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

ANÁLISE DO ACABAMENTO NO TERMOPLÁSTICO SEMICRISTALINO POLI-ÉTER-ÉTER-CETONA OBTIDO PELO FRESAMENTO FRONTAL EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CORTE E LUBRIRREFRIGERAÇÃO

por

Jeferson de Souza de Jesus

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, julho de 2025

ANÁLISE DO ACABAMENTO NO TERMOPLÁSTICO SEMICRISTALINO POLI-ÉTER-ÉTER-CETONA OBTIDO PELO FRESAMENTO FRONTAL EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CORTE E LUBRIRREFRIGERAÇÃO

por

Jeferson de Souza de Jesus
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), da Escola de Engenharia (EE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 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

Aprovada por:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez	PROMEC/UFRGS
Prof. Dr. Heraldo José de Amorim	DEMEC/UFRGS
Prof. Dr. Liu Yesukai de Barros	PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Daniel Milbrath, De Leon
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 25 de julho de 2025

À minha esposa, Adriana
e às minhas filhas, Rafaela e Júlia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço às pessoas que auxiliaram essa pesquisa de forma direta e indireta.

Ao professor orientador Dr. André João de Souza, que com sua experiência, foi de fundamental importância para definição do tema de pesquisa, correção da construção do texto e elaboração dos experimentos.

Aos doutorandos Carlos Alfredo Gracioli Aita e Émerson dos Santos Passari, por compartilharem informações relevantes ao trabalho de forma muito prestativa.

Ao técnico do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), Guilherme Vargas Schirmer, pela colaboração nos testes experimentais e pela forma receptiva que sempre dispensou na execução das tarefas.

À empresa A.J.S., pela compreensão dos períodos de ausência ao trabalho para assistir aulas e executar testes de laboratório.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), por terem proporcionado essa oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro à participação no 13º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF 2025).

RESUMO

O poli-éter-éter-cetona (do inglês PEEK: *poly-ether-ether-ketone*), é um polímero termoplástico semicristalino de alto desempenho, e é definido como um plástico especial de engenharia. Suas principais características são o elevado ponto de fusão, baixa densidade, excelente rigidez, boa dureza e elevada resistência química e resistência ao desgaste. Esses fatores o tornam um possível substituto para metais em aplicações nas indústrias elétrica, eletrônica, automotiva, aeroespacial, marítima e na indústria médica, especialmente para fabricação de implantes ortopédicos e traumatológicos, devido a sua biocompatibilidade e biodegradabilidade. A textura superficial do PEEK é uma característica importante para determinadas aplicações na fabricação de componentes. No caso de implantes médicos, as geometrias complexas juntamente com a necessidade de baixas rugosidades superficiais, indicam a necessidades de estudos de processos mais adequados para atendimento a estes requisitos técnicos. Os processos de usinagem em geral e o fresamento frontal em particular são de importância considerável no sentido de preparar estes componentes para as devidas aplicações. Desta forma, este estudo investigou os efeitos de diferentes condições de corte e lubrirrefrigeração no fresamento frontal do PEEK. O estudo avaliou os perfis e os parâmetros de rugosidade (R_a, R_z, R_t), além das parcelas ativa e passiva da força de usinagem em diferentes condições de corte. Foi usada uma fresa integral de metal duro com revestimento de TiAlN, quatro arestas e diâmetro 20 mm, em um centro de usinagem vertical. Os meios lubrirrefrigerantes utilizados foram o ar comprimido refrigerado a −40ºC, a usinagem a seco e a aplicação de nanofluido comercial em mínima quantidade de lubrificação. Para o planejamento do processo e dos dados estatísticos coletados foi utilizado o projeto de experimento de Box-Behnken. Os resultados indicaram uma vantagem técnica para a usinagem a seco, em que foram produzidos os melhores acabamentos comparativamente aos demais meios lubrirrefrigerantes. Na avaliação dos fatores controláveis, ficou evidenciado que o avanço por dente é o parâmetro mais significativo na obtenção de uma baixa rugosidade. A otimização do processo e a avaliação das forças de usinagem foram etapas complementares do estudo.

Palavras-chave: Fresamento frontal; PEEK; Rugosidade; Ar comprimido refrigerado; Nanofluido.

ABSTRACT

Poly-ether-ether-ketone (PEEK) is a high-performance semicrystalline thermoplastic polymer that is defined as a special engineering plastic. Its main characteristics are its high melting point, low density, excellent rigidity, good hardness, high chemical resistance, and high wear resistance. These factors make it a possible substitute for metals in applications in the electrical, electronic, automotive, aerospace, maritime, and medical industries, especially for manufacturing orthopedic and trauma implants, due to its biocompatibility and biodegradability. The surface texture of PEEK is an essential characteristic for specific applications in the manufacture of components. In the case of medical implants, complex geometries, jointly with the need for low surface roughness, indicate the conditions for more appropriate processes to meet these technical requirements. Machining processes, in general, and face milling, in particular, are fundamental in preparing these components for their intended applications. Thus, this study investigated the effects of different cutting and lubricooling conditions on the face milling of PEEK. The research evaluated the roughness parameters (R_a, R_z, R_t), the roughness profiles, and the active and passive machining force components under different conditions. A solid TiAlN-coated carbide milling cutter with four cutting edges and a diameter of 20 mm was used as a cutting tool in a vertical machining center. The lubricooling conditions used were cooled compressed air at −40ºC, dry machining, and the application of commercial nanofluid in minimum quantity lubrication. The Box-Behnken experimental design was used for process planning and statistical data collection. The results show a technical advantage for dry machining, in which the best finishes were produced compared to other lubricooling conditions. In evaluating the controllable factors, it was evident that the feed per tooth is the most significant parameter in obtaining low surface roughness values. Process optimization and evaluation of machining forces were complementary steps to this study.

Keywords: Face milling; PEEK; Surface roughness; Cooled compressed air; Nanofluid.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 Objetivo Geral 4

1.2 Objetivos Específicos 4

1.3 Motivação para a Pesquisa 5

1.4 Organização do Trabalho 5

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6

2.1 Termoplástico PEEK 6

2.2 Características do Fresamento Frontal 8

2.2.1 Ferramentas de corte 9

2.3 Meios Lubrirrefrigerantes 10

2.4 Forças de Usinagem 11

2.5 Textura Superficial 13

2.6 Projeto de Experimentos 15

3 MATERIAIS E MÉTODOS 18

3.1 Corpo de Prova 18

3.2 Máquina Operatriz e Ferramenta de Corte 18

3.3 Meios Lubrirrefrigerantes 20

3.4 Aquisição dos Sinais de Força 21

3.5 Avaliação do Acabamento Superficial 21

3.6 Planejamento, Execução e Análise Experimental 22

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 25

4.1 Acabamento da Superfície Usinada 25

4.1.1 Análises de rugosidades 25

4.1.2 Análises estatísticas 28

4.1.3 Avaliação dos perfis de rugosidade 33

4.1.4 Avaliação da textura da superfície 38

4.1.5 Otimização multivariada 40

4.2 Considerações sobre as Forças de Usinagem 44

5 CONCLUSÕES 46

REFERÊNCIAS 48

ANEXOS 55

ANEXO I – Tipos de PEEK e Aplicações na Indústria 55

ANEXO II – Propriedades Mecânicas e Térmicas do Poli-Éter-Éter-Cetona 56

APÊNDICES 57

APÊNDICE I – Parâmetros de Corte e Forças de Usinagem - F_U (N) 57

APÊNDICE II – Sinais de Força de Usinagem - F_U (passe de controle 2) 58

APÊNDICE III – Sinais de Força de Usinagem - F_U (passe de controle 8) 59

APÊNDICE IV – Sinais de Força de Usinagem - F_U (passe de controle 14) 60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Implante para fixação da coluna vertebral utilizando PEEK [Osteomed, 2013] 5

Figura 2.1 Exemplos de componentes mecânicos fabricados com PEEK para a indústria [www.ensingerplastics.com] 6

Figura 2.2 Componentes para implantes na área médica fabricados com PEEK 7

Figura 2.3 Fresamento frontal com fresa de topo inteiriça [Sandvik, 2018] 8

Figura 2.4 Fresamento frontal: (a) simétrico; (b) assimétrico [Diniz et al., 2013] 8

Figura 2.5 Sistema de ar comprimido resfriado [Rubio et al., 2015] 10

Figura 2.6 Direções das componentes da força de usinagem (F_A, F_T e F_R) no fresamento frontal [Jayaram et al., 2001] 12

Figura 2.7 Definição do parâmetro de rugosidade média [Petropoulos et al., 2010] 14

Figura 2.8 Definição do parâmetro de rugosidade média parcial [Petropoulos et al., 2010] 14

Figura 2.9 Definição do parâmetro de rugosidade total [Petropoulos et al., 2010] 15

Figura 2.10 Representação gráfica do experimento Box-Behnken de três fatores: (a) cubo; (b) três interfaces do projeto fatorial 2^2 [Ferreira et al., 2007] 17

Figura 3.1 Corpo de prova e máquina ferramenta: (a) fixação de corpo de prova no dinamômetro; (b) centro de usinagem ROMI Discovery 308 19

Figura 3.2 Fresa de topo de metal duro integral com cobertura de TiAlN 19

Figura 3.3 Geração de ar comprimido refrigerado (CCA): (a) sistema de refrigeração com gelo seco; (b) aplicação do CCA a −40 °C 20

Figura 3.4 Aplicação do NMQL: (a) Nanofluido; (b) Nebulizador IV; (c) Posição do bico 21

Figura 3.5 Medição e condicionamento de sinais Kistler: (a) dinamômetro piezelétrico; (b) amplificador de carga 21

Figura 3.6 Aquisição de dados de rugosidade: (a) dimensões das amostras usinadas (em mm); (b) procedimento de medição com o rugosímetro 22

Figura 3.7 Usinagem das amostras (segmentos) 24

Figura 4.1 Valores de rugosidade média (R_a) resultantes com base nas combinações por passe entre dados de corte e meios lubrirrefrigerantes. 25

Figura 4.2 Valores de rugosidade média parcial (R_z) resultantes com base nas combinações por passe entre dados de corte e meios lubrirrefrigerantes. 26

