Abish et al., 2018; Eneyew e Ramulu, 2014; Joshi et al., 2018; Liu et al., 2018]. A execução 18 teve resultados semelhantes à execução 9, com uma redução pequena dos parâmetros em comparação ao corte a seco (5% para R_a , 11% para R_z , 7% para R_q e 7% para R_t), devido aos altos valores de v_c (75 m/min) e f (75 $\mu\text{m}/\text{rev.}$). Joshi et al., 2018, notaram que em altíssimas v_c , a alta temperatura gerada prejudica a rugosidade devido ao ACR não ser capaz de diminuir a temperatura, gerando os resultados semelhantes ao corte a seco.

4.1.4.4 Análise das imagens geradas por MEV

A Figura 4.15 mostra as imagens obtidas através do MEV da parede dos furos nas execuções 4 (Seco) e 13 (ACR) usando $v_c = 50$ m/min e $f = 25$ $\mu\text{m}/\text{rev.}$. Percebe-se grande variação entre o corte a seco e com ACR. Diversas crateras são vistas no corte a seco, além de separação de fibras da matriz, grande variação entre as camadas do laminado. Há ainda uma maior degradação da matriz, deixando as fibras expostas sem resina. Essa diferença entre as superfícies usinadas a seco e com ACR é percebida em todas as execuções com $v_c = 50$ e 75 m/min, não somente entre a 4 e a 13. O rompimento das fibras é facilitado pelas baixas temperaturas, pois as fibras perdem parte de sua resiliência sob o ACR, evitando o arrancamento das mesmas, e gerando superfícies menos rugosas após o corte; no caso, a ocorrência de fibras arrancadas causa grandes cavidades na superfície. No corte a seco, o arrancamento das fibras e as separações entre matriz e fibras crescem com o aumento da temperatura, agravando a qualidade da superfície usinada [Abish et al., 2018; Fu et al., 2018; Hou et al., 2020; Joshi et al., 2018; Xu et al., 2013]. Outra observação sobre a rugosidade foi a grande variação em um mesmo furo, e nas três medições, perfis diferentes foram encontrados. Eneyew e Ramulu, 2014, explicaram que essas variações podem ocorrer em locais onde as fibras de carbono foram arrancadas, formando vales, onde há lascas ou ainda trincas.

Para demonstrar essa variação, a Figura 4.16 apresenta os menores e os maiores valores de rugosidade nos três perfis medidos do 1° furo para a execução 4 (Seco) e a Figura 4.17 para a execução 13 (ACR) usando $v_c = 50$ m/min e $f = 25$ $\mu\text{m}/\text{rev.}$. A área formada nos gráficos demonstra essa variação de medidas. O uso do ACR manteve os perfis de rugosidade semelhantes em toda a extensão da parede dos furos.

A Figura 4.18 apresenta as execuções 6 (Seco) e 15 (ACR), ambas com $v_c = 50$ m/min e $f = 75$ $\mu\text{m}/\text{rev.}$, corroborando as diferenças entre o 1° e 10° furo. Nota-se para ambas as condições de LC que a proporção dos danos superficiais aumenta com a quantidade de furos ininterruptos, possivelmente devido ao calor acumulado (resultado análogo ao da delaminação).

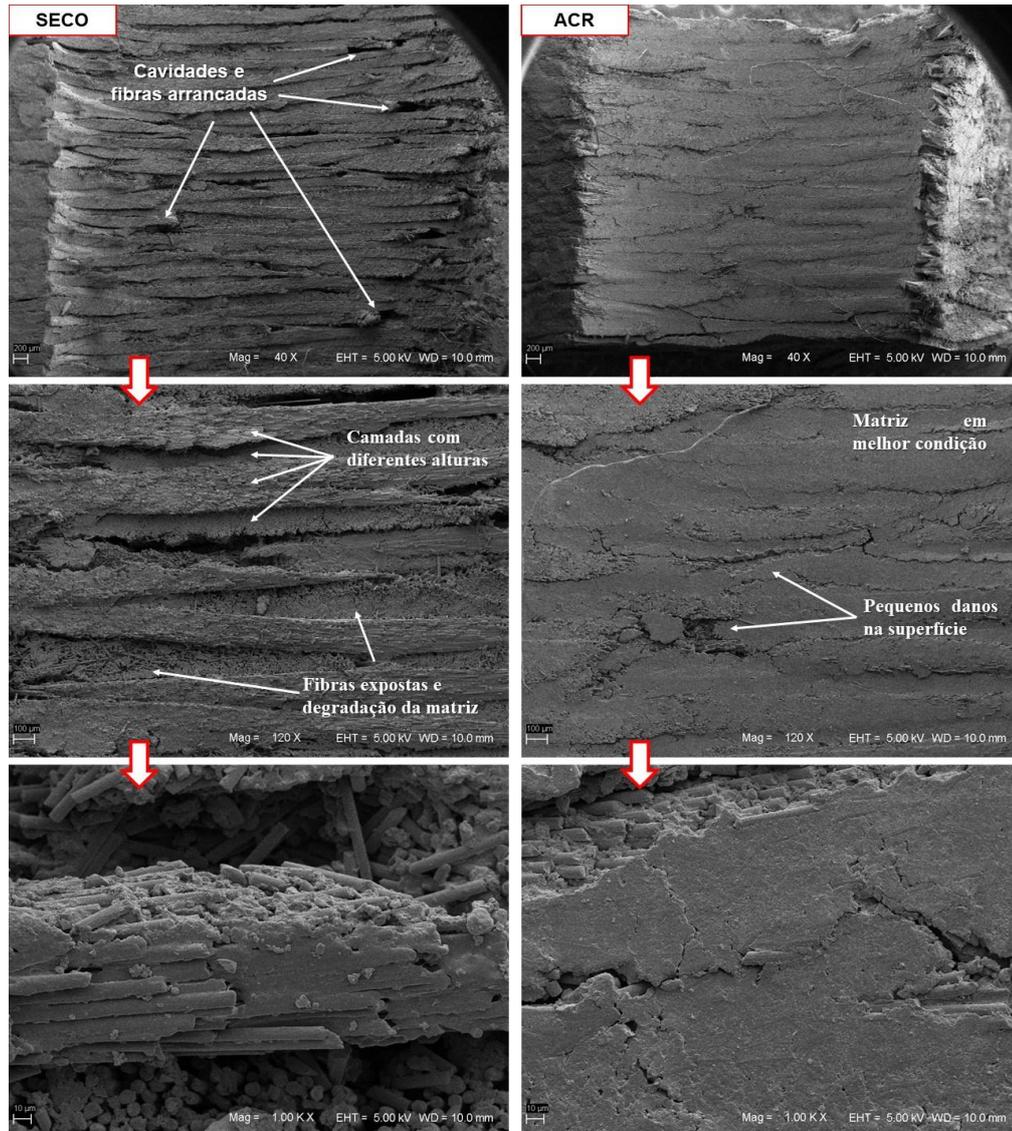


Figura 4.15 – Textura da parede interna do 1º furo para as condições a seco e com ACR usando $v_c = 50$ m/min e $f = 25$ μ m/rev.

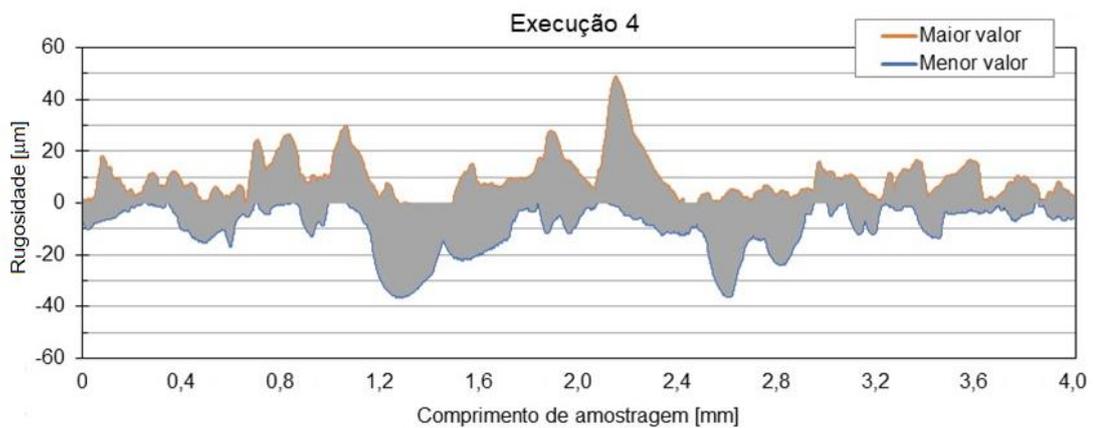


Figura 4.16 – Variação entre valores máximos e mínimos da rugosidade obtidos do 1º furo da execução 4 (Seco).

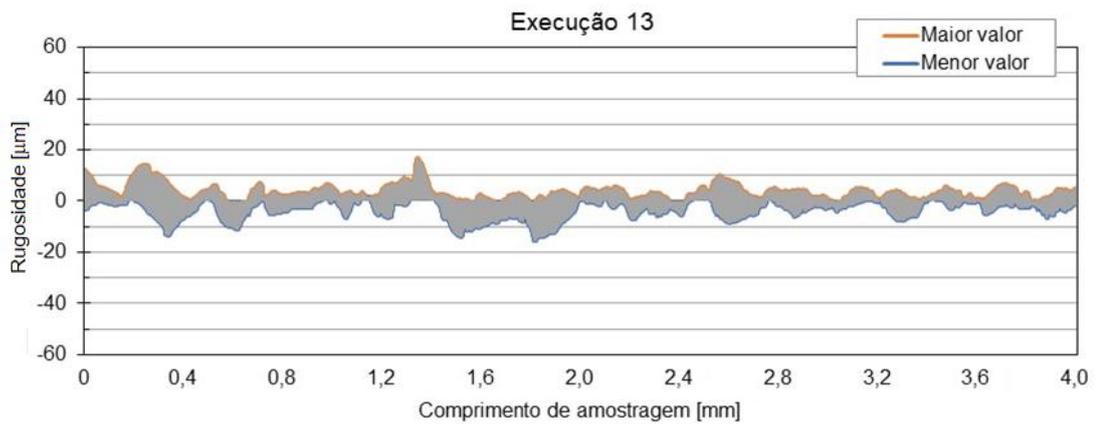


Figura 4.17 – Variação entre valores máximos e mínimos da rugosidade obtidos do 1º furo da execução 13 (ACR).