Figura 4.3 Valores de rugosidade total (R_t) resultantes com base nas combinações por passe entre dados de corte e meios lubrirrefrigerantes. 26
Figura 4.4 Gráficos de superfície das rugosidades R_a, R_z e R_t utilizando f_z = 0,05 mm/dente: (a) CCA; (b) DRY; (c) NMQL 32
Figura 4.5 Perfis de rugosidade das superfícies com menores valores de R_a em l_m = 4 mm: (a) amostra 7 com CCA; (b) amostra 7 com DRY; (c) amostra 5 com NMQL 34
Figura 4.6 Perfis de rugosidade das superfícies com pior acabamento (R_a) em l_m = 4,0 mm: (a) amostra 12 com CCA; (b) amostra 15 com DRY; (c) amostra 13 com NMQL. 35
Figura 4.7 Curvas AFC e APD para as menores rugosidades (R_a) das amostras avaliadas 36
Figura 4.8 Curvas AFC e APD para as maiores rugosidades (R_a) das amostras avaliadas 37
Figura 4.9 Imagem MEV das superfícies com melhor acabamento: (a) amostra 7 com CCA; (b) amostra 7 com DRY; (c) amostra 5 com NMQL (ampliação 200x). 38
Figura 4.10 Imagem MEV das superfícies com melhor acabamento: (a) amostra 7 com CCA; (b) amostra 7 com DRY; (c) amostra 5 com NMQL (ampliação 5000x). 39
Figura 4.11 Imagem MEV das superfícies com o pior acabamento: (a) amostra 12 com CCA; (b) amostra 15 com DRY; (c) amostra 13 com NMQL (ampliação 5000x). 40
Figura 4.12 Otimização da desejabilidade composta: (a) CCA; (b) DRY; (c) NMQL. 41
Figura 4.13 Forças nos passes com parâmetros em nível médio: (a) ativas; (b) passivas.... 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Estrutura molecular do material 7
Tabela 3.1 Características dimensionais da fresa de topo TR 4C 19
Tabela 3.2 Níveis dos fatores de entrada do BBD 23
Tabela 3.3 Ordem e configuração dos passes 23
Tabela 4.1 Comparação entre os passes de menor e maior valor de rugosidade para cada meio lubrirrefrigerante. 27
Tabela 4.2 Variação estatística percentual de rugosidade considerando os passes 2, 8 e 14. 29
Tabela 4.3 ANOVA para R_a sob diferentes condições lubrirrefrigerantes. 29
Tabela 4.4 ANOVA para R_z sob diferentes condições lubrirrefrigerantes. 30
Tabela 4.5 ANOVA para R_t sob diferentes condições lubrirrefrigerantes. 31
Tabela 4.6 Resultados da otimização multivariada. 42
Tabela 4.7 Resultados dos passes de validação. 42
Tabela 4.8 Comparação entre as variáveis de resposta (R_a, R_z, R_t) obtidas no experimento e as otimizadas (validação) com base nos parâmetros de corte. 43
Tabela 4.9 Valores médios e desvios-padrões das forças de usinagem (F_U) 45

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

a_e	Largura de corte [mm]
a_p	Profundidade de corte [mm]
b_n	Coeficientes de regressão múltipla
CCA	*Cooled-Compressed Air* (ar comprimido resfriado)
C_o	Quantidade de pontos centrais
d	Diâmetro da broca [mm]
DOE	*Design of Experiments* (Projeto de Experimentos)
f	Avanço por volta [mm/volta]
F_A	Força axial [N]
F_a	Força ativa de usinagem [N]
F_p	Força passiva de usinagem [N]
F_R	Força radial [N]
F_T	Força tangencial [N]
F_U	Força de usinagem [N]
f_z	Avanço por dente [mm/dente]
h	Espessura média do cavaco [mm]
K	Variáveis de entrada
k_s	Pressão específica de corte [N/mm^2]
l_e	Comprimento de amostragem [mm]
l_m	Comprimento de medição [mm]
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MQL	Mínima quantidade de lubrificação
n	Rotação (voltas /minuto)
NF	Nanofluidos
NMQL	Mínima quantidade de lubrificação baseada em nanofluidos
PEEK	*Poly-ether-ether- ketone* (poli- éter-éter-cetona)
R^2	Coeficiente de determinação [%]
RSM	*Response Surface Methodology* (Metodologia de Superfície de Resposta)
TiAlN	Nitreto de Titânio-Alumínio
Valor-p	Probabilidade de significância
v_c	Velocidade de corte [m/min]

v_f	Velocidade de avanço [mm/min]
x_i	Fatores controláveis (variáveis independentes de entrada)
Y	Variáveis de resposta (fatores dependentes de saída)
σ	Ângulo de ponta da broca [°]
φ	Ângulo de contato do dente da fresa com a peça [°]

1 INTRODUÇÃO

Poli-éter-éter-cetona (do inglês PEEK: *poly-ether-ether-ketone*) é um polímero termoplástico semicristalino poli aromático de alto desempenho com elevado ponto de fusão, alto módulo de elasticidade, baixa densidade, excelente rigidez, boa dureza, elevada resistência química, térmica e mecânica, além de excelente resistência ao desgaste quando submetido a diferentes pressões, temperaturas, velocidades e solicitações de atendimento a determinadas superfícies de contato [Zheng et al., 2022]. O PEEK é um plástico especial de engenharia quimicamente inerte [Ha et al., 1997], que possui elevado ponto de fusão, alta solubilidade e alto peso molecular, que oferece resistência à corrosão, à radiação e baixa inflamabilidade, além de excelente desempenho de processamento [Davim et al., 2003]. Este conjunto de características o tornam um material atrativo para utilização como um possível substituto para metais em componentes para as indústrias elétrica, eletrônica, automotiva, aeroespacial, marítima [Hanafi et al., 2012] e médica, especialmente para implantes ortopédicos e traumatológicos devido à sua biocompatibilidade e biodegradabilidade [Kurtz e Devine, 2007].

A textura da superfície é um fator relevante para implantes médicos, visto que as células que envolvem o material interagem com o substrato em escalas micro e nanométricas. Esses implantes são fabricados por extrusão e injeção em moldes e, por este motivo, operações adicionais de usinagem são requeridas de forma a garantir bom acabamento [Izamshah et al., 2013]. Por exemplo, os implantes requerem superfícies com R_a entre 1,0 μm e 1,5 μm [Beșliu-Băncescu et al., 2024]. Contudo, uma boa qualidade superficial não é somente necessária aos aspectos estéticos do produto, mas também para melhorar suas propriedades tribológicas, resistência à fadiga e corrosão [Izamshah et al., 2013]. Desta forma, o desempenho da usinagem para obter um acabamento adequado é diretamente afetado pelas condições de corte e lubrirrefrigeração as quais devem ser metodicamente analisadas.

No processo de usinagem, uma grande quantidade de calor é gerada com consequente aumento da temperatura na zona de corte, podendo afetar a vida da ferramenta, os desvios dimensionais e geométricos da peça, além da integridade superficial, deteriorando o produto [Vieira et al., 2001]. Desta forma, a otimização dos parâmetros de corte e a eficiência dos meios lubrirrefrigerantes devem ser bem determinados para produzir uma superfície técnica que atenda às especificações de qualidade [Debnath et al., 2014].

Com relação aos meios lubrirrefrigerantes as abordagens atuais disseminadas e favoráveis à proteção ao meio ambiente consideram a usinagem a seco (DRY), o emprego de

mínima quantidade de lubrificantes (MQL) e a aplicação de gases de arrefecimento refrigerados a diferentes temperaturas (do inglês CCA: *cooled compressed air*) [Kuram et al., 2013].

A condição DRY não utiliza lubrirrefrigeração, reproduzindo o cenário *eco-friendly* [Goindi e Sarkar, 2017]. Izamshah et al. (2013) estudaram o fresamento frontal a seco do PEEK, testando diferentes geometrias da fresa e concluíram que os parâmetros geométricos das arestas de corte possuem grande influência nas forças de usinagem. A interpretação deste estudo aponta que determinadas geometrias podem ser mais adequadas à usinagem a seco, viabilizando o processo. Mata et al. (2009) investigaram o torneamento a seco do PEEK, com base nas análises da pressão específica de corte e da potência de usinagem. A avaliação dos efeitos da velocidade de corte (v_c) e do avanço (f) mostraram que para um certo nível de v_c, a pressão específica diminui e a potência aumenta com o avanço. O resultado desta pesquisa conduz ao entendimento que os parâmetros de corte têm influência significativa no processo.

A utilização da técnica MQL é uma alternativa ao uso de fluido lubrirrefrigerante em abundância, sendo uma condição para operações em que o corte a seco não é aplicável, sobretudo em situações em que a alta qualidade superficial é requerida [Dhar et al., 2006; Su et al., 2006]. A adição de nano partículas sólidas ao fluido abre o campo de visão para novas aplicações em usinagem, pois possuem a capacidade de aumentar a transferência de calor e a lubrificação do fluido-base ao qual são adicionadas. Assim, quando as nano partículas são processadas dentro de fluidos e homogeneizadas, formam os nanofluidos [Chinchanikar et al., 2021]. Desta forma, o nanofluido pode ser aplicado em mínima quantidade (NMQL).

Nas operações de usinagem com a aplicação de gases de arrefecimento, um nível moderado de temperatura da aresta de corte e uma diminuição da tendência ao choque térmico reduzem os fenômenos de desgaste da ferramenta; de forma conjunta, um baixo gradiente de temperatura é gerado na subcamada usinada, reduzindo o risco de tensões residuais de alta resistência [Le Coz et al., 2012]. Khoran et al. (2020) realizaram uma análise comparativa entre o ar comprimido e o dióxido de carbono líquido (LCO_2 a −78 °C) no processo de retificação do PEEK, e concluíram que o resfriamento com LCO_2 produziu melhor qualidade superficial em todas as condições testadas devido à redução da temperatura na zona de corte. O motivo mais evidente é que na retificação de polímeros com ar comprimido, a porosidade do rebolo é preenchida com partículas do material usinado, causando um aumento das forças de corte e da temperatura de usinagem e, como resultado, a deterioração da integridade da superfície.

Ainda de forma adicional, segundo Diniz et al. (2013) as condições de lubrificação e refrigeração representam um fator que pode influenciar na variação das forças de corte do

material. Conforme o meio de lubrirrefrigeração utilizado e o tipo de aplicação, pode haver a alteração da pressão específica de corte (K_s), modificando as condições de atrito entre cavaco e ferramenta. Quanto mais eficiente for a penetração do fluido e quanto maior o efeito lubrificante deste fluido, maior será a diminuição de K_s e, portanto, menor a força de corte. Santos e Sales, (2007), consideram que a geração das forças de corte está relacionada com o material da peça e da ferramenta, e a presença ou não de meio lubrirrefrigerante.

Existe um número limitado de estudos sobre a usinagem do PEEK. Na maioria dos casos, as pesquisas estão concentradas em operações de torneamento, em que a ação de corte da ferramenta é menos complexa que no fresamento, cujo processo é indicado na fabricação de componentes para implantes médicos [Izamshah et al., 2015]. A seleção apropriada das condições de usinagem é de extrema importância, pois a qualidade da superfície tem grande efeito sobre a integridade e o funcionamento dos referidos componentes [Izamshah et al., 2013].

Pelo fato de o processo de fresamento apresentar diferentes fatores controláveis e variáveis de resposta, um projeto de experimento (DoE*)* torna-se necessário. Para isso, a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) é utilizada com o intuito de modelar as informações relevantes para a variável de resposta através de técnicas direcionadas à análise de dados experimentais coletados. O objetivo é determinar as condições ótimas de operação [Montgomery, 2004]. Um dos principais projetos para a execução da RSM é o delineamento experimental de Box-Behnken (do inglês BBD: *Box-Behnken Design*), que é um método de otimização estatística que visa obter simultaneamente os melhores níveis em um conjunto de fatores que influenciam uma variável de resposta específica [Ferreira et al., 2007]. O BBD combina análise fatorial com projeto de blocos incompletos e propõe três níveis para cada fator controlável para desenvolver uma superfície de resposta. O BBD tem a vantagem de reduzir o número de execuções que precisam ser efetuadas, gerar menor consumo de material e reduzir o trabalho de laboratório. Por exemplo, em um planejamento fatorial completo 3^3, seriam necessárias 27 execuções diferentes sem repetições. O uso do BBD permite reduzir o número de execuções para 15 [Policena et al., 2018].