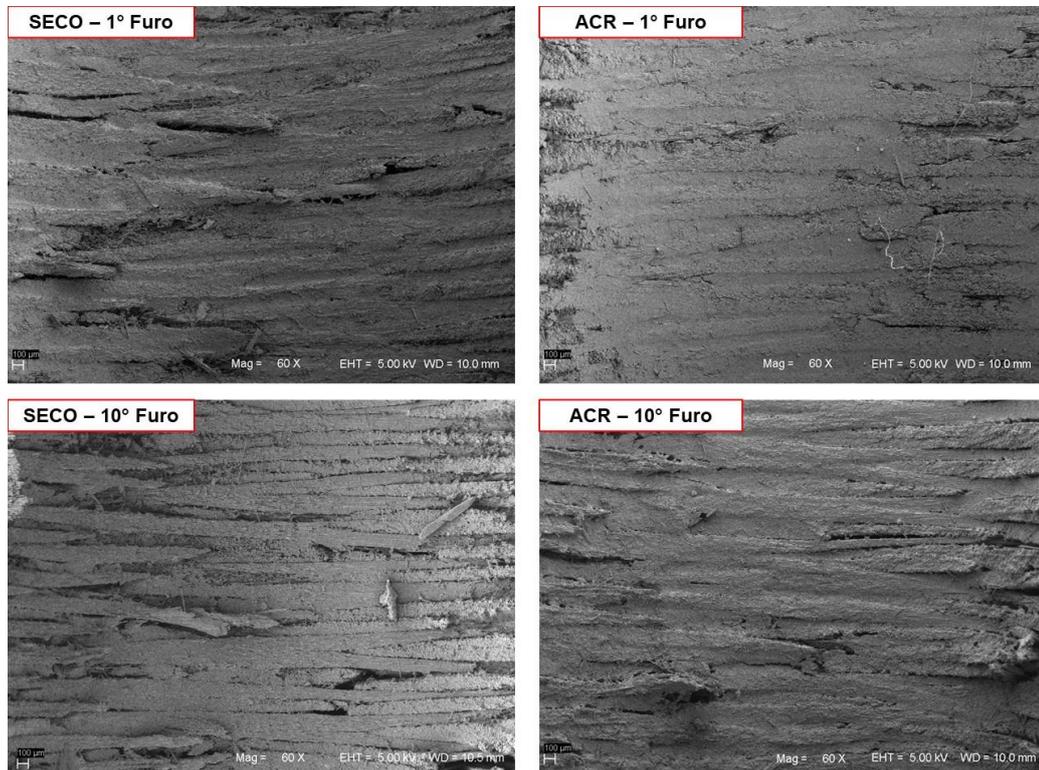


Figura 4.18 – Diferenças nas superfícies das execuções 6 e 15 entre 1º e 10º furo ($v_c = 50$ m/min e $f = 75$ μ m/rev.)

4.1.5 Otimização dos Parâmetros de Furação

Utilizando o software Minitab[®]19, foi feita a otimização dos parâmetros de corte estudados (dentro dos intervalos adotados para a experimentação), buscando diminuir os fatores de delaminação ajustado na entrada e saída e diminuir os parâmetros de rugosidade da parede

dos furos. Foi considerado todas as variáveis de resposta com o mesmo nível de importância. Os parâmetros otimizados encontrados foram:

- Velocidade de corte: $v_c = 75$ m/min.
- Avanço: $f = 75$ $\mu\text{m}/\text{rev}$.
- Condição de lubrificação: ACR (ar comprimido refrigerado a 6 °C).

4.2 Fresamento

Nesta seção serão apresentados os valores dos parâmetros de rugosidade mensurados, a ANOVA dos resultados, a otimização dos parâmetros e a discussão dos resultados.

4.2.1 Rugosidade

Após o fresamento da placa de CFRP variando o avanço (f), a profundidade de corte axial (a_{p-T} e a_{p-R}) e o meio de lubrificação (LC), os parâmetros de rugosidade foram mensurados em cada uma das 15 execuções com diferentes combinações de parâmetros.

Os valores obtidos são as médias aritméticas dos parâmetros e estão apresentados no **Apêndice A.3** e representados graficamente na Figura 4.19 (R_a e R_q) e na Figura 4.20 (R_z e R_t). As discussões serão apresentadas na subseção **4.2.3 – Discussão dos Resultados**.

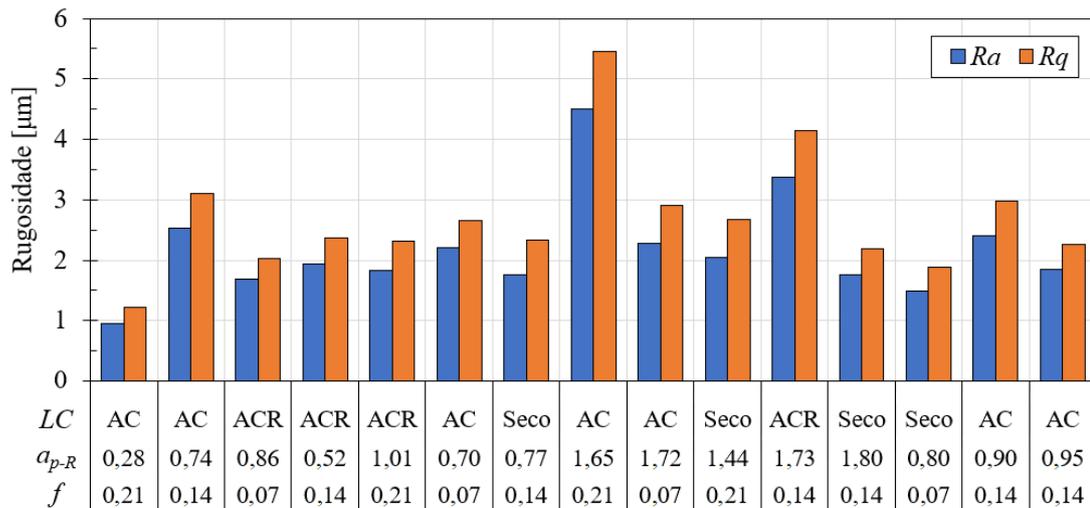


Figura 4.19 – Valores de R_a e R_q para cada combinação de parâmetros no fresamento.

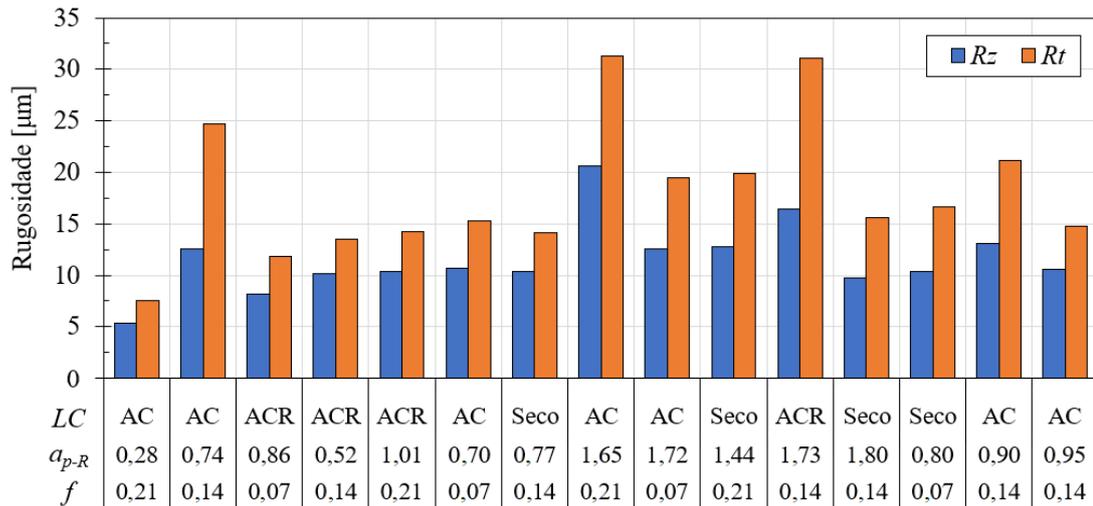


Figura 4.20 – Valores de R_z e R_t para cada combinação de parâmetros no fresamento.

4.2.2 Análise de Variância

A ANOVA reduzida foi usada para a verificação do efeito dos fatores controláveis nas variáveis de resposta e seus resultados podem ser vistos na Tabela 4.3. A análise completa dos resultados está apresentada na subseção 4.2.3 – **Discussão dos Resultados**.

Tabela 4.3 – ANOVA dos parâmetros de rugosidade no fresamento.

Fatores controláveis	R_a		R_q		R_z		R_t	
	Valor-P	Contrib. (%)						
f	0,007	3,7	0,014	4,3	0,021	4,0	0,072	1,9
$a_p \times a_p$	0,001	26,0	0,001	27,5	0,002	29,8	0,006	31,5
$LC \times LC$	0,007	8,8	0,012	7,9	0,041	4,9	0,115	4,4
$a_p \times f$	0,001	30,1	0,001	28,7	0,002	31,2	0,019	20,6
$a_p \times LC$	0,005	19,2	0,009	17,5	0,040	11,7	0,056	14,6
R^2	87,7%		85,8%		81,7%		72,8%	

4.2.3 Discussão dos Resultados

Os resultados encontrados na ANOVA para todos os parâmetros de rugosidade foram semelhantes, sendo o efeito quadrático da profundidade de corte axial ($a_p \times a_p$) e a sua combinação com o avanço ($a_p \times f$) os mais significativos, apresentando os menores *Valor-P* e as maiores contribuições. Além desses, a combinação $a_p \times LC$ também contribuiu fortemente.

Os comportamentos dos fatores controláveis significativos de R_a estão apresentados na Figura 4.21. Os parâmetros R_q , R_z e R_t apresentaram o mesmo comportamento do parâmetro R_a são apresentados no **Apêndice A.4**.

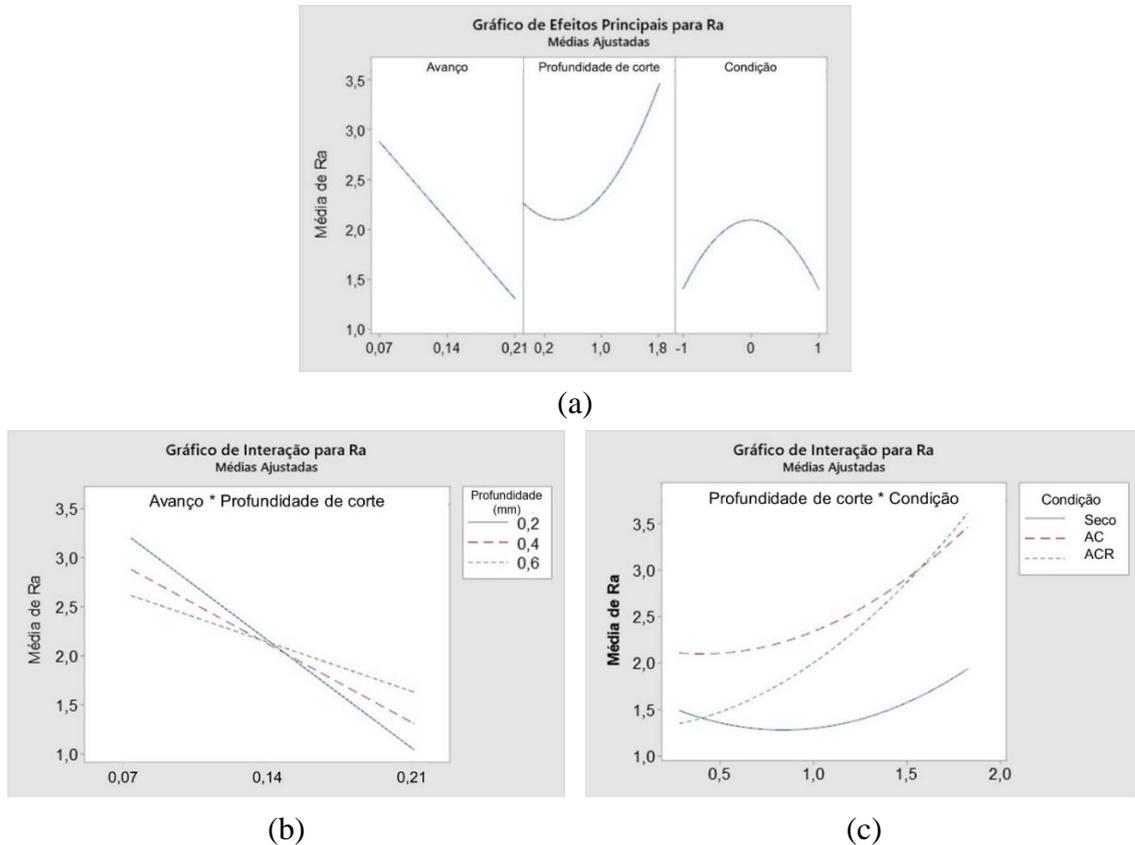


Figura 4.21 – Gráficos dos fatores significativos do R_a no fresamento: (a) efeitos principais; (b) efeito da interação $a_p \times f$; (c) efeito da interação $a_p \times LC$

Ao comparar as execuções 1 e 8 ($f = 0,21$ mm/rev e AIR), nota-se que os valores de rugosidade aumentaram cerca de 600% com o incremento proporcional de a_{p-R} de 0,28 mm para 1,65 mm, confirmando a influência da profundidade de corte axial de incrementar a rugosidade para altos avanços. Outros autores também concluíram que o a_p influencia na rugosidade. Sreenivasulu, 2013, verificou que o aumento de a_p prejudicou a qualidade superficial no fresamento de GFRP. Zhou et al., 2014, constataram que a_p é o fator mais influente na rugosidade e seu aumento piora a qualidade da superfície usinada em CFRP. Segundo os autores, as várias camadas de resina epóxi apresentam dificuldade de serem removidas; no caso, grande parte destas pode aderir à superfície usinada devido ao efeito combinado da força e do calor gerados pela ação da ferramenta. El-Hofy et al., 2017, também observaram que há um salto na temperatura ao aumentar a profundidade de corte axial: ao elevar a_p de 1,0 para 3,0 mm, a temperatura subiu de 70 para 170 °C.

A Figura 4.22 apresenta os gráficos de superfície de R_a e R_t . Como se observou que R_q e R_z apresentaram comportamento semelhante (ver **Apêndice A.4**), não foram exibidos. Assim, percebe-se o efeito quadrático de a_p , pois em baixos valores de a_p , os valores de R_a diminuem ao aumentar f (execuções 6 e 1) em cerca de 45% (de 2,21 μm para 0,96 μm) e os de R_t em cerca de 50% (de 15,24 μm para 7,53 μm). O R_a possui distinção entre as condições a seco e ACR com a condição AC (esta última apresentando valores maiores que as anteriores). Isso não ocorre com os valores de R_t , em que os três tipos de LC apresentam valores semelhantes.

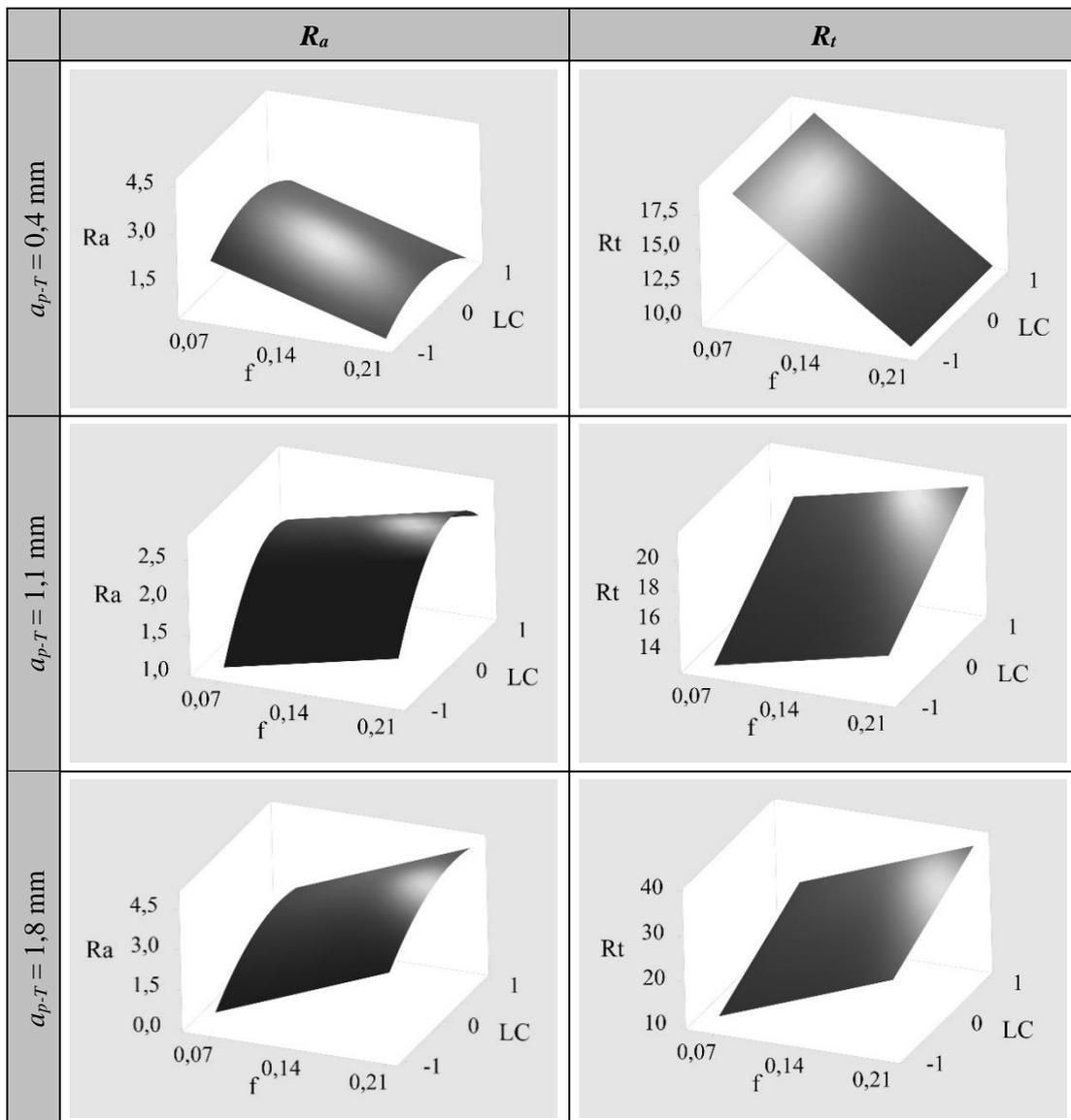


Figura 4.22 – Gráficos de superfície de R_a e R_t

Em altos valores de a_p , o aumento de f acaba prejudicando a qualidade da superfície, ao aumentar os valores de R_a (passes 9 e 8) em 100% (de 2,28 para 4,5 μm) e R_t em aproximadamente 60% (de 19,48 para 31,3 μm); resultado semelhante foi encontrado por

Kiliçkap et al., 2015. Além disso, há distinção entre os diferentes LC , no qual AC apresenta os piores resultados de R_a e ACR os piores de R_t . O ponto de inflexão, ou seja, em que f não influencia a rugosidade é com $a_p = 0,9$ mm para R_a e 0,95 mm para R_t , (Figura 4.23).

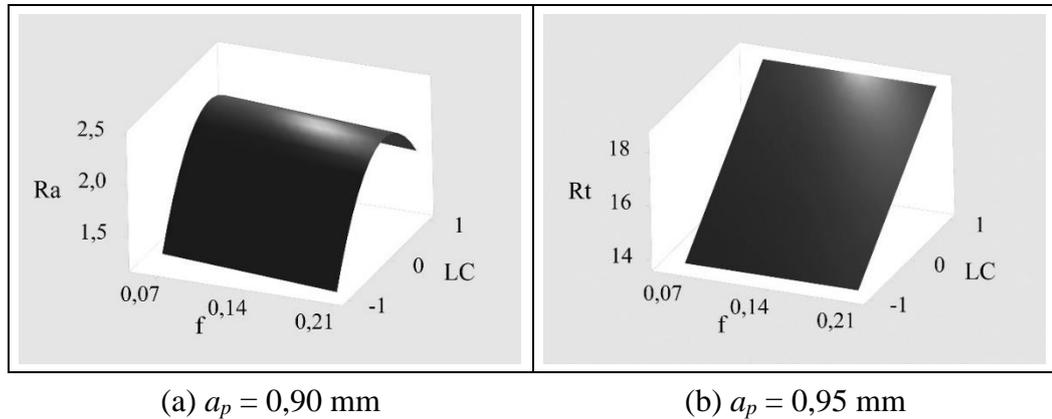


Figura 4.23 – Pontos de inflexão para: (a) R_a ; (b) R_t .

Outra análise importante a ser feita é sobre a influência do lubrificador. Ao analisar os passes 2 e 7 ($f = 0,14$ mm/rev. e $a_{p-R} \cong 0,75$ mm), quando se altera do corte a seco para com AC, tem-se um aumento nos valores de R_a (de 1,75 para 2,52 μm) e de R_t (de 14,2 para 24,7 μm). Já nos passes 11 e 12 ($f = 0,14$ mm/rev. e $a_{p-R} \cong 1,75$ mm), o aumento na rugosidade se dá na alteração do corte a seco para com ACR (R_a de 1,75 para 3,37 μm , e R_t de 15,6 para 31,1 μm). Logo, o uso de AC e ACR aumentaram os valores de rugosidade à medida que se aumenta a_p , conforme mostrado na Figura 4.22.