Para exemplificar a aplicação de BBD, Vinayagamoorthy (2017) estudou a otimização de furação em laminados sanduiche (70% de matriz poliéster reforçada com 20% de tecido de juta 0º/90º e 10% de fibra de aço) com base na força de avanço, na rugosidade da parede do furo e nos danos na superfície de entrada em função dos fatores controláveis (rotação *n*, avanço *f*, diâmetro da broca *d* e ângulo de ponta da broca σ). Os resultados mostraram que a força de avanço é afetada sobremaneira por *f*, *d* e σ, enquanto a rugosidade é influenciada por *n* e *d*. O

dano na entrada do furo é causado principalmente por *n*, *f* e σ. A otimização foi feita definindo como objetivo a minimização das variáveis de resposta. A análise de desejabilidade foi feita, e um valor de desejabilidade completa D = 0,914 foi obtido. Ensaios de validação do modelo foram realizados, mostrando que a otimização foi satisfatória.

Aita et al. (2023), testaram a rugosidade e as forças de corte no fresamento frontal a seco do PEEK natural e do PEEK/CF30 (reforçado com 30% de fibras curtas de carbono). Concluíram que a média de rugosidade no PEEK/CF30 foi 34,8% inferior que no PEEK natural, e as forças de usinagem foram 34,9% superiores, devido ao reforço com fibras de carbono. O BBD foi usado para criar combinações dos parâmetros de corte (velocidade de corte v_c, avanço por dente f_z e profundidade de corte axial a_p) e a análise de variância foi empregada para investigar a influência destes parâmetros na usinagem dos dois materiais.

1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa pretende analisar os perfis e os valores dos parâmetros de rugosidade gerados durante o fresamento frontal do polímero termoplástico poli-éter-éter-cetona (PEEK), aplicando uma fresa de topo de metal duro integral, em diferentes condições de corte e de lubrirrefrigeração. Almeja-se ainda avaliar o comportamento das componentes da força de usinagem no processo.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as rugosidades [perfis e parâmetros de rugosidade média (R_a), média parcial (R_z) e total (R_t)] geradas nas superfícies usinadas, considerando os efeitos dos parâmetros de corte [velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z) e profundidade de corte axial (a_p)] e dos meios lubrirrefrigerantes [seco (DRY), ar comprimido resfriado a –40 °C (CCA) e nanofluido comercial em mínima quantidade (NMQL)].
- Analisar estatisticamente a influência dos fatores controláveis de entrada (parâmetros de corte) e dos meios lubrirrefrigerantes sobre as variáveis de resposta (rugosidades).
- Executar a otimização dos parâmetros de corte para cada meio lubrirrefrigerante empregado, evidenciando as melhores condições operacionais, com referência nos menores valores de rugosidade obtidos.
- Investigar os sinais de força ativa (F_a), força passiva (F_p) e força de usinagem (F_U) geradas durante o fresamento das amostras.

1.3 Motivação para a Pesquisa

A motivação para esta pesquisa apoia-se no fato de não ser encontrado um número expressivo de estudos sobre a usinagem do termoplástico PEEK em operações de fresamento. De forma conjunta uma avaliação associativa entre os parâmetros de corte (v_c, f_z, a_p) e os diferentes meios de lubrirrefrigeração pode ser elucidativa quanto às condições de usinagem a serem adotadas. A análise comparativa destas condições pode apresentar possíveis entendimentos sobre a viabilidade de redução da rugosidade. A obtenção de uma baixa rugosidade no PEEK é importante na indústria de forma geral. Como exemplo pode-se citar a fabricação de componentes para implantes ortopédicos e traumas (Figura 1.1). Devido à adequação ao uso, estes componentes possuem formas complexas, e o fresamento possibilita a geração destas geometrias associada a baixos valores de rugosidade que podem ser obtidos.

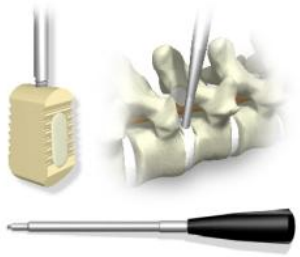


Figura 1.1 – Implante para fixação da coluna vertebral utilizando PEEK [Osteomed, 2013]

1.4 Organização do Trabalho

O trabalho está apresentado em cinco capítulos conforme sequência:

- Capítulo 1. Introdução do tema e apresentação dos objetivos geral e específicos e a motivação para a pesquisa.
- Capítulo 2. Revisão de literatura abordando conceitos e fundamentos do tema da pesquisa.
- Capítulo 3. Detalhamento do procedimento experimental, descrevendo materiais e métodos utilizados no estudo.
- Capítulo 4. Apresentação dos resultados obtidos no fresamento do PEEK sob diferentes combinações de parâmetros de corte e diferentes meios lubrirrefrigerantes. Análise comparativa das rugosidades.
- Capítulo 5. Conclusões sobre os resultados.
- Referências citadas no texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os pontos fundamentais para a estrutura da pesquisa serão apresentados conforme os seguintes temas: 1) Termoplástico PEEK; 2) Características do fresamento frontal; 3) Meios lubrirrefrigerantes; 4) Forças de usinagem; 5) Textura superficial; 6) Projeto de experimentos.

2.1 Termoplástico PEEK

O poli-éter-éter-cetona é um polímero termoplástico de alto desempenho que apresenta propriedades específicas como: alta pureza, baixa densidade (1,3 g/cm^3), boa resistência à tração (116 MPa), boa resistência à flexão (160 MPa), elevado ponto de fusão (341°C), elevado módulo de elasticidade, boa resistência mecânica, boa resistência à corrosão, boa tenacidade, alta resistência elétrica, ótima estabilidade dimensional, além de possibilitar alta temperatura de serviço e excelente desempenho de processamento. Além disso, apresenta excelente resistência ao desgaste abrasivo sob condições de diferentes pressões, temperaturas, velocidades e condições de contato com relativas rugosidades [Kurtz, 2007; Mata et al., 2009; Zheng et al., 2022]. Componentes moldados de PEEK absorvem muito menos umidade do que uma grande quantidade de outros termoplásticos. À temperatura ambiente, comporta-se como um típico termoplástico de engenharia [Kurtz, 2007]. Os tipos de PEEK utilizados nos setores industriais e suas possíveis aplicações são apresentadas no **ANEXO I**. A Figura 2.1 ilustra exemplos de aplicações em parafusos/porcas e rolamentos.

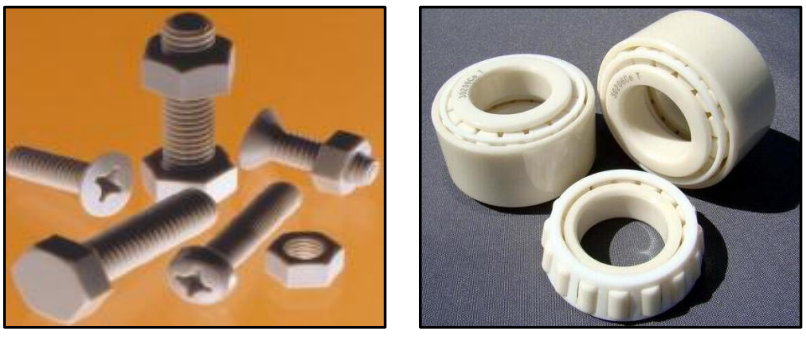


Figura 2.1 – Exemplos de componentes mecânicos fabricados com PEEK para a indústria [www.ensingerplastics.com]

Devido às propriedades físicas, o termoplástico PEEK é um material quimicamente inerte, ou seja, é insolúvel em temperatura ambiente na presença de todos os solventes

convencionais, com exceção do ácido sulfúrico em concentração de 98% [Ha et al., 1997]. O módulo de elasticidade é próximo ao módulo dos ossos humanos [Kizuki et al., 2015] e as suas propriedades térmicas garantem estabilidade no corpo humano [Fan et al., 2004]. Como exemplo de uma aplicação específica, o PEEK (poli-éter-éter-cetona) vem sendo utilizado de forma crescente como um biomaterial em implantes médicos, podendo ser utilizado em equipamentos ortopédicos, dentários, espinhais, juntas de dedos, dentre outros (Figura 2.2). As demandas do PEEK começaram a aumentar em aplicações médicas devido à alta resistência e propriedades de biocompatibilidade [Kurtz, 2011; Izamshah et al., 2015]. Conforme Green e Schlegel (2001), o PEEK tem se tornado um material alternativo para substituir titânio e outros materiais devido a sua combinação única em termos de compatibilidade e desempenho.

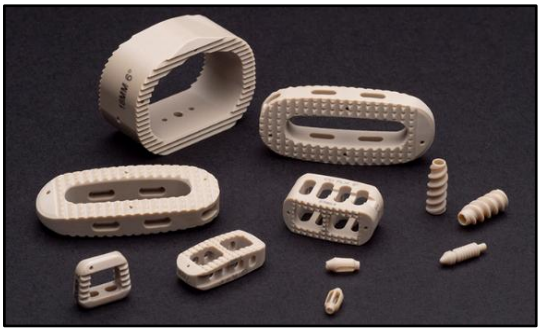
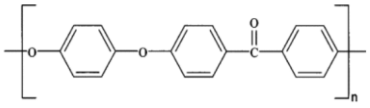


Figura 2.2 – Componentes para implantes na área médica fabricados com PEEK

O processo de obtenção do (PEEK) é dado por meio da reação de policondensação especial (envolve substituições nucleofílicas, ou seja, alguns átomos nos monômeros são substituídos por outros durante a reação, permitindo a posterior formação dos grupos funcionais éter) em que átomos de flúor de um dos precursores são substituídos por átomos de oxigênio conforme apresentado na Tabela 2.1 [www.ensingerplastics.com].

Tabela 2.1 – Estrutura molecular do material

Nome:	Poli-éter-éter-cetona (PEEK)
Fórmula estrutural:	
Fórmula química:	$(C_{19}H_{12}O_3)$ n
Classificação:	Polímero de alta performance

2.2 Características do Fresamento Frontal

Segundo Diniz et al. (2013), o fresamento frontal é caracterizado pela disposição das arestas de corte (dentes ativos da ferramenta) posicionadas na superfície frontal da ferramenta, sendo que esta operação em geral é geradora de superfícies planas na peça. Neste tipo de operação as ferramentas são chamadas fresas de topo ou fresas frontais. No fresamento frontal, a ferramenta encontra-se no eixo perpendicular à superfície da peça, sendo que os dentes ativos da fresa se mantém no plano da peça (Figura 2.3).

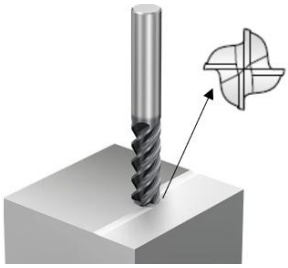


Figura 2.3 – Fresamento frontal com fresa de topo inteiriça [Sandvik, 2018]

Conforme Ferraresi (2013), o fresamento frontal pode ser simétrico ou assimétrico. O fresamento frontal simétrico ocorre quando o deslocamento do eixo da fresa se faz sobre o eixo de simetria da peça em usinagem (Figura 2.4a) e o frontal assimétrico quando o eixo da fresa encontra-se deslocado em relação ao eixo de simetria da peça, onde a_e corresponde à profundidade de corte radial (Figura 2.4b).