Em baixos avanços, ACR apresentou os piores resultados de R_a e R_q , porém, melhores resultados em R_z e R_t . O corte a seco, em temperatura elevada, tem facilidade de cortar a matriz em relação ao ACR, que enfrenta uma matriz mais dura e uma força de corte maior. Porém, com a matriz macia, acaba havendo arrancamento de fibras que não ocorre com a mesma frequência em corte com ACR, gerando cavidades e maiores valores de R_z e R_t no corte a seco. Isso também foi constatado por Morkavuk et al., 2018.

Para altos valores de a_p , a condição a seco apresentou menores valores de rugosidade. O uso do ACR apresenta bons resultados apenas para baixos valores de a_p . O uso de AC gerou resultados inferiores ao ACR com baixos valores de a_p e resultados piores que o corte a seco com altos valores de a_p , não apresentando uma significância na sua utilização.

Possivelmente, os danos causados são devidos às forças de corte, pois em altos valores de a_p , a força é maior; então, o uso de ACR piora a situação. Já com baixos valores de a_p , a força não é grande o suficiente, fazendo com que o uso de ACR melhore a rugosidade sem atingir a força necessária para arrancamento de fibras e afetar negativamente a superfície. Algo

que reforça essa teoria é o comportamento do avanço (f). Com baixos valores de a_p , o maior f é possível; porém, em altos valores de a_p , a menor rugosidade é obtida em menores f (aumento de f causa aumento das forças de corte radial [Haiyan et al., 2013]).

Além disso, Gao et al., 2016, verificaram que a_p tem grande influência na rugosidade, e que ao aumentar o a_p , as forças de corte aumentam. Jia et al., 2018, citam ainda que baixas temperaturas aumentam as forças de corte. Sob altas temperaturas, a matriz de resina torna-se macia, o que enfraquece o suporte das fibras e reduz a força de coesão da matriz fibra. Portanto, sendo principalmente pressionado pela aresta de corte, a fibra e a matriz de resina descolam facilmente e ocorrem dobras severas da fibra sob o plano de corte. Comparativamente, à medida que a matriz de resina endurece sob a temperatura criogênica, o suporte da matriz de resina torna-se forte, o que contribui para a pequena deformação das fibras antes de serem cortadas. Conseqüentemente, as fibras e a matriz de resina são comprimidas pela superfície de saída da ferramenta de corte, induzindo pequenas dobras nas fibras e rachaduras na matriz de resina. E as fibras são fraturadas perto do plano de corte com pequenos ângulos de cisalhamento.

A Figura 4.24 apresenta as imagens e os perfis das superfícies usinadas das amostras 1 e 8 ($f = 0,21$ mm/rev. e AC), em que se alterou apenas a_{p-R} ($a_{p-R1} = 0,28$ mm e $a_{p-R8} = 1,65$ mm).

A amostra 1 (Figura 4.24a) apresenta uma superfície mais homogênea, com baixa rugosidade, composta principalmente de fibras não fraturadas. Já a amostra 8 (Figura 4.24c) exibe uma superfície irregular, com alta rugosidade, apresentando fibras fraturadas e resina exposta, com arrancamento de fibras profundos, demonstrando a influência da profundidade de corte axial. As fibras e a matriz se separam devido à desconexão interfásica causada pela ferramenta quando a mesma entra na peça. A separação é propagada com o avanço da ferramenta por causa da flexão e compressão na fibra e na matriz, até que a fibra atinja um comprimento crítico e a sua ruptura acontece, expondo a resina epóxi [Gao et al., 2016]. Em profundidades maiores, as forças de corte são maiores, aumentando a desconexão entre as camadas, prejudicando o acabamento superficial.

O perfil de rugosidade gerado pela execução 1 (Figura 4.24b) é constante, com picos e vales pouco relevantes e valores de rugosidade baixos ($R_a \cong 1$ μm e $R_t \cong 7,5$ μm) justamente porque a superfície gerada tem fibras de carbono homogêneas e não fraturadas, sem exposição da resina. Entretanto, o perfil resultante da execução 8 (Figura 4.24d) é muito irregular, indicando picos e vales muito acentuados. Há também uma maior magnitude dos valores de rugosidade em relação à amostra 1 ($R_a \cong 4,5$ μm e $R_t \cong 31,3$ μm) explicados pela fratura das fibras de carbono, exposição da resina e fibras arrancadas na usinagem com $a_{p-R} = 1,65$ mm.

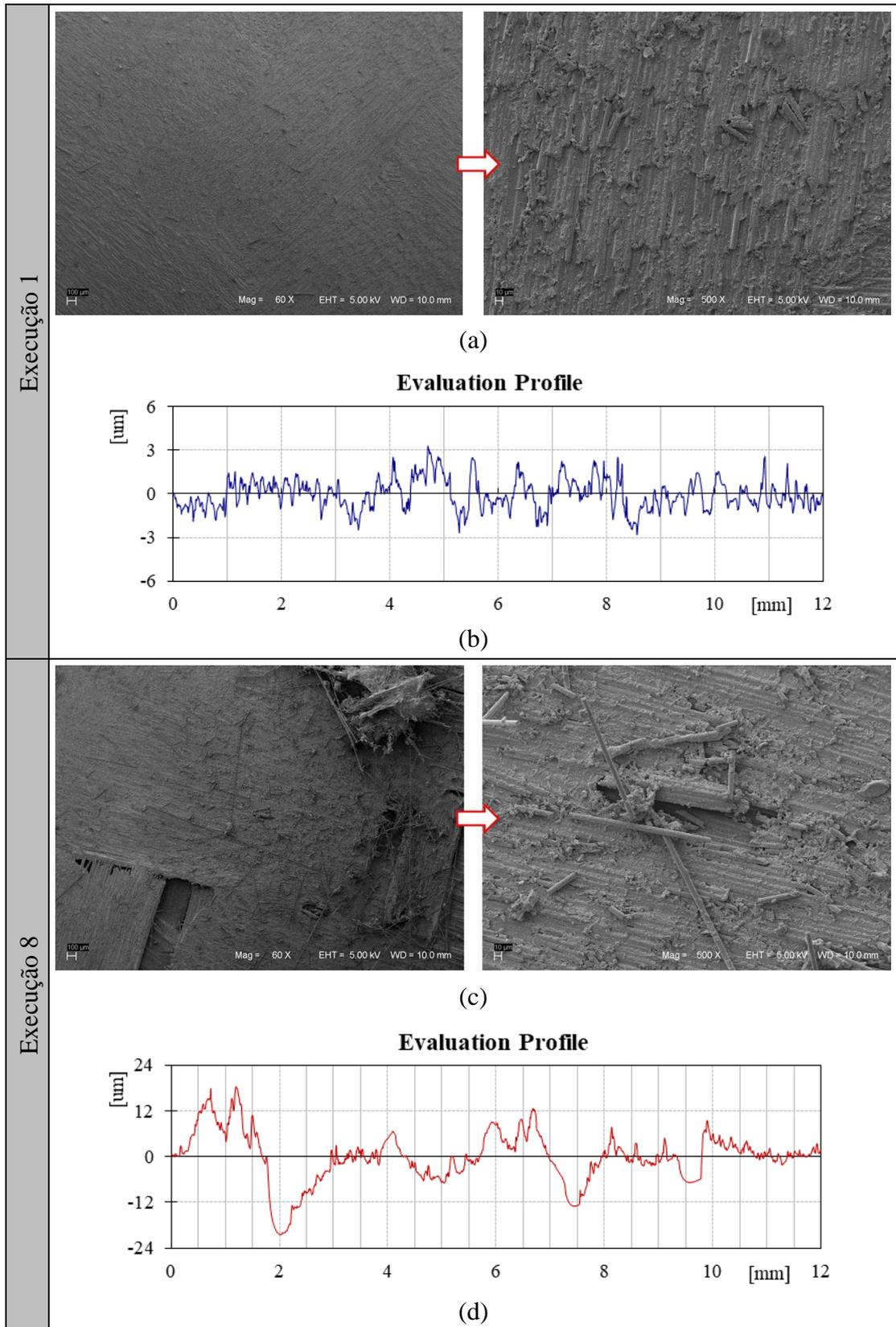


Figura 4.24 – Comparação com diferentes a_{p-R} : (a) MEV da execução 1; (b) perfil de rugosidade da execução 1; (c) MEV da execução 8; (d) perfil de rugosidade da execução 8.

4.2.4 Otimização

A otimização dos fatores controláveis foi realizada, mantendo a profundidade de corte axial dentro dos níveis do planejamento de experimentos, obtendo-se $a_{p-T} = 0,6$ mm, $f = 0,21$ mm/rev. e aplicação de ar comprimido refrigerado (ACR). Como as condições a seco e com ACR geraram valores de rugosidade semelhantes em alto f e baixo a_p , optou-se por realizar ensaios de validação com ambas as condições. Porém, o ensaio de validação resultou em diferentes valores de a_{p-R} , como mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Experimento de validação.

Execução	a_{p-real} [mm]	LC	R_a [μm]	R_q [μm]	R_z [μm]	R_t [μm]	
16	0,50	Seco	2,34	2,93	13,43	27,25	
17	0,60		2,20	2,73	12,75	17,98	
18	0,65		-	1,95	2,43	11,75	19,78
Média	0,60			2,16	2,70	12,64	21,67
19	0,76	ACR	1,65	2,03	9,42	13,95	
20	0,80		1,45	1,84	8,86	12,78	
21	0,84		-	1,64	2,07	9,90	14,17
Média	0,80			1,58	1,98	9,39	13,63

A otimização dos parâmetros resultou em baixos níveis de rugosidade, com valores superiores apenas aos obtidos pela execução 1, cujo $a_{p-R} = 0,28$ mm (menor a_p executado). A execução 3 ($a_{p-R} = 0,86$ mm, $f = 0,07$ mm/rev e ACR) apresentou valores de R_a e R_t próximos dos obtidos com os parâmetros otimizados (1,68 e 11,86 μm respectivamente). Vale salientar que o avanço não influenciou os resultados para valores de a_p próximos de 0,8 mm.

Ao comparar as rugosidades com os parâmetros otimizados nas diferentes condições lubrificantes, percebe-se que o valor médio de R_a obtido no fresamento frontal a seco foi 36% maior que com ACR, e o valor de R_t foi cerca de 59% maior. Tal comportamento também foi observado por Khairushima et al., 2013.

A Figura 4.25 mostra a imagem MEV e o perfil da superfície usinada com os parâmetros otimizados (execução 20). Apesar de ter $a_{p-R} = 0,8$ mm, a superfície (Figura 4.25a) mostra-se homogênea e semelhante à superfície gerada pela execução 1 ($a_{p-R} = 0,28$ mm). Já o perfil (Figura 4.25b) demonstra a regularidade da rugosidade no fresamento com os parâmetros otimizados, observando-se picos reduzidos.

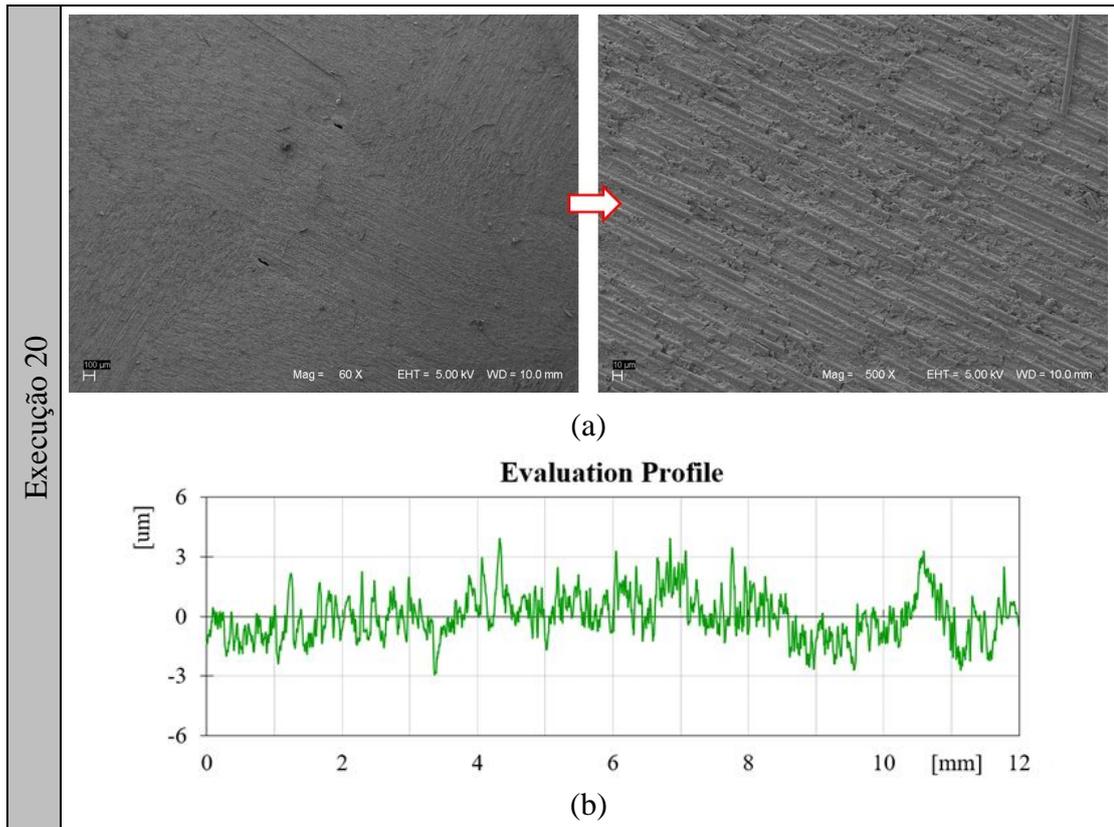


Figura 4.25 – Execução com parâmetros otimizados: (a) MEV da superfície; (b) perfil de rugosidade da superfície.

5 CONCLUSÕES

Este estudo foi realizado a fim de verificar a influência dos parâmetros de corte e do ar comprimido refrigerado (ACR) na qualidade da superfície gerada pelos processos de furação e fresamento do polímero reforçado por fibra de carbono (CFRP) a partir da usinagem de uma placa com $8,7 \pm 0,3$ mm. Assim, as conclusões geradas foram separadas entre os processos.

5.1 Furação

A furação foi realizada para verificar a delaminação e a rugosidade do CFRP utilizando diferentes velocidades de corte (v_c), avanços (f) e condições lubrificantes (LC). Após mensurar dados do fator de delaminação ajustado (F_{da}) e dos parâmetros de rugosidade, foi realizado a ANOVA e chegou-se às principais conclusões:

- Para o 1° furo, os fatores principais v_c , f e LC e a combinação $f \times LC$ foram os fatores que influenciaram o fator de delaminação na entrada do furo (F_{daE}).
- Para o 10° furo, o uso do ACR ajudou a diminuir o F_{daE} ; o aumento de v_c influenciou negativamente (aumento da temperatura).
- O fator de delaminação na saída (F_{das}) do 1° furo foi influenciado pela combinação $v_c \times LC$.
- O F_{das} do 10° furo sofreu influência da LC , porém, teve um coeficiente de determinação $R^2 < 60\%$.
- Os parâmetros de rugosidade média parcial (R_z) e total (R_t) tiveram influência da LC . O valor de R_t ainda foi influenciado pela combinação $v_c \times LC$.
- Uma maior v_c melhorou a rugosidade; porém, piorou F_{daE} . O comportamento do F_{das} depende muito da temperatura e da força de avanço.

A utilização do ACR diminuiu a delaminação na entrada dos furos devido à redução do efeito *peel-up* (mantendo a rigidez do material e diminuindo também a rugosidade), ao atenuar a resiliência das fibras (facilitando o corte e diminuindo o arrancamento de fibras), e ao minimizar os danos térmicos causados pelas altas velocidades. Porém, o ACR aumentou a delaminação na saída dos furos ao aumentar o *push-down* em comparação ao corte a seco (maior resistência do material em baixas temperaturas). Gerenciar v_c e f ao longo da furação pode ser uma alternativa para diminuir a delaminação na saída do furo, aumentando v_c e diminuindo f para reduzir a rigidez do material ao se aproximar da saída do furo.

5.2 Fresamento

O fresamento frontal com fresa de topo helicoidal foi efetuado com o intuito de avaliar o acabamento da superfície do CFRP aplicando diferentes profundidades de corte axiais (a_p), avanços (f) e condições lubrificantes (LC) utilizando o experimento de Box-Behnken. Após analisar os parâmetros de rugosidade através da ANOVA reduzida, as seguintes conclusões foram obtidas:

- O efeito quadrático de a_p e as suas interações com f e LC foram os fatores mais significativos sobre a rugosidade. Juntos, eles tiveram uma contribuição em torno de 70% para os valores de rugosidade dos diferentes parâmetros estudados.
- Existe um ponto de inflexão em $a_p = 0,9$ mm onde f não tem influência sobre a rugosidade, apenas LC . Para $a_p < 0,90$ mm, R_a diminui com o aumento de f . Porém, para $a_p > 0,9$ mm, os valores de R_a crescem com o aumento de f . Para R_t , isso ocorre com $a_p = 0,95$ mm, demonstrando o efeito quadrático de a_p .
- Na comparação com o corte a seco, a utilização de AC e ACR aumentaram os valores de rugosidade ao incrementar o valor de a_p . O corte a seco apresenta facilidade para cortar a matriz, gerando valores menores de R_a e R_q em comparação com o uso de ACR. Porém, a matriz perde sua rigidez em altas temperaturas, provocando grandes arrancamentos de fibras que não ocorrem com ACR, gerando maiores valores de R_z e R_t .
- Para a condição de usinagem otimizada, com $f = 0,21$ mm/rev. e $a_{p-T} = 0,6$ mm, a utilização de ACR resultou em menor rugosidade que no corte a seco.

A condição ACR apresentou menores valores de rugosidade em comparação aos outros métodos de LC ao ser utilizado com baixos valores de a_p devido às forças de corte aumentarem com o aumento do a_p . Para altos valores de a_p , a utilização de ACR mantém a rigidez da matriz, aumentando as forças de corte e prejudicando a rugosidade, o que não ocorre no corte a seco devido às maiores temperaturas.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Aplicar o ACR na entrada e na saída do furo, repetir a experimentação com outra geometria de broca, realizar a otimização dos parâmetros e executar a validação com os fatores controláveis otimizados no processo de furação.
- Medir as forças e a temperatura em ambos os processos de usinagem para obter conclusões mais detalhadas sobre os seus efeitos.

- Ao analisar a delaminação, utilizar outros meios de mensuração a fim de avaliar a delaminação em camadas mais profundas do laminado, não somente na superfície de entrada e saída da ferramenta.
- Gerar um modelo matemático a partir dos resultados encontrados no presente trabalho e realizar a otimização dos parâmetros de corte. Então, aplicar esses parâmetros de corte em um sistema com *Machine learning* a fim de se obter parâmetros constantemente otimizados, que podem se adaptando com o tempo.

REFERÊNCIAS

Abish, J., Samal, P., Narenther, M. S., Kannan, C., e Balan, A. S. S. Assessment of drilling-induced damage in CFRP under chilled air environment, **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 33(12), p. 1361-1368, 2018.

ABNT NBR ISO 4287. **Especificações Geométricas do Produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil - Termos, Definições e Parâmetros da Rugosidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2002.

ABNT NBR ISO 4288. **Especificações Geométricas do Produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil - Regras e Procedimentos para Avaliação de Rugosidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2008.

Abrão, A. M., Rubio, J. C., Faria, P. E., e Davim, J. P. The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite, **Materials & Design**, vol. 29(2), p. 508-513, 2008.

Akay, M. Aspects of dynamic mechanical analysis in polymeric composites, **Composites science and technology**, vol. 47(4), p. 419-423, 1993.

Astakhov, V. P. **Tribology of Metal Cutting**. Elsevier, 2006.

Azmi, A. I., Lin, R. J. T., e Bhattacharyya, D. Machinability study of glass fibre-reinforced polymer composites during end milling, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 64(1-4), p. 247-261, 2013.

Babu, J., Alex, N. P., Mohan, K. P., Philip, J. e Davim, J. P. Examination and modification of equivalent delamination factor for assessment of high speed drilling, **Journal of Mechanical Science and Technology**, vol. 30(11), p. 5159-5165, 2016.

Beaumont, P. W., Soutis, C., e Hodzic, A. **The Structural Integrity of Carbon Fiber Composites: Fifty Years of Progress and Achievement of the Science, Development, and Applications**. Springer, 2016.

Ben, W., Hang, G., Quan, W., Maoqing, W., e Songpeng, Z. Influence of cutting heat on quality of drilling of carbon/epoxy composites, **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 27(9), p. 968-972, 2012.

Bhushan, B. **Modern Tribology Handbook**, two volume set. CRC press, 2000.

Box, G. E., e Behnken, D. W. Some new three level designs for the study of quantitative variables, **Technometrics**, vol. 2(4), p. 455-475, 1960.

Box, G. E., Hunter, W. H., e Hunter, S. **Statistics for Experimenters**. John Wiley and sons, New York, 1978.

Callister Jr., W. D., e Rethwisch, D. G. **Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach**. John Wiley & Sons, 2012.

Campbell Jr., F. C. (Ed.). **Manufacturing Processes for Advanced Composites**. Elsevier, 2003.