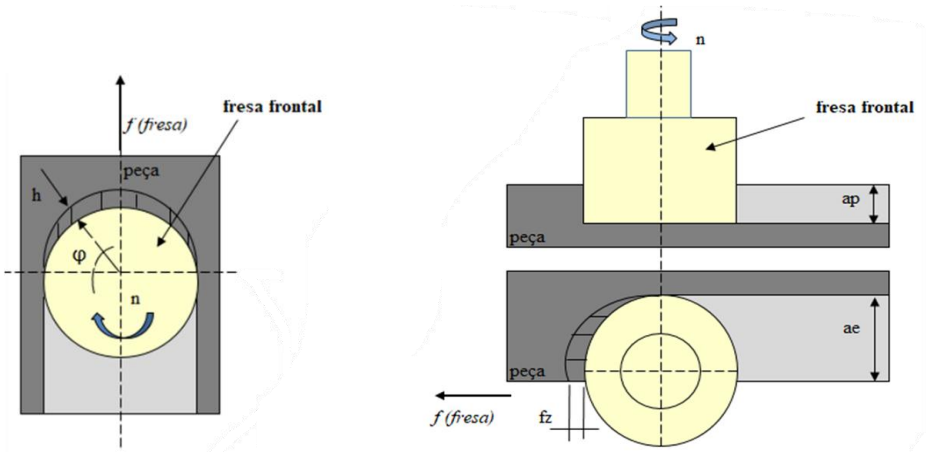


Figura 2.4 – Fresamento frontal: (a) simétrico; (b) assimétrico [Diniz et al., 2013]

A espessura de corte, representada por “h”, é medida sempre numa direção radial e varia de um valor mínimo desde o primeiro contato entre dente da ferramenta e peça até um valor máximo, correlacionado com o avanço por dente da fresa (f_z) e com o ângulo de contato entre ferramenta e peça (φ), onde *f* é o avanço por volta (mm/volta) e *n* é a rotação (rpm).

As variáveis do processo de usinagem são classificadas em variáveis independentes de entrada, as quais são possíveis de serem alteradas, e as dependentes de saída, em que os valores correspondem aos resultados do processo. Como exemplos de variáveis de entrada, tem-se materiais a serem usinados, parâmetros de corte, meios lubrirrefrigerantes e ferramentas de corte. As de saída estão correlacionadas com as condições finais do processo e, como exemplo, tem-se força de usinagem, vibrações, calor gerado e acabamento superficial [Black, 1995].

Davim e Mata (2006) investigaram os efeitos de ferramenta com insertos revestidos com PCD (diamante policristalino) no torneamento do termoplástico PEEK em diferentes velocidades de corte (v_c) e avanços (*f*). Os autores concluíram que o aumento de v_c contribuiu para aumentar a pressão específica de corte e reduzir a rugosidade (melhorou o acabamento). Em contrapartida, ao aumentar *f*, houve redução da pressão específica de corte e aumento da rugosidade (piorou o acabamento).

2.2.1 Ferramentas de corte

No processo de fresamento frontal, o acabamento superficial pode ser melhorado e as forças de corte podem ser reduzidas com a apropriada geometria de corte. As superfícies de saída e inclinação positivas e as arestas afiladas contribuem para a usinagem [Sandvik, 2018]. Izamshah et al. (2015) estudaram os efeitos das características da geometria da ferramenta na usinagem do PEEK. No experimento executado foram testadas três categorias de fresas frontais com variações no ângulo de saída, no ângulo de folga e no ângulo de hélice. Concluíram que as três variáveis observadas tiveram efeito significativo na rugosidade superficial e na formação de rebarbas. A pesquisa também apontou que o ângulo de saída muito elevado pode reduzir as forças devido à fricção e distribuição das tensões. Jesus et al. (2025) compararam duas geometrias de ferramentas durante a usinagem a seco do PEEK natural e constaram que a fresa inteiriça de metal duro de quatro arestas de corte resultou em menor rugosidade que o cabeçote de dois insertos de metal duro intercambiáveis. Conforme os autores, as fresas inteiriças possuem mais acuracidade de nivelamento do topo das arestas de corte devido ao seu processo de fabricação com fixação única.

No processo de corte, as falhas comuns relativas à aresta de corte podem ser o desgaste, devido ao atrito nas extremidades, e as possíveis trincas, originando lascamentos [Sandvik, 2018]. Conforme Ferraresi (2013), as condições inadequadas de refrigeração, juntamente com o corte interrompido, podem prejudicar o desempenho da ferramenta. Desta forma, o material da ferramenta deve possuir elevada resistência mecânica, capacidade de suportar o desgaste abrasivo e resistência química a altas temperaturas. Entre os materiais de ferramentas utilizados na aplicação de usinagem de polímeros (plásticos altamente abrasivos), o metal duro de classe K, destaca-se como um material que foi comumente empregado [Stemmer, 1989].

2.3 Meios Lubrirrefrigerantes

Conforme Kuram et al. (2013), as principais abordagens convenientes à proteção do meio ambiente são a usinagem a seco, a utilização de gases de arrefecimento e a aplicação de fluidos em mínima quantidade de lubrificação (MQL).

Segundo Sreejit e Ngoi (2000), a usinagem a seco (DRY) é considerada popular devido à abordagem *eco-friendly*. Entretanto, a condição DRY deve utilizar ferramentas de corte adequadas que permitam suprir a ausência das funções básicas dos fluidos (lubrificação, refrigeração e remoção de cavacos) na zona de corte.

Rubio et al. (2015) consideram que o sistema de ar comprimido resfriado (CCA) está incluso no grupo de gases refrigerados. Apesar da grande disponibilidade de ar comprimido na maior parte das empresas e da grande eficácia para reduzir a temperatura na zona de corte, essa técnica é pouco utilizada como meio de arrefecimento em usinagem. As suas características permitem aumento da vida da ferramenta, melhor acabamento da superfície da peça e melhor quebra do cavaco para materiais de difícil corte. Este sistema representa uma alternativa para os métodos de resfriamento tradicionais. Um esquema representativo é mostrado na Figura 2.5.

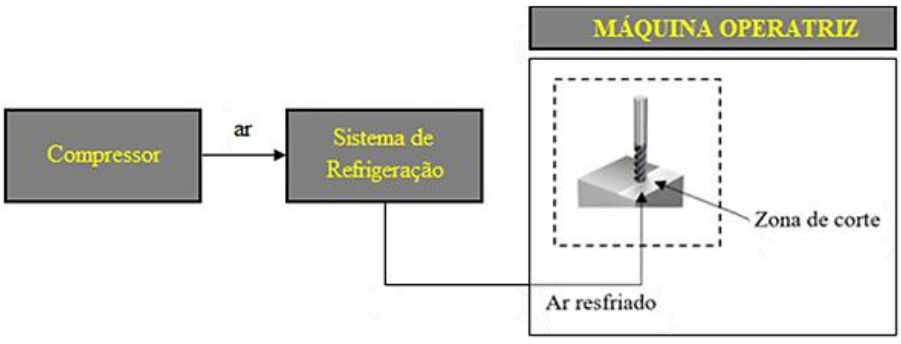


Figura 2.5 – Sistema de ar comprimido resfriado [Rubio et al., 2015]

De acordo com Gupta (2020), a usinagem com mínima quantidade de lubrificação (MQL) é uma técnica importante da usinagem verde, onde gotículas de lubrificante, principalmente ácidos graxos e óleos vegetais com baixa viscosidade, são direcionadas à zona de corte com auxílio de ar comprimido. Devido à distribuição uniforme do fluido aplicado nas interfaces cavaco/ferramenta e ferramenta/peça, a usinabilidade é melhorada. Como característica, isto implica em um baixo consumo de lubrificante (10 ~ 200 ml/h), comparativamente a muitos litros/min do método convencional de fluido em abundância. Contudo, a ação refrigerante do MQL é reduzida em comparação à técnica tradicional.

Nanofluidos (NF) são obtidos pela introdução de nano partículas sólidas (ex. óxido de cobre, óxido de alumínio, bissulfeto de molibdênio, sulfeto de manganês, grafeno etc.) em um líquido-base como água, etilenoglicol ou óleo. A análise física dos NF mostra que essas nano partículas podem facilmente penetrar nas falhas da superfície, aumentar a capacidade de transferência de calor e melhorar as propriedades tribológicas do fluido lubrirrefrigerante [Benedicto et al., 2017]. A razão entre a área da superfície e o volume de nano partículas pode ser o principal fator que afeta a condutividade térmica dos NF. Assim, entende-se que a razão será sempre incrementada com a adição de nano partículas menores no fluido-base [Yoo et al., 2007]. Os NF aplicados em mínima quantidade (NMQL) têm influência positiva na qualidade superficial [Itoigawa et al., 2007]. Por outro lado, Huang et al. (2016) afirmam que as nano partículas em suspensão tendem a se aglomerar durante a usinagem; como consequência, reduzem a eficiência de resfriamento e afetam a textura superficial.

2.4 Forças de Usinagem

A força total resultante que atua sobre a cunha cortante durante a ação de corte é chamada de força de usinagem (F_U). De acordo com Machado et al. (2015), a importância de conhecer as componentes da força de usinagem está no fato de que existe uma relação com os desgastes das ferramentas de corte e com as variantes de formação do cavaco, sendo que estas informações permitem avaliar a usinabilidade dos materiais. Izamshah et al. (2015), consideram que existe uma relação entre a força de corte e a geometria da ferramenta na usinagem de termoplásticos de alta performance (ex. PEEK).

Conforme Machado et al. (2015), a ação de corte e a formação dos cavacos ocorre de forma geral em uma condição tridimensional. Devido a isso, a força de usinagem (F_U) no fresamento frontal possui três componentes que agem diretamente sobre a aresta de corte: força

axial (F_A), força tangencial (F_T) e força radial (F_R), ilustradas na Figura 2.6. Ainda como fator do processo, pode-se ressaltar que na formação do cavaco, as forças variam de acordo com a espessura de corte (h). Por sua vez, h muda de acordo com a interação de contato da aresta de corte com o material usinado em função do ângulo de contato aresta-peça.

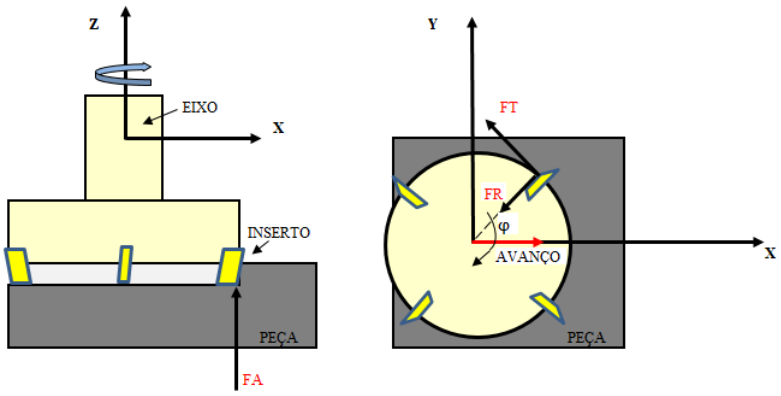


Figura 2.6 – Direções das componentes da força de usinagem (F_A, F_T e F_R) no fresamento frontal [Jayaram et al., 2001]

Segundo o modelo utilizado por Jayaram et al. (2001), a força de usinagem é proporcional à área da seção transversal de corte, e permite calcular as pressões específicas de corte (k_a, k_t, k_r) para as três componentes (F_A, F_T e F_R) nas suas respectivas direções. A espessura de corte (h) no fresamento frontal varia de acordo com a rotação da ferramenta, podendo ser calculada pela variação da posição angular φ e pelo avanço por dente da ferramenta (f_z). Os valores das pressões específicas (k_s) podem ser representadas por um vetor K que carrega os valores escalares de K. A força de uma aresta de corte "i" na posição angular φ é expressa pela Equação (2.1). As forças atuantes no ponto referencial do inserto (F_A, F_T, F_R) são decompostas nas direções dos eixos coordenados (x, y, z), em função da posição angular (φ) e calculadas pelas equações (2.2), (2.3) e (2.4).