Che, D., Saxena, I., Han, P., Guo, P., & Ehmann, K. F. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review, **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, vol. 136(3), A.034001, 22 p., 2014.

Chen, W. C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 37(8), p. 1097-1108, 1997.

Çolak, O., e Sunar, T. Cutting forces and 3D surface analysis of CFRP milling with PCD cutting tools, **Procedia CIRP**, vol. 45, p. 75-78, 2016.

Dandekar, C. R., e Shin, Y. C. Modeling of machining of composite materials: a review, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 57, p. 102-121, 2012.

Davim, J. P. (Ed.). **Machining Composites Materials**. John Wiley & Sons, 2013.

Davim, J. P. (Ed.). **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. Springer Science & Business Media, 2008.

Davim, J. P., e Reis, P. Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 160(2), p. 160-167, 2005.

Davim, J. P., e Reis, P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments, **Composite Structures**, vol. 59(4), p. 481-487, 2003.

Davim, J. P., Rubio, J. C., e Abrão, A. M. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates, **Composites Science and Technology**, vol. 67(9), p. 1939-1945, 2007.

Devitte, C., Souza, A. J., Schirmer, G. V. Temperature evaluation in CFRP drilling. In: **5th Brazilian Conference on Composite Materials (BCCM 5)**, 18-22 January 2021, São Carlos, SP, Brazil, 2021.

Dharan, C. K. H., e Won, M. S. Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 40(3), p. 415-426, 2000.

Di Ilio, A., Paoletti, A., Tagliaferri, V., e Veniali, F. Tool wear in drilling thermoset and thermoplastic matrix composites, In: **European Joint Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA)**, p. 41-46. F. Veniali, M. Bellet, D. Gamby, H. Masudi, J Rasty, A. Dragon eds, 1996.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., e Coppini, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8.ed., São Paulo: Artliber, 2013.

Dixit, U. S., Sarma, D. K., e Davim, J. P. **Environmentally friendly machining**. Springer Science & Business Media, 2012.

Durão, L. M. P., Gonçalves, D. J., Tavares, J. M. R., de Albuquerque, V. H. C., Vieira, A. A., e Marques, A. T. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates, **Composite Structures**, vol. 92(7), p. 1545-1550, 2010.

Durão, L. M. P., Tavares, J. M. R., de Albuquerque, V. H. C., e Gonçalves, D. J. Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods, **Composite Structures**, vol. 96, p. 576-583, 2013.

El-Hofy, M. H., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Sim, W. M., Pearson, D., M'Saoubi, R., e Harden, P. Tool temperature in slotting of CFRP composites, **Procedia Manufacturing**, vol. 10, p. 371-381, 2017.

Eneyew, E. D., e Ramulu, M. Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites, **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 3(4), p. 354-362, 2014.

Ferreira, J. R., Coppini, N. L., e Miranda, G. W. A. Machining optimisation in carbon fibre reinforced composite materials, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 92, p. 135-140, 1999.

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**, vol. 597(2), p. 179-186, 2007.

Fu, R., Jia, Z., Wang, F., Jin, Y., Sun, D., Yang, L., e Cheng, D. Drill-exit temperature characteristics in drilling of UD and MD CFRP composites based on infrared thermography, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 135, p. 24-37, 2018.

Gao, C., Xiao, J., Xu, J., e Ke, Y. Factor analysis of machining parameters of fiber-reinforced polymer composites based on finite element simulation with experimental investigation, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 83(5-8), p. 1113-1125, 2016.

Gaugel, S., Sripathy, P., Haeger, A., Meinhard, D., Bernthaler, T., Lissek, F., e Schneider, G. A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP), **Composite Structures**, vol. 155, p. 173-183, 2016.

Geng, D., Liu, Y., Shao, Z., Lu, Z., Cai, J., Li, X., e Zhang, D. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: a review, **Composite Structures**, vol. 216, p. 168-186, 2019.

Grilo, T. J., Paulo, R. M. F., Silva, C. R. M., e Davim, J. P. Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries, **Composites Part B: Engineering**, vol. 45(1), p. 1344-1350, 2013.

Ha, S. J., Kim, K. B., Yang, J. K., e Cho, M. W. Influence of cutting temperature on carbon fiber-reinforced plastic composites in high-speed machining, **Journal of Mechanical Science and Technology**, vol. 31(4), p. 1861-1867, 2017.

Haeger, A., Schoen, G., Lissek, F., Meinhard, D., Kaufeld, M., Schneider, G., e Knoblauch, V. Non-destructive detection of drilling-induced delamination in CFRP and its effect on mechanical properties, **Procedia Engineering**, vol. 149, p. 130-142, 2016.

Haiyan, W., Xuda, Q., Hao, L., e Chengzu, R. Analysis of cutting forces in helical milling of carbon fiber–reinforced plastics, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, vol. 227(1), p. 62-74, 2013.

Hamdan, A., Sarhan, A. A., e Hamdi, M. An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 58(1-4), p. 81-91, 2012.

Heisel, U., e Pfeifroth, T. Influence of point angle on drill hole quality and machining forces when drilling CFRP, **Procedia CIRP**, vol. 1, p. 471-476, 2012.

Hintze, W., Hartmann D. e Schutte, C. Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study. **Composites Science and Technology**, vol. 71, p. 1719-1726, 2011.

Ho-Cheng, H., e Dharan, C. K. H. Delamination during drilling in composite laminates, **Journal of Engineering for Industry**, vol. 112, p. 236-239, 1990.

Hou, G., Qiu, J., Zhang, K., Cao, S., Cheng, H., Luo, B., e Cheng, Y. Comparative tool wear and hole quality investigation in drilling of aerospace grade T800 CFRP using different external cooling lubricants, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 106(3-4), p. 937-951, 2020.

Iliescu, D. M. F. D., Gehin, D., Gutierrez, M. E., e Girot, F. Modeling and tool wear in drilling of CFRP, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 50(2), p. 204-213, 2010.

Jia, Z., Fu, R., Wang, F., Qian, B., e He, C. Temperature effects in end milling carbon fiber reinforced polymer composites, **Polymer Composites**, vol. 39(2), p. 437-447, 2018.

Joshi, S., Rawat, K., e Balan, A. S. S. A novel approach to predict the delamination factor for dry and cryogenic drilling of CFRP, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 262, p. 521-531, 2018.

Karataş, M. A., e Gökkaya, H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials, **Defense Technology**, vol. 14(4), p. 318-326, 2018.

Karimi, N. Z., Heidary, H., e Minak, G. Critical thrust and feed prediction models in drilling of composite laminates, **Composite Structures**, vol. 148, p. 19-26, 2016.

Karnik, S. R., Gaitonde, V. N., Rubio, J. C., Correia, A. E., Abrão, A. M., e Davim, J. P. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model, **Materials & Design**, vol. 29(9), p. 1768-1776, 2008.

Khairusshima, M. N., Ch, C. H., Jaharah, A. G., e Akm, N. A. Tool wear and surface roughness on milling carbon fiber-reinforced plastic using chilled air, **Journal of Asian Scientific Research**, vol. 2(11), p. 593, 2012.

Khairusshima, M. N., e Sharifah, I. S. S. Study on tool wear during milling CFRP under dry and chilled air machining, **Procedia Engineering**, vol. 184, p. 506-517, 2017.

Khairusshima, M. N., Hassan, C. C., Jaharah, A. G., Amin, A. K. M., e Idriss, A. M. Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic, **Wear**, vol. 302(1-2), p. 1113-1123, 2013.

Kiliçkap, E., Yardimeden, A., e Çelik, Y. H. Investigation of experimental study of end milling of CFRP composite, **Science and Engineering of Composite Materials**, vol. 22(1), p. 89-95, 2015.

Kim, C., Cho, C. H., Son, I., Lee, H., Han, J. W., Kim, J. G., e Lee, J. H. Effect of microscale oil penetration on mechanical and chemical properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites, **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, vol. 61, p. 112-118, 2018.

Klocke, F., e Kuchle, A. **Manufacturing Processes**. Berlin: Springer, 2009.

Ko, T. J., Kim, H. S., e Chung, B. G. Air-oil cooling method for turning of hardened material, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 15(7), p. 470-477, 1999.

Koklu, U., e Morkavuk, S. Cryogenic drilling of carbon fiber-reinforced composite (CFRP), **Surface Review and Letters**, vol. 26(9), p. 1950060, 2019.

Konneh, M., Izman, S., e Kassim, A. A. R. Milling damage on carbon fibre reinforced polymer using TiAlN coated end mills, In: **Journal of Physics: Conference Series**, vol. 628(1), p. 012033, 2015.

KoPlev, A. A., Lystrup, A., e Vorm, T. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP, **Composites**, vol. 14(4), p. 371-376, 1983.

Krishnamoorthy, A., Boopathy, S. R., e Palanikumar, K. Delamination analysis in drilling of CFRP composites using response surface methodology, **Journal of Composite Materials**, vol. 43(24), p. 2885-2902, 2009.

Krishnaraj, V., Prabukarthi, A., Ramanathan, A., Elanghovan, N., Kumar, M. S., Zitoune, R., e Davim, J. P. Optimization of machining parameters at high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates, **Composites Part B: Engineering**, vol. 43(4), p. 1791-1799, 2012.

Krishnaraj, V., Zitoune, R., e Davim, J. P. **Drilling of Polymer-Matrix Composites**. Springer, Berlin-Heidelberg, 2013.

Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F., e Surcin, L. Drilling of composite structures, **Composite Structures**, vol. 52(3-4), p. 511-516, 2001.

Langella, A., Nele, L., e Maio, A. A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 36(1), p. 83-93, 2005.

Larson, R., Farber, B., e Cyro. **Estatística Aplicada**. Prentice Hall, 2004.

Lee, S. M. **International Encyclopedia of Composites**. VCH, 1989.

Lissek, F., Tegas, J., e Kaufeld, M. Damage quantification for the machining of CFRP: An introduction about characteristic values considering shape and orientation of drilling-induced delamination, **Procedia Engineering**, vol. 149, p. 2-16, 2016.

Liu, H., Xie, W., Sun, Y., Zhang, J., e Chen, N. Investigations on micro-cutting mechanism and surface quality of carbon fiber-reinforced plastic composites, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 94(9-12), p. 3655-3664, 2018.

Machado, Á. R., Coelho, R. T., Abrão, A. M., e da Silva, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Editora Blucher, 2015.

Malacarne, D. K. **Otimização dos Parâmetros de Corte Visando a Obtenção de Furos de Qualidade em Placa de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro Utilizando o**

Projeto de Experimentos Box-Behnken. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS, 2017.

Mallick, P. K. **Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design.** CRC Press, 2007.

Martins, F. R. **Caracterização do Fresamento de Chapas de Compósito Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC).** Tese (Doutorado) em Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2014.

Merino-Pérez, J. L., Royer, R., Ayvar-Soberanis, S., Merson, E., e Hodzic, A. On the temperatures developed in CFRP drilling using uncoated WC-Co tools Part I: Workpiece constituents, cutting speed and heat dissipation, **Composite Structures**, vol. 123, p. 161-168, 2015.

Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments.** John Wiley & Sons, 2013.

Morkavuk, S., Köklü, U., Bağcı, M., e Gemi, L. Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study, **Composites Part B: Engineering**, vol. 147, p. 1-11, 2018.

Muller-Hummel, P., Richter, J., e Moller, B. Neue Werkstoffe fordern neue Allianzen, **WB: Werkstatt und Betrieb**, vol. 141(10), p. 66, 2008.

Ngoc, D. N., Hue, T. N., Van Hung, B., e Duc, V. D. Dust emission during machining of CFRP composite: A calculation of the number and mass of the thoracic particles, In: **International Conference on Engineering Research and Applications.** Springer, Cham, p. 341-349, 2020.

Nguyen-Dinh, N., Hejjaji, A., Zitoune, R., Bouvet, C., e Salem, M. New tool for reduction of harmful particulate dispersion and to improve machining quality when trimming carbon/epoxy composites, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 131, p. 105806, 2020.

Nurhaniza, M., Ariffin, M. K. A. M., Mustapha, F., e Baharudin, B. T. H. T. Analyzing the effect of machining parameters setting to the surface roughness during end milling of CFRP-Aluminium composite laminates, **International Journal of Manufacturing Engineering**, vol. 2016, 2016.

Ozkan, D., Gok, M. S., Oge, M., e Karaoglanli, A. C. Milling behavior analysis of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites, **Materials Today: Proceedings**, vol. 11, p. 526-533, 2019.

Palanikumar, K. Modeling and analysis for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastics using response surface methodology, **Materials & Design**, vol. 28(10), p. 2611-2618, 2007.

Pérez-Pacheco, E., Moreno-Chulim, M. V., Valadez-González, A., Rios-Soberanis, C. R., e Herrera-Franco, P. J. Effect of the interphase microstructure on the behavior of carbon fiber/epoxy resin model composite in a thermal environment, **Journal of Materials Science**, vol. 46(11), p. 4026-4033, 2011.

Persson, E., Eriksson, I., e Zackrisson, L. Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 28(2), p. 141-151, 1997.

Petropoulos, G. P., Pandazaras, C. N., e Davim, J. P. Surface texture characterization and evaluation related to machining, In: **Surface Integrity in Machining**, p. 37-66. Springer, London, 2010.

Rawat, S., e Attia, H. Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites, **Wear**, vol. 267(5-8), p. 1022-1030, 2009.

Reddy, N. S. K., e Rao, P. V. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 26(11-12), p. 1202-1210, 2005.

Ribeiro, J. L. D., e Caten, C. T. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: FEEng-UFRGS, 2001.

Rubio, J. C., Abrão, A. M., Faria, P. E., Correia, A. E., e Davim, J. P. Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: evaluation of the delamination factor, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 48(6), p. 715-720, 2008.

Sandvik. **Manual Técnico de Usinagem**. Sandvik Coromant, São Paulo, 2010.

Sankar, B. R., e Umamaheswarrao, P. Investigations on the surface roughness of drilled hole on carbon fiber reinforced plastic composite. In: **Trends in Industrial and Mechanical Engineering**. New Delhi: Excellent Publishing House, p. 113-119, 2016.

Sheikh-Ahmad, J. Y. **Machining of Polymer Composites**. New York: Springer, 2009.

Shyha, I., Soo, S. L., Aspinwall, D., e Bradley, S. Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 210(8), p. 1023-1034, 2010.

Singh, I., Bhatnagar, N., e Viswanath, P. Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: experimental and finite element study, **Materials & Design**, vol. 29(2), p. 546-553, 2008.

Sorrentino, L., Turchetta, S., e Bellini, C. A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control, **Composite Structures**, vol. 186, p. 154-164, 2018.

Sreejith, P. S., Krishnamurthy, R., Malhotra, S. K., e Narayanasamy, K. Evaluation of PCD tool performance during machining of carbon/phenolic ablative composites, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 104(1-2), p. 53-58, 2000.

Sreenivasulu, R. Optimization of surface roughness and delamination damage of GFRP composite material in end milling using Taguchi design method and artificial neural network, **Procedia Engineering**, vol. 64, p. 785-794, 2013.

Teti, R. Machining of composite materials, **CIRP Annals**, vol. 51(2), p. 611-634, 2002.

Trent, E. M., e Wright, P. K. **Metal Cutting**. Butterworth-Heinemann, 2000.

Tsao, C. C., Kuo, K. L. e Hsu, I. C. Evaluation of novel approach on delamination factor after drilling composite laminates, **In Key Engineering Materials**, vol. 443, p. 626-630, 2010.

Vaziri Sereshk, M. R. e Bidhendi, H. M. Evaluation of revealing and quantifying techniques available for drilling delamination in woven carbon fiber-reinforced composite laminates, **Journal of Composite Materials**, vol. 50(10), p. 1377-1385, 2016.

Velayudham, A., e Krishnamurthy, R. Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 185(1-3), p. 204-209, 2007.

Vinayagamoorthy, R. Parametric optimization studies on drilling of sandwich composites using the Box–Behnken design, **Materials and Manufacturing Processes**, vol 32(6), p. 645-653, 2017.

Vortec. **Vortex Tube Short Course**. Disponível em: www.vortec.com/vortex-tube-short-course . Acesso em: 30 de maio de 2020.

Voss, R., Seeholzer, L., Kuster, F., e Wegener, K. Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP, **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, vol. 18, p. 75-91, 2017.

Walpole, R. E. **Probabilidade & Estatística para Engenharia e Ciências**. Pearson Prentice Hall, 2009.

Wang, C., Liu, G., An, Q., e Chen, M. Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates, **Composites Part B: Engineering**, vol. 109, p. 10-22, 2017.

Wang, D. H., Ramulu, M., e Arola, D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 35(12), p. 1623-1638, 1995a.

Wang, D. H., Ramulu, M., e Arola, D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 35(12), p. 1639-1648, 1995b.

Wang, H., Sun, J., Li, J., Lu, L., e Li, N. Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 82(9-12), p. 1517-1525, 2016a.

Wang, H., Sun, J., Zhang, D., Guo, K., e Li, J. The effect of cutting temperature in milling of carbon fiber reinforced polymer composites, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 91, p. 380-387, 2016b.

Wang, X. M., e Zhang, L. C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 43(10), p. 1015-1022, 2003.

Wang, X., Kwon, P. Y., Sturtevant, C., e Lantrip, J. Tool wear of coated drills in drilling CFRP, **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 15(1), p. 127-135, 2013.

Wang, X., Shen, X., Zeng, C., e Sun, F. Combined influences of tool shape and as-deposited diamond film on cutting performance of drills for CFRP machining, **Surface and Coatings Technology**, vol. 347, p. 390-397, 2018.

Xu, J., An, Q., Cai, X., e Chen, M. Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/250F CFRP laminates, **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, vol. 14(10), p. 1687-1696, 2013.

Yalçın, B., Özgür, A. E., e Koru, M. The effects of various cooling strategies on surface roughness and tool wear during soft materials milling, **Materials & Design**, vol. 30(3), p. 896-899, 2009.

Yashiro, T., Ogawa, T., e Sasahara, H. Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 70, p. 63-69, 2013.

Zhou, J. W., Chen, Y., Fu, Y. C., Xu, J. H., Hu, A. D., e Liu, S. Q. Optimization of milling parameters of CFRP for surface roughness using Taguchi design method. **Advanced Materials Research**, vol. 1027, p. 76-79, 2014.

Zitoune, R., Collombet, F., e Lopez, G. H. Experimental and analytical study of the influence of HexFit® glass fibre composite manufacturing process on delamination during drilling, **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, vol. 3(3-4), p. 326-342, 2008.

APÊNDICES

A.1 Determinação dos Fatores Controláveis

A Tabela A.1 apresenta a determinação dos fatores controláveis do processo de furação através da atribuição dos índices de importância relativa para cada variável resposta, gerando pesos para cada parâmetro de processo, os quais são escolhidos pelo maior peso. Analogamente, a Tabela A.2 apresenta a determinação dos fatores controláveis do processo de fresamento.

Tabela A.1 – Determinação dos fatores controláveis de maior interesse de análise na furação.

$R_{ij} = \text{Relações } X_i Y_j$													
	IE_i	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
Y1	7	9	6	9	-	6	6	6	9	6	6	6	6
Y2	8	9	9	9	-	9	9	6	9	6	9	9	9
Y3	9	9	9	9	-	9	6	6	9	9	9	9	9
Y4	10	9	9	9	-	9	9	6	9	9	9	9	9
Y5	9	6	9	9	-	9	9	6	6	6	6	6	6
Y6	9	6	9	9	-	9	9	6	6	6	6	6	6
$PR(x_j)$		414	447	468	-	447	420	312	414	369	393	393	393

Tabela A.2 – Determinação dos fatores controláveis de maior interesse de análise no fresamento.

$R_{ij} = \text{Relações } X_i Y_j$													
	IE_i	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
Y1	9	6	9	9	9	9	6	6	6	6	-	6	6
Y2	9	6	9	9	9	9	6	6	6	6	-	6	6
$PR(x_j)$		108	162	162	162	162	108	108	108	108	-	108	108

A.2 Determinação do Fator de Delaminação Ajustado

A Tabela A.3 apresenta os resultados obtidos quanto aos valores de fator de delaminação e fator de delaminação ajustado para o processo de furação.

Tabela A.3 – Valores de F_d e F_{da} da entrada e saída dos furos.

Execução		Entrada				Saída			
		1° Furo		10° Furo		1° Furo		10° Furo	
		F_d	F_{da}	F_d	F_{da}	F_d	F_{da}	F_d	F_{da}
Seco	1	1,008	1,015	1,027	1,038	1,340	1,534	1,396	1,590
	2	1,014	1,017	1,028	1,057	1,268	1,421	1,446	1,677
	3	1,021	1,032	1,032	1,069	1,351	1,510	1,383	1,565
	4	1,015	1,021	1,039	1,146	1,303	1,437	1,347	1,591
	5	1,022	1,026	1,043	1,088	1,327	1,500	1,376	1,568
	6	1,015	1,020	1,030	1,069	1,332	1,494	1,361	1,599
	7	1,007	1,010	1,118	1,296	1,298	1,425	1,405	1,641
	8	1,015	1,021	1,067	1,179	1,225	1,342	1,367	1,555
	9	1,058	1,061	1,086	1,161	1,182	1,272	1,367	1,568
ACR	10	1,001	1,008	1,014	1,022	1,283	1,421	1,470	1,697
	11	1,010	1,015	1,017	1,025	1,285	1,414	1,455	1,686
	12	1,003	1,010	1,014	1,023	1,255	1,395	1,352	1,561
	13	1,007	1,012	1,017	1,022	1,290	1,456	1,399	1,700
	14	1,011	1,015	1,003	1,011	1,317	1,495	1,391	1,590
	15	1,000	1,004	1,018	1,029	1,327	1,512	1,438	1,676
	16	1,004	1,007	1,020	1,024	1,335	1,549	1,417	1,690
	17	1,016	1,019	1,021	1,026	1,427	1,648	1,455	1,704
	18	1,004	1,006	1,002	1,009	1,316	1,557	1,352	1,588

A.3 Valores dos Parâmetros de Rugosidade

A Tabela A.4 apresenta os valores dos parâmetros de rugosidade medidos no processo de furação e a Tabela A.5 os valores medidos no processo de fresamento.