$$F_i = \begin{vmatrix} F_A \\ F_T \\ F_R \end{vmatrix} = K \cdot a_p \cdot (f_z \cdot \text{sen } \varphi) = \begin{vmatrix} k_a \\ k_t \\ k_r \end{vmatrix} \cdot a_p \cdot (f_z \cdot \text{sen } \varphi) \tag{2.1}$$

$$F_x = -F_T \cdot \cos \varphi - F_R \cdot \text{sen } \varphi \tag{2.2}$$

$$F_y = F_T \cdot \text{sen } \varphi - F_R \cdot \cos \varphi \tag{2.3}$$

$$F_z = F_A \tag{2.4}$$

A força de usinagem (F_U) pode ser então decomposta nas principais componentes conforme a Equação 2.5.

$$F_U = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = \sqrt{F_T^2 + F_R^2 + F_A^2} \tag{2.5}$$

Cabe ressaltar que as forças de usinagem podem ser separadas em forças ativas (F_a) e passivas (F_p), conforme a direção de sua atuação. A força ativa ocorre no plano de trabalho (x, y), Equação (2.6), enquanto a força passiva ocorre em uma direção perpendicular ao plano de trabalho, ou seja, $F_p = F_A$.

$$F_a = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{F_T^2 + F_R^2} \tag{2.6}$$

2.5 Textura Superficial

A textura desempenha importante função na constituição de um produto, podendo estar vinculada a aspectos da integridade da superfície que pode ser um dos critérios fundamentais de funcionalidade na fabricação de componentes. As características da superfície usinada estão relacionadas com a resistência mecânica, fadiga, corrosão e desgaste de componentes [Rech et al., 2008]. A textura e integridade superficial estão muito ligadas e são afetadas de forma intensa pela usinagem dos materiais [Petropoulos et al., 2010]. A textura da superfície usinada é um parâmetro resultante do processo, que como uma variável de resposta, pode ser um critério de avaliação da qualidade de usinagem [Machado et al., 2015].

A textura é caracterizada por desvios de primeira a sexta ordem definidos por padrões internacionais. Os de primeira e segunda ordem referem-se, respectivamente, à forma (planicidade, circularidade etc.) e à ondulação, e são causados por erros da máquina-ferramenta, deformação da peça, configurações e fixações erradas, vibrações e não homogeneidades do material da peça. Os de terceira e quarta ordem referem-se a marcas periódicas, arranhões, rachaduras e falhas associadas ao estado da aresta de corte da ferramenta, à formação de cavacos e à cinemática do processo. Os de quinta e sexta ordem referem-se à estrutura do material da peça na qual os mecanismos físico-químicos operam em escala nanométrica (escorregamento, difusão, oxidação, tensões residuais etc.). Os diferentes desvios de ordem são sobrepostos para formar o perfil de rugosidade [Bernardos e Vosniakos, 2003; Klocke, 2011].

Os parâmetros de rugosidade expressam de maneira quantitativa os desvios de 3ª ordem [Kalpakjian e Schmid, 2010]. Dentre os diferentes parâmetros, destacam-se a rugosidade média (R_a), a rugosidade total (R_t) e a rugosidade média parcial (R_z).

- Rugosidade média: média aritmética do perfil da rugosidade determinado pelos desvios da linha central, dentro de um comprimento avaliado (Figura 2.7). É o parâmetro mais utilizado em processos de usinagem para o controle de qualidade de um produto, disponível em praticamente todos os equipamentos de medição. Contudo não pode ser o único parâmetro de avaliação do perfil devido a certas limitações [Petropoulos et al., 2010].

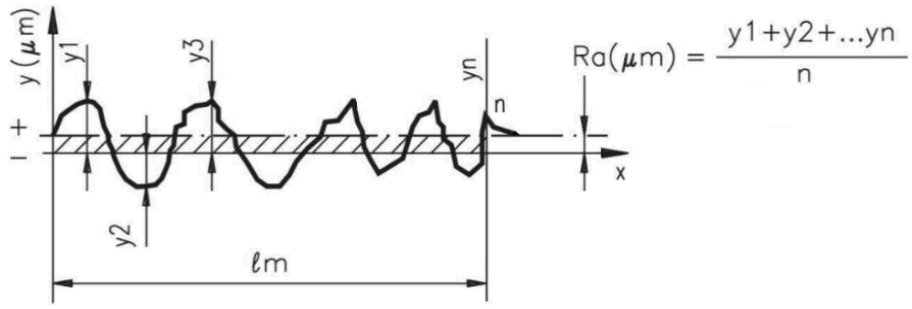


Figura 2.7 – Definição do parâmetro de rugosidade média [Petropoulos et al., 2010]

- Rugosidade média parcial: média aritmética dos valores de amplitude máxima de pico a vale (*Zi)*, medidos em cinco comprimentos de amostragem (l_e) do comprimento de medição (l_m) (Figura 2.8). O parâmetro faz uma atenuação de grandes desvios que não sejam representativos para o perfil de rugosidade [Sória, 2016]. Os valores de rugosidade R_a e R_z são complementares entre si [Machado et. al.,2015].

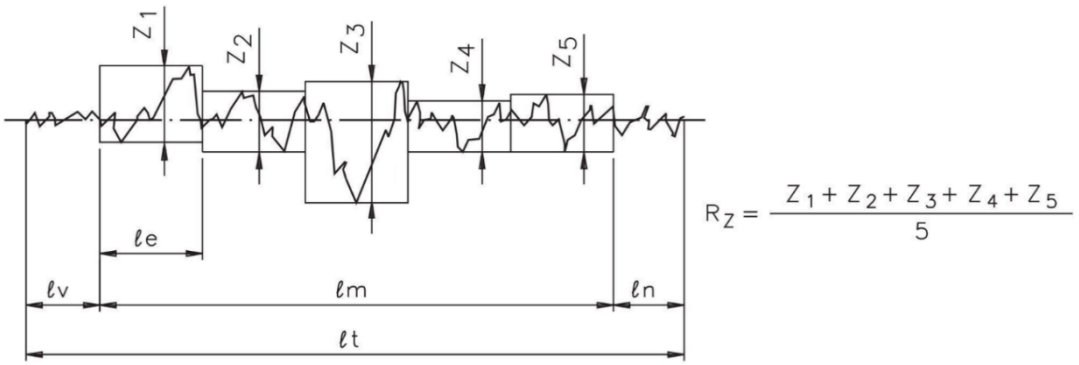


Figura 2.8 – Definição do parâmetro de rugosidade média parcial [Petropoulos et al., 2010]

- Rugosidade total: define a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo do perfil de rugosidade observado no comprimento de medição (l_m), conforme Figura 2.9**.** O parâmetro R_t é sensível a fatores do processo como os parâmetros de corte, falhas na ferramenta e os meios lubrirrefrigerantes. É utilizado junto com R_a como indicador geral [Petropoulos et al., 2010].

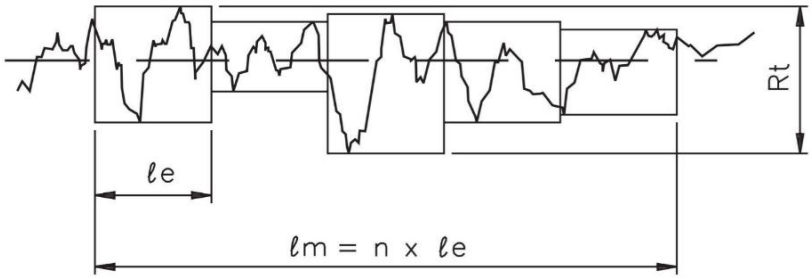


Figura 2.9 – Definição do parâmetro de rugosidade total [Petropoulos et al., 2010].

2.6 Projeto de Experimentos

As técnicas de planejamento experimental com base estatística são úteis para melhorar o desempenho de um processo de fabricação e possuem aplicação intensiva no desenvolvimento de novos processos. Através do uso de experimentos planejados, pode-se determinar um subconjunto de variáveis que possuem maior influência no desempenho do processo. Os resultados de tal experimento permitem conduzir ao melhor rendimento do processo, à redução na variabilidade do processo, à melhor obediência aos requerimentos nominais ou alvos, à redução nos tempos de projeto e desenvolvimento e à redução nos custos [Montgomery, 2004].

O delineamento de experimentos (DoE – *Design of Experiments*) pode ser interpretado como uma ferramenta que facilita a estrutura de uma sequência de testes que pode conduzir ao alcance dos objetivos estabelecidos na pesquisa. Deve-se considerar a ideia clara do objetivo do estudo, a determinação precisa de quais fatores devem ser estudados, a condução do estudo e a forma de interpretação da análise dos dados obtidos. Além disso, a aquisição de dados e construção de um modelo estatístico deve ser realizada de forma eficiente, pois envolve custos e tempo de aplicação [Montgomery, 2004]. No DoE, existem quatro termos importantes relativos à base conceitual dos testes que são empregados [Hackenhaar, 2016]:

- Parâmetros do processo: conjunto de todas as variáveis que podem ser alteradas e que podem ter influência sobre as variáveis de resposta.

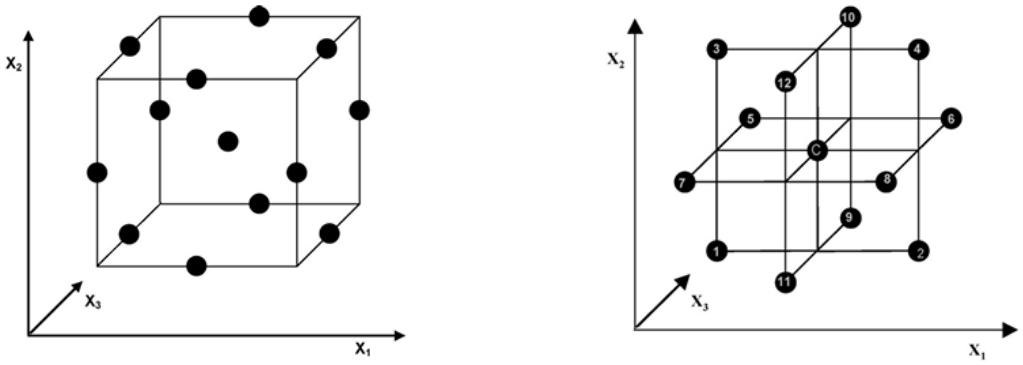
- Fatores controláveis: parâmetros definidos para serem estudados em vários níveis de resposta do experimento.
- Fatores constantes: parâmetros do experimento que são mantidos constantes, ou seja, não são avaliados no experimento.
- Fatores não controláveis (ruído): Variáveis que podem influenciar no desempenho do sistema, responsáveis pelo erro no experimento.

Quando vários fatores são potencialmente importantes, a melhor estratégia é planejar algum tipo de experimento fatorial, onde os fatores são variados conjuntamente [Montgomery, 2004]. Nesta condição, todas as combinações possíveis dos diferentes níveis de cada fator são estudadas visando verificar como a mudança de cada nível ou das combinações influencia a variável de resposta estudada [Barros et al., 2001]. No caso, a regressão múltipla pode ser usada para analisar a relação entre uma única variável dependente e as várias variáveis independentes. O objetivo dessa análise é usar as variáveis independentes cujos valores são conhecidos para prever os valores da variável dependente selecionada pelo pesquisador [Hair Jr. et al., 2009].

A metodologia da superfície de resposta (do inglês RSM: *response surface methodology*) pode ser definida como uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas com o objetivo de otimizar uma variável de resposta influenciada por muitos fatores controláveis de entrada. A MSR utiliza análise de regressão múltipla para determinar as condições otimizadas de operação em que o processo é satisfatório [Montgomery, 2004]. A visualização gráfica é apresentada por gráficos de superfície (3D) ou de contorno (2D) que mostram os fatores de entrada no estudo que afetam a variável de saída [Werkema e Aguiar, 1996].

O *Box-Behnken Design* (BBD) é um dos delineamentos mais utilizados na MSR. O BBD é um método de análise de dados que permite obter confiabilidade com reduzido número de execuções experimentais (N), comparativamente a outros projetos de experimentos. O planejamento é feito através de definição do número de variáveis (fatores) de entrada (k) influentes no processo que são avaliadas em três níveis: [baixo (–1), médio (0) e alto (+1)]. Para três fatores, o BBD pode ser representado graficamente como um cubo formado por um ponto central, três pontos centrais das arestas, e três interfaces 2^2 de ligação [Ferreira et al., 2007]. O número de execuções (N) requerido para o desenvolvimento do BBD é definido pela equação: $N = 2k\cdot(k–1) + Co$, onde k é o número de fatores e Co é o número de execuções repetidas dos fatores em nível médio (ponto central) [Ferreira et al., 2007]. Para três fatores em três níveis cada, 15 execuções são realizadas, sendo 12 delas relacionadas a combinações

dos valores de dois fatores, com um fator em nível médio, e três relacionadas ao ponto central (nível médio de cada fator) para a verificação da repetitividade do experimento [Baumgaertner Filho, 2017]. A Figura 2.10 ilustra um experimento Box-Behnken de três fatores.



(a) (b)

Figura 2.10 – Representação gráfica do experimento Box-Behnken de três fatores: (a) cubo; (b) três interfaces do projeto fatorial 2^2 [Ferreira et al., 2007]

Uma vantagem relevante do BBD é que não contém combinações nas quais todos os fatores estão simultaneamente em seus níveis mais altos ou mais baixos. Isso é útil para evitar experimentos executados em condições extremas, nas quais resultados insatisfatórios podem ocorrer [Ferreira et al., 2007]. O BBD pode ser utilizado na análise dos efeitos principais (lineares e quadráticos) dos fatores controláveis e das suas interações em relação às variáveis de resposta [Carvalho, 2018]. Considerando um esquema fatorial de k fatores, a Equação (2.7) representa a variável de resposta Y, onde X são os fatores controláveis de entrada e β os coeficientes de regressão. Na maioria dos problemas de MSR, a forma da relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. A primeira etapa na MSR é encontrar uma aproximação adequada para a relação verdadeira entre Y (variável dependente) e X (variáveis independentes). A equação que descreve o fenômeno pode ser utilizada para as funções de otimização [Montgomery, 2017].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^{k} \beta_{ij} X_i X_j \qquad (2.7)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo tem como referência o efeito de diferentes condições de corte [velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z) e profundidade de corte axial (a_p)] e meios lubrirrefrigerantes [seco (DRY), ar comprimido resfriado a −40 °C (CCA) e nanofluido Way 45-B em mínima quantidade (NMQL)] nas rugosidades (R_a, R_z, R_t) resultantes do fresamento frontal do termoplástico poli-éter-éter-cetona (PEEK).

Para uma melhor descrição da metodologia adotada, este capítulo é subdividido em 6 (seis) seções: 1) Definição do corpo de prova; 2) Especificação da máquina operatriz e da ferramenta de corte; 3) Caracterização dos meios lubrirrefrigerantes; 4) Descrição do método de aquisição de sinais de força; 5) Detalhamento do método de avaliação do acabamento superficial; 6) Apresentação do planejamento, da execução e da análise experimental.

3.1 Corpo de Prova

O corpo de prova (c.p) consiste em um bloco de TECATEC PEEK (natural), com dimensões de 61 mm x 34,5 mm x 45 mm, cedido pela empresa Ensinger®. As propriedades do material conforme fabricante encontram-se no **ANEXO II**. O bloco foi posicionado em um dispositivo utilizado para fixar o corpo de prova no dinamômetro (Figura 3.1a).

3.2 Máquina Operatriz e Ferramenta de Corte

As operações de fresamento frontal no corpo de prova foram executadas em centro de usinagem vertical ROMI Discovery 308, disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS). O centro de usinagem (Figura 3.1b) possui comando Mach 3, motor do eixo-árvore com potência de 5,5 kW e rotação máxima de 4000 rpm.

A ferramenta utilizada para execução da usinagem foi uma fresa helicoidal inteiriça de metal duro TR 4C. A ferramenta possui cobertura PVD de TiAlN (Nitreto de Titânio-Alumínio), que atribui maior resistência ao desgaste (Figura 3.2). As características dimensionais da ferramenta de corte estão apresentadas na Tabela 3.1. A escolha desta ferramenta foi baseada no objetivo de obter bom acabamento devido às seguintes características: a) fina camada de revestimento garante arestas de corte afiadas e resistentes à usinagem a seco; b) ângulo de saída elevado, o que é recomendado para a usinagem de polímeros [Stemmer, 1989]; c) quina da fresa sem arredondamento ou chanfro.



(a) (b)

Figura 3.1 – Corpo de prova e máquina ferramenta: (a) fixação de corpo de prova no dinamômetro; (b) centro de usinagem ROMI Discovery 308

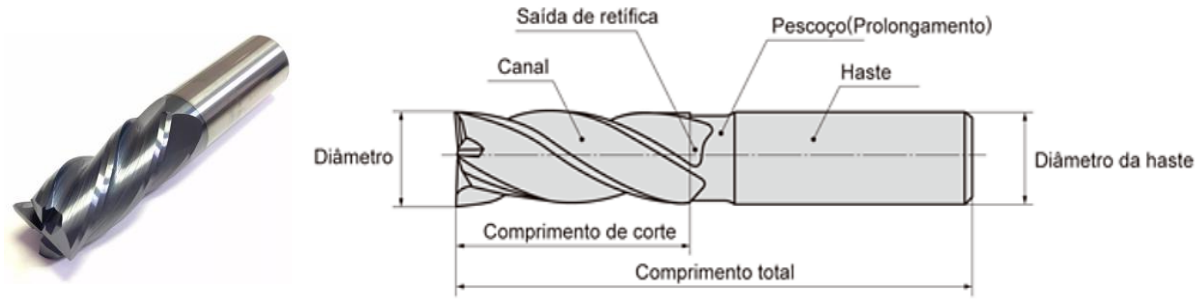


Figura 3.2 – Fresa de topo de metal duro integral com cobertura de TiAlN

Tabela 3.1 – Características dimensionais da fresa de topo TR 4C

Tipo	Topo reto
Corte	4 (quatro) arestas
Ângulo de hélice	28°
Diâmetro de corte	20mm
Diâmetro da haste	20 mm
Comprimento de corte	45 mm
Comprimento total	100 mm
Dureza	45 HRC

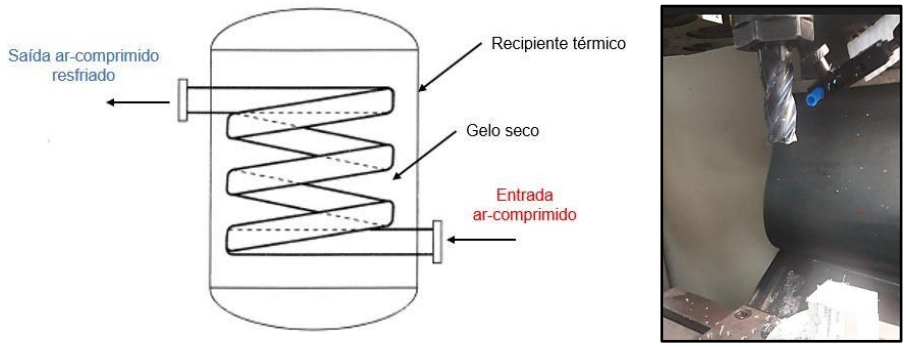
O erro de batimento foi verificado com o relógio comparador Digimess (resolução de 10 μm) a cada fixação da ferramenta na máquina. Em todos os casos, o valor manteve-se abaixo

de 30 μm. Vale salientar que a mesma fresa foi utilizada nos três experimentos (em cada meio lubrirrefrigerante), sem reafiações das arestas de corte, pois não houve quaisquer evidências de desgaste pela ação de corte do material.

3.3 Meios Lubrirrefrigerantes

Considerou-se um experimento de fresamento frontal do PEEK (15 passes) para cada meio lubrirrefrigerante avaliado: DRY, CCA e NMQL. A usinagem a seco (DRY) não aplicou quaisquer tipos de fluidos lubrirrefrigerantes.

O ar comprimido a 26 °C, com pressão de 300 kPa, foi resfriado por meio de sua passagem em um tubo na forma de serpentina recoberta com dióxido de carbono no estado sólido (gelo seco), confinado em um recipiente térmico hermeticamente fechado (Figura 3.3a), reduzindo a temperatura do ar para –40 °C. A aplicação do ar comprimido refrigerado (CCA) foi feita através de uma mangueira com 6 mm de diâmetro devidamente posicionada para que o fluido fosse direcionado para as arestas da fresa (Figura 3.3b).



(a) (b)

Figura 3.3 – Geração de ar comprimido refrigerado (CCA): (a) sistema de refrigeração com gelo seco; (b) aplicação do CCA a –40 °C

O nanofluido (NF) utilizado foi o Way 45-B (cedido pela Bondmann Química), caracterizado pela adição de nanopartículas esféricas de prata metálica a um fluido lubrirrefrigerante sintético à base de água. Contém ainda aditivos EP e alcalinizantes. Este NF possui aspecto esverdeado (Figura 3.4a), densidade de 1,02 a 1,06 g/cm^3, e pH de 9,5 a 10,5. O Way 45-B, sem diluição, foi aplicado em mínima quantidade (NMQL) na forma de spray através do Nebulizador IV Quimatic-Tapmatic (Figura 3.4b)**,** a uma vazão de 90 ml/h (fluxo medido através de uma pipeta graduada com marcação do tempo de enchimento) e uma pressão de 300 kPa. O bico aspersor foi direcionado para as arestas da fresa (Figura 3.4c).



(a) (b) (c)

Figura 3.4 – Aplicação do NMQL: (a) Nanofluido; (b) Nebulizador IV; (c) Posição do bico

3.4 Aquisição dos Sinais de Força

A aquisição dos sinais de força nas direções ortogonais (F_x, F_y, F_z) foi executada utilizando-se o Sistema Monitor disponível no LAUS-UFRGS composto por um dinamômetro piezelétrico Kistler 9272 (Figura 3.5a), um amplificador de carga Kistler 5070A10100 (Figura 3.5b), uma placa de aquisição de sinais Measurement Computing PCIM-DAS 1602/16, um computador dedicado com software LabVIEW 9.0 instalado e cabos de conexão. A taxa de aquisição de sinais utilizada foi de 1,0 kHz.



(a) (b)

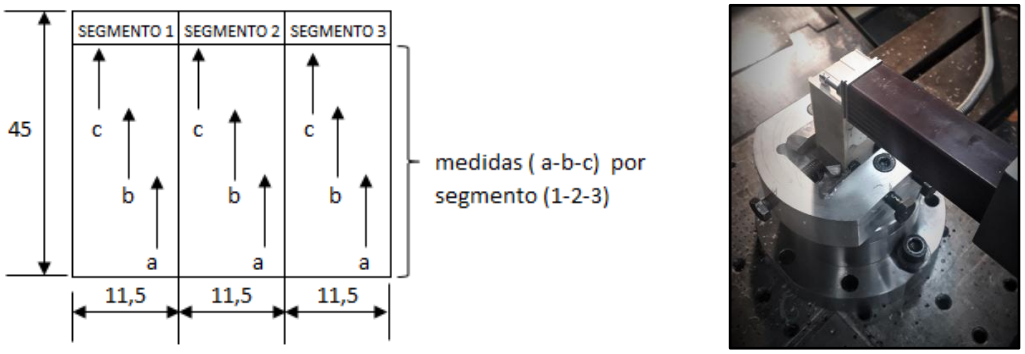
Figura 3.5 – Medição e condicionamento de sinais Kistler: (a) dinamômetro piezelétrico; (b) amplificador de carga

Com a aquisição das componentes ortogonais da força de usinagem, a força passiva (F_p) e a força ativa (F_a) foram calculadas a partir das equações (2.4) e (2.6), respectivamente.

3.5 Avaliação do Acabamento Superficial

A cada três passes, os parâmetros de rugosidade R_a (rugosidade média), R_z (rugosidade média parcial) e R_t (rugosidade total) resultantes do fresamento do PEEK foram medidos sem retirar o corpo de prova da máquina. As medições foram efetuadas utilizando o rugosímetro

portátil Mitutoyo Surftest SJ-201P disponível no LAUS-UFRGS (Figura 3.6b). O instrumento possui resolução de 0,01 μm e agulha de diamante com raio de 5 μm. Essas medições consideraram um comprimento de amostragem l_e = 0.8 mm e um comprimento de avaliação $l_m = 5 \cdot l_e$ = 4.0 mm. De acordo com a norma DIN EN ISO 4287, esses comprimentos para perfis de rugosidade não-periódicos são definidos para as faixas $0{,}1 < R_a \leq 2{,}0$ μm e $0{,}5 < R_z \leq 10$ μm. O software dedicado SJ-Tools auxiliou na aquisição dos dados e na geração dos perfis de rugosidade para cada comprimento de avaliação. Em cada segmento (amostra) usinado, as rugosidades R_a, R_z e R_t foram medidas em três pontos distintos (a, b, c), conforme mostra a Figura 3.6a. Por fim, foram calculadas as médias aritméticas dos três resultados medidos em cada segmento, totalizando 45 medições para cada um dos três experimentos realizados.



(a) (b)

Figura 3.6 – Aquisição de dados de rugosidade: (a) dimensões das amostras usinadas (em mm); (b) procedimento de medição com o rugosímetro

As texturas das superfícies usinadas também foram analisadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando o microscópio Zeiss Evo MA10 disponível no Centro de Microscopia e Microanálise (CMM BR-Sul) da UFRGS. Cada amostra foi cortada, limpa e seca antes da captura da imagem. O metalizador Bal-tec SCD 050 foi utilizado para criar uma película em ouro nas superfícies, melhorando assim a qualidade da imagem.

3.6 Planejamento, Execução e Análise Experimental

Considerando o DoE através do Box-Behnken Design (BBD), o experimento consistiu em realizar 15 passes de 45 mm (três por camada) com cada meio de lubrirrefrigeração. Três condições de corte (v_c, f_z, a_p) foram testadas em três níveis cada, de acordo com a Tabela 3.2.

A profundidade de corte radial foi mantida constante (a_e = 11,5 mm), para manter a largura de segmento igual durante todos os testes.

Tabela 3.2 – Níveis dos fatores de entrada do BBD

Fatores Controláveis	Notação	Unidade	Níveis		
			Baixo (–1)	Médio (0)	Alto (+1)
Velocidade de corte	v_c	m/min	150	200	250
Avanço por dente	f_z	mm/dente	0,050	0,075	0,100
Profundidade de corte axial	a_p	mm	0,5	0,8	1,1

Cada passe foi realizado com uma combinação de parâmetros (Tabela 3.3) e gerou um segmento (ou amostra) com alturas diferentes em função de a_p, conforme mostra a Figura 3.7. Como citado anteriormente, a mesma ferramenta foi utilizada nos três experimentos (fresamento a seco, com CCA e com NMQL), sem reafiações das arestas de corte, pois não foi evidenciado desgaste na usinagem do material.

Tabela 3.3 – Ordem e configuração dos passes

Passe (amostra)	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)
1	150	0,075	1,1
2*	200	0,075	0,8
3	150	0,075	0,5
4	250	0,075	1,1
5	150	0,050	0,8
6	250	0,075	0,5
7	200	0,050	1,1
8*	200	0,075	0,8
9	200	0,050	0,5
10	200	0,100	1,1
11	250	0,050	0,8
12	200	0,100	0,5
13	150	0,100	0,8
14*	200	0,075	0,8
15	250	0,100	0,8

*Passes de nível central definidos pelo BBD nos pontos médios (0)

A análise de variância (ANOVA) foi realizada utilizando o software Minitab® 18 para quantificar os efeitos lineares e quadráticos de cada fator controlável e suas interações nas variáveis resposta (R_a, R_z *e* R_t). Por fim, três passes de validação foram realizados para a comparação entre as rugosidades mínimas de cada modelo e as otimizadas.

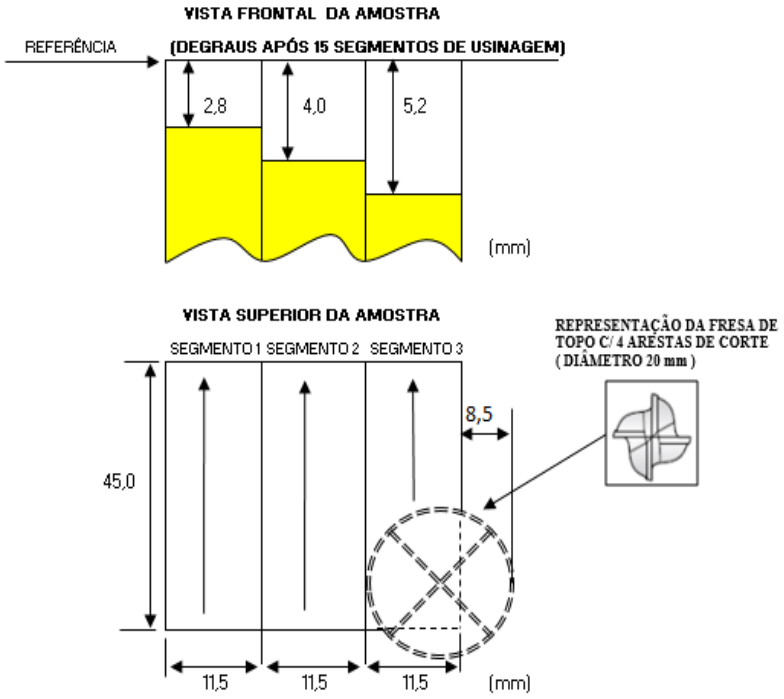


Figura 3.7 – Usinagem das amostras (segmentos)

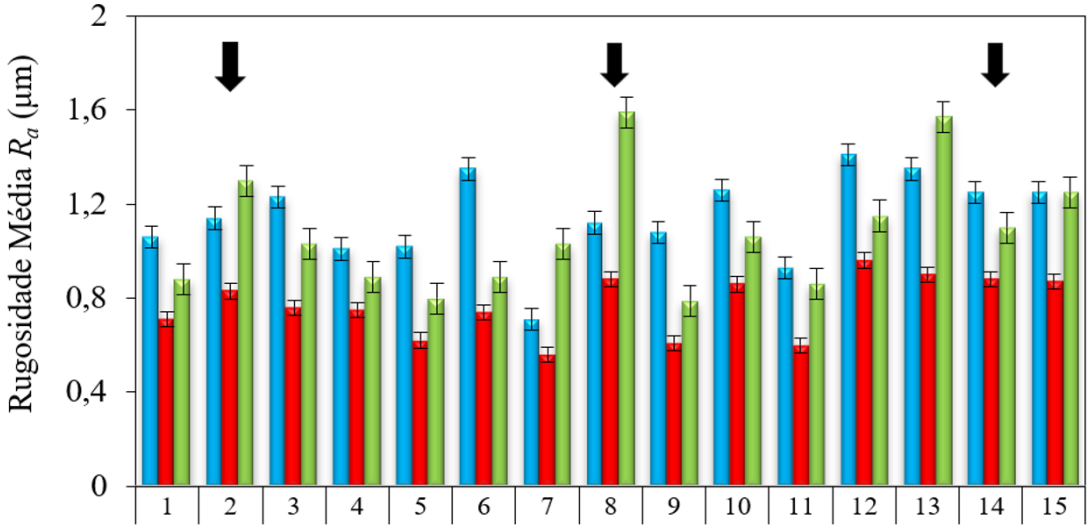
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Acabamento da Superfície Usinada

As análises de rugosidades, como variáveis de resposta, foram baseadas nos segmentos (amostras) usinados, tendo como referência a combinação entre os parâmetros de usinagem e os meios lubrirrefrigerantes.

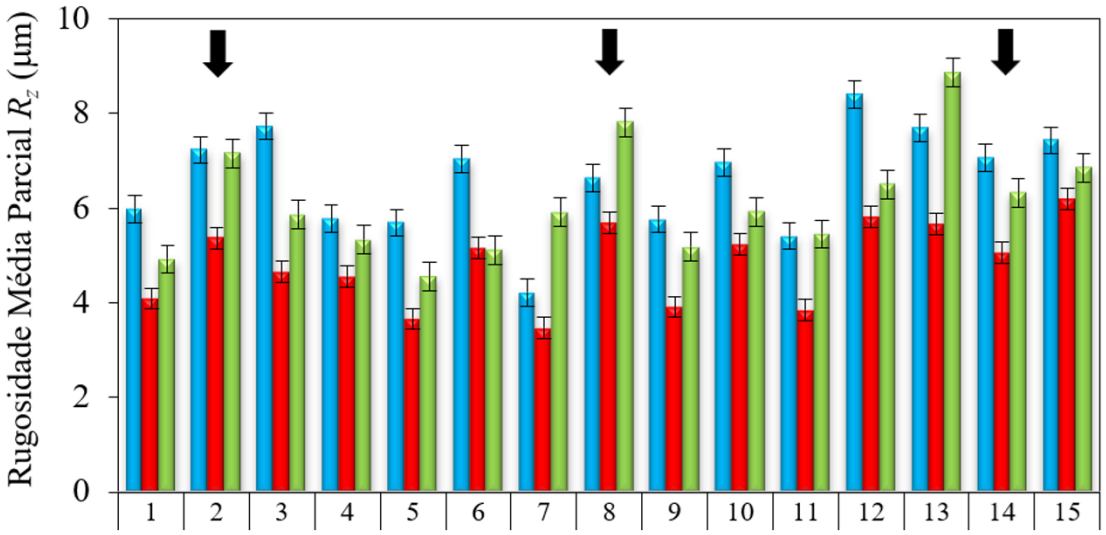
4.1.1 Análises de rugosidades

Os dados de rugosidade obtidos para rugosidade média (R_a), rugosidade média parcial (R_z) e rugosidade total (R_t) são apresentados conforme a Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3, respectivamente, e são relativos aos meios lubrirrefrigerantes (CCA, DRY e NMQL) e às combinações de parâmetros de corte (v_c, f_z, a_p) de cada passe conforme Tabela 3.3. As variações dos três valores medidos (a, b, c) são representadas pelas barras de erros determinadas pelo Microsoft Excel. As setas representam a indicação dos passes de controle (2*, 8* e 14*). As diferenças das médias encontradas em R_a, R_z *e* R_t, para cada condição observada sugere que possivelmente fatores como a temperatura e a inclusão de nanopartículas no fluido de corte, podem ter influenciado o acabamento da superfície.



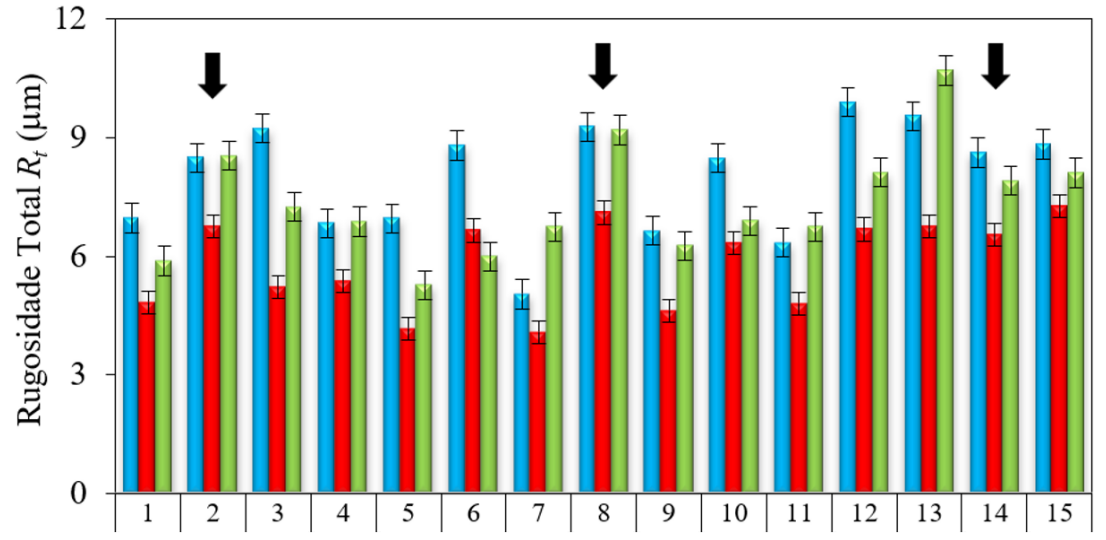
Passe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v_c (m/min)	150	200	150	250	150	250	200	200	200	200	250	200	150	200	250
f_z (mm/z)	0,075	0,075	0,075	0,075	0,05	0,075	0,05	0,075	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1	0,075	0,1
a_p (mm)	1,1	0,8	0,5	1,1	0,8	0,5	1,1	0,8	0,5	1,1	0,8	0,5	0,8	0,8	0,8

Figura 4.1 – Valores de rugosidade média (R_a) resultantes com base nas combinações por passe entre dados de corte e meios lubrirrefrigerantes.



Passe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v_c (m/min)	150	200	150	250	150	250	200	200	200	200	250	200	150	200	250
f_z (mm/z)	0,075	0,075	0,075	0,075	0,05	0,075	0,05	0,075	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1	0,075	0,1
a_p (mm)	1,1	0,8	0,5	1,1	0,8	0,5	1,1	0,8	0,5	1,1	0,8	0,5	0,8	0,8	0,8

Figura 4.2 – Valores de rugosidade média parcial (R_z) resultantes com base nas combinações por passe entre dados de corte e meios lubrirrefrigerantes.



Passe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v_c (m/min)	150	200	150	250	150	250	200	200	200	200	250	200	150	200	250
f_z (mm/z)	0,075	0,075	0,075	0,075	0,05	0,075	0,05	0,075	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1	0,075	0,1
a_p (mm)	1,1	0,8	0,5	1,1	0,8	0,5	1,1	0,8	0,5	1,1	0,8	0,5	0,8	0,8	0,8

Figura 4.3 – Valores de rugosidade total (R_t) resultantes com base nas combinações por passe entre dados de corte e meios lubrirrefrigerantes.

Os resultados dos testes podem ser referenciados segundo a avaliação do acabamento superficial para cada meio lubrirrefrigerante, ou seja, pela média de rugosidade (R_a) encontrada. Conforme a norma NBR 8404 (1984) o intervalo de valores de rugosidade define a classe de

rugosidade. Desta forma, a média dos valores de R_a para cada meio lubrirrefrigerante foi 0,77 µm (DRY), 1,14 µm (CCA) e 1,08 µm (NMQL). Consequentemente, as classes de rugosidade foram N5 (DRY) e N6 (NMQL e CCA). Kalpakjian e Schmid (2010) consideram que a obtenção da classe N5 ($0,4 < R_a \leq 0,8$ µm) no fresamento frontal pode ser considerada de acabamento fino e a classe N6 ($0,8 < R_a \leq 1,6$ µm) de acabamento comum. A Tabela 4.1 mostra uma análise comparativa entre os menores e maiores valores de rugosidade gerados no fresamento frontal do PEEK aplicando os diferentes lubrirrefrigerantes.

Tabela 4.1 – Comparação entre os passes de menor e maior valor de rugosidade para cada meio lubrirrefrigerante.

	Meios Lubrirrefrigerantes								
	CCA			**DRY**			**NMQL**		
	Menor valor (rugosidade)	Maior valor (rugosidade)	Diferença (%)	Menor valor (rugosidade)	Maior valor (rugosidade)	Diferença (%)	Menor valor (rugosidade)	Maior valor (rugosidade)	Diferença (%)
Ra (µm)	**Passe 7**	**Passe 12**		**Passe 7**	**Passe 15**		**Passe 5**	**Passe 13**	
	0,71	**1,41**	+98%	**0,56**	**0,87**	+55%	**0,80**	**1,57**	+96%
v_c (m/min)	200	200	0%	200	250	+25%	150	150	+0%
a_p (mm)	1,1	0,5	–54%	1,1	0,8	–27%	0,8	0,8	+0%
f_z (mm/dente)	0,05	0,1	+100%	0,05	0,1	+100%	0,05	0,1	+100%
Rz (µm)	**Passe 7**	**Passe 12**		**Passe 7**	**Passe 15**		**Passe 5**	**Passe 13**	
	4,22	**8,4**	+99%	**3,46**	**6,19**	+79%	**4,56**	**8,86**	+94%
v_c (m/min)	200	200	0%	200	250	+25%	150	150	0%
a_p (mm)	1,1	0,5	–54%	1,1	0,8	–27%	0,8	0,8	0%
f_z (mm/dente)	0,05	0,1	+100%	0,05	0,1	+100%	0,05	0,1	+100%
Rt (µm)	**Passe 7**	**Passe 12**		**Passe 7**	**Passe 15**		**Passe 5**	**Passe 13**	
	5,04	**9,89**	+96%	**4,09**	**7,26**	+77,5%	**5,27**	**10,69**	+102%
v_c (m/min)	200	200	0%	200	250	+25%	150	150	0%
a_p (mm)	1,1	0,5	–54%	1,1	0,8	–27%	0,8	0,8	0%
f_z (mm/dente)	0,05	0,1	+100%	0,05	0,1	+100%	0,05	0,1	+100%

Observa-se que para a condição CCA a amostra 7 apresentou as menores rugosidades [Ra (0,71 µm), R_z (4,22 µm) e R_t (5,04 µm)], em comparação com a amostra 12 que apresentou as maiores [R_a (1,41 µm), R_z (8,4 µm) e R_t (9,89 µm)]. A velocidade de corte (v_c) permaneceu constante, a profundidade de corte axial (a_p) foi reduzida em 54% e o avanço por dente (f_z) foi aumentado em 100%. O parâmetro mais evidente nas diferenças de rugosidade foi f_z, que teve o nível alterado de baixo (0,05 mm/dente) para alto (0,10 mm/dente), gerando a mais alta

rugosidade em R_a, R_z e R_t (aumento de 98%, 99% e 96% respectivamente). Observa-se que o valor de f_z em nível baixo produziu as menores rugosidades (passe 7).

Na condição DRY, o passe 7 resultou na menor rugosidade medida [R_a (0,56 μm), R_z (3,46 μm) e R_t (4,09 μm)] em comparação com o passe que produziu as maiores rugosidades que foi a amostra 15 [R_a (0,87 μm), R_z (6,19 μm) e R_t (7,26μm)]. O avanço por dente (f_z) foi incrementado em 100%, correspondendo a um aumento da rugosidade de 55% em R_a, 79% em R_z e 77,5% em R_t. O aumento da velocidade de corte (v_c) em 25% e a redução da profundidade de corte axial (a_p) em 27%, caracterizadas no passe 15 não contribuíram para melhorar o acabamento. Novamente, o aumento do avanço por dente (f_z), foi o fator mais significativo.

A condição NMQL produziu a menor rugosidade [R_a (0,80 μm), R_z (4,56 μm) e R_t (5,27 μm)] na amostra 5 em comparação com a maior [R_a (1,57 μm), R_z (8,86 μm) e R_t (10,69 μm)] na amostra 13. A velocidade de corte (v_c) e a profundidade de corte axial (a_p) permaneceram constantes, e o avanço por dente (f_z) foi aumentado em 100%; nesta situação, as rugosidades aumentaram 96% (R_a), 94% (R_z) e 102% (R_t). O f_z em nível baixo produziu as menores rugosidades R_a, R_z e R_t no passe 5.

Em uma interpretação abrangente, nota-se que a variação de v_c não influenciou as situações de menor para o maior valor de rugosidade. Isso pode ser verificado nos passes 1 e 4. A redução de a_p na usinagem sob condições CCA e DRY não indica ter afetado significativamente os valores de rugosidade gerados. O aumento de f_z, em todas as condições, mostra uma contribuição significativa para uma rugosidade mais elevada.

Izamshah et al. (2015) citam que a combinação de alta v_c com baixo f_z no fresamento frontal pode reduzir os valores de rugosidade conforme observado no passe 11 (Tabela 3.3) e a redução de f_z também contribui para a redução da rugosidade mesmo mantendo a_p fixo (passe 2 e 5). Estas características foram constatadas no presente estudo, pois em todas as condições lubrirrefrigerantes com maior rugosidade, o f_z foi aumentado. Além disso, os autores consideraram que o aumento de a_p tem pouca influência na redução da rugosidade.

4.1.2 Análises estatísticas

A verificação estatística da estabilidade do processo e a textura da superfície usinada foram avaliadas tendo como estimador a variância (s^2). Os valores de rugosidade foram medidos nos passes com parâmetros em nível médio (2, 8 e 14) para cada condição lubrirrefrigerante, considerando a rugosidade média (R_a), a rugosidade média parcial (R_z) e a rugosidade total (R_t) para verificar o perfil de forma geral (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Variação estatística percentual de rugosidade considerando os passes 2, 8 e 14.

Rugosidade	Condição Lubrirrefrigerante		
	CCA (–40 °C)	DRY	NMQL
R_a	0,49%	0,08%	6,07%
R_z	9,56%	9,92%	55,03%
R_t	17,46%	7,75%	40,96%

A condição DRY foi a mais estável comparativamente aos outros processos. Os valores de variação de R_t foram relativamente altos em CCA e NMQL, o que pode sugerir a interferência de fatores não controláveis intrínsecos ao experimento. Izamsha et al. (2013) explica que polímeros são relativamente macios quando comparados a aços ou ligas metálicas. Essa característica pode criar problemas em operações de corte, rebarbação e limpeza.

Com o objetivo de investigar os fatores controláveis e suas interações, foi aplicada a ANOVA, permitindo avaliar seus efeitos em cada variável resposta. Fatores de entrada com intervalo de confiança de 95% (valor-p $\leq 0,05$) foram