Tabela A.4 – Valores dos parâmetros de rugosidade na furação.

Execução		Valores de Rugosidade [μm]			
		R_a	R_q	R_z	R_t
Seco	1	5,20	6,75	25,82	47,06
	2	6,15	7,92	32,48	51,47
	3	4,19	5,52	22,88	39,54
	4	7,45	9,51	34,16	59,45
	5	8,23	10,57	36,63	64,92
	6	6,30	8,00	30,94	49,88
	7	7,13	8,79	30,06	56,86
	8	6,93	8,88	33,68	56,39
	9	4,75	6,10	25,20	36,14
ACR	10	6,40	8,01	29,58	56,69
	11	6,58	8,28	26,75	51,70
	12	6,02	7,57	26,93	40,63
	13	3,16	4,09	16,35	26,45
	14	4,52	5,94	21,85	41,76
	15	3,01	3,74	15,73	26,22
	16	3,99	4,99	18,88	26,88
	17	3,24	4,13	16,06	24,16
	18	4,52	5,69	22,44	33,86

Tabela A.5 – Valores dos parâmetros de rugosidade no fresamento.

Execução	a_{p-R} [mm]	Valores de Rugosidade [μm]			
		R_a	R_q	R_z	R_t
1	0.28	0,96	1,21	5,39	7,53
2	0.74	2,53	3,11	12,58	24,72
3	0.86	1,68	2,02	8,18	11,86
4	0.52	1,93	2,37	10,13	13,52
5	1.01	1,84	2,31	10,34	14,22
6	0.70	2,21	2,66	10,64	15,24
7	0.77	1,75	2,33	10,35	14,18
8	1.65	4,50	5,46	20,60	31,30
9	1.72	2,28	2,90	12,53	19,48
10	1.44	2,05	2,68	12,82	19,87
11	1.73	3,37	4,14	16,44	31,09
12	1.80	1,75	2,18	9,72	15,61
13	0.80	1,49	1,88	10,33	16,66
14	0.90	2,40	2,97	13,09	21,17
15	0.95	1,85	2,26	10,53	14,72

A.4 Efeitos Principais e Interação dos Fatores sobre R_q , R_z e R_t em Fresamento

As figuras que se seguem apresentam os gráficos dos efeitos principais e efeitos de interação significativos para os parâmetros de rugosidade R_q , (Figura A.1), R_z (Figura A.2) e R_t (Figura A.3). Visto que o meio lubrificador não foi significativo para R_t , este efeito não foi apresentado na Figura A.3a.

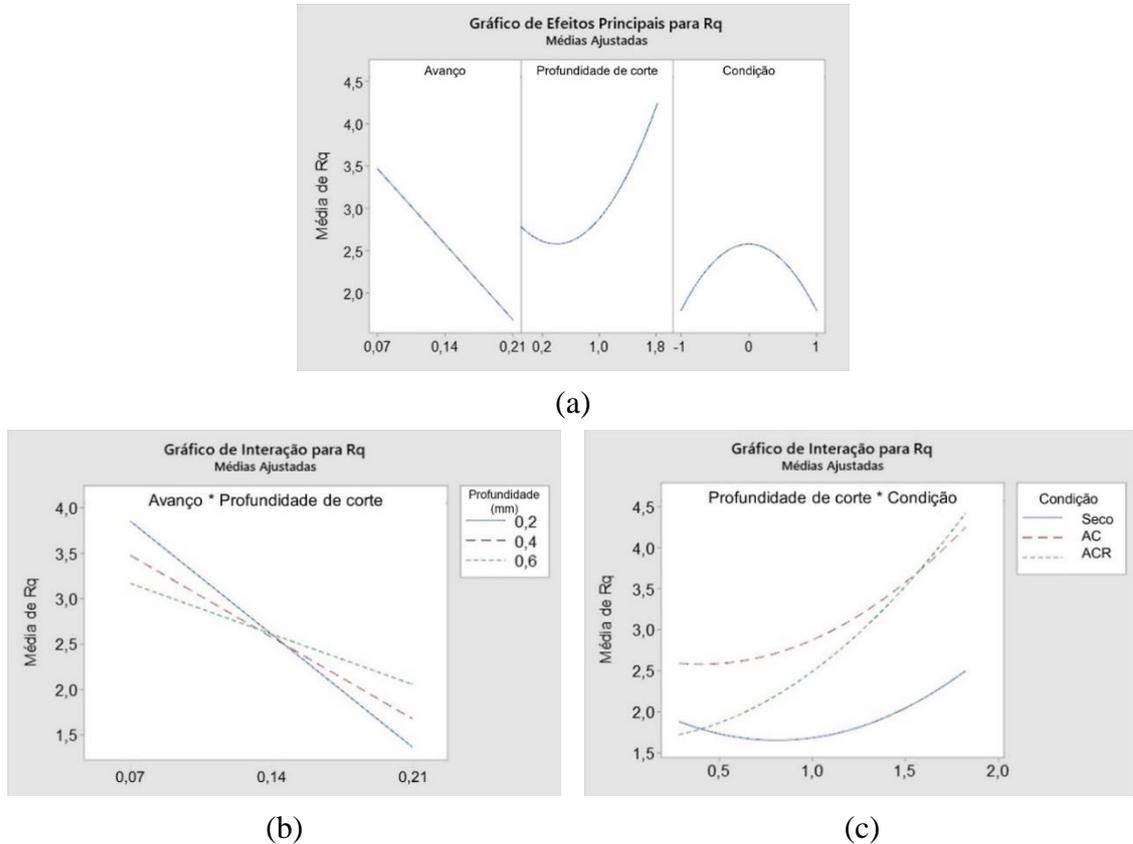
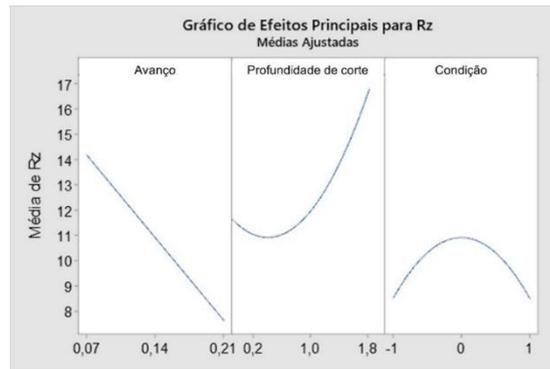


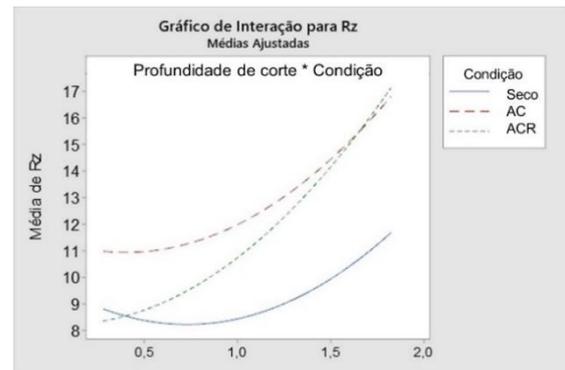
Figura A.1 – Gráficos dos fatores significativos de R_q no fresamento: (a) efeitos principais; (b) efeito da interação $a_p \times f$; (c) efeito da interação $a_p \times LC$.



(a)

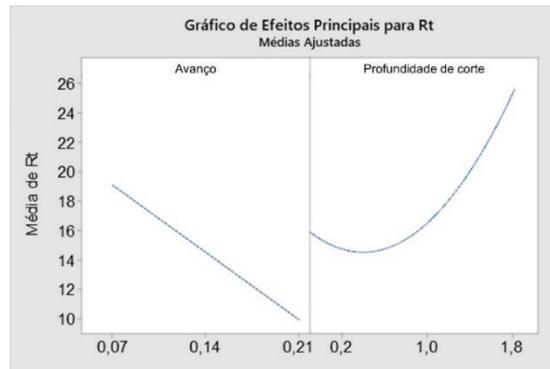


(b)

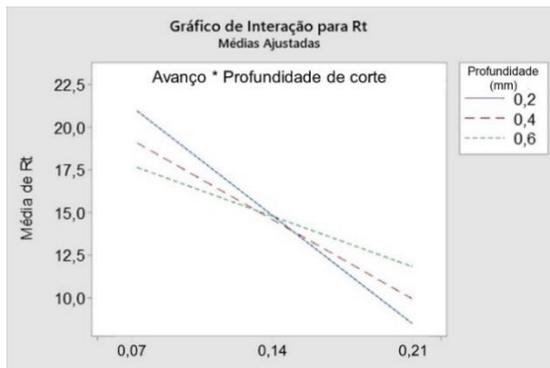


(c)

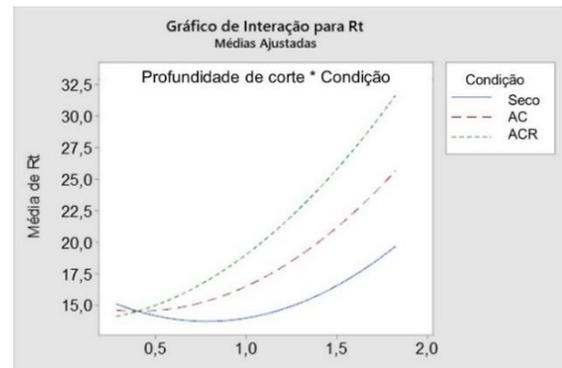
Figura A.2 – Gráficos dos fatores significativos de R_z no fresamento: (a) efeitos principais; (b) efeito da interação $a_p \times f$; (c) efeito da interação $a_p \times LC$.



(a)



(b)



(c)

Figura A.3 – Gráficos dos fatores significativos de R_t no fresamento: (a) efeitos principais; (b) efeito da interação $a_p \times f$; (c) efeito da interação $a_p \times LC$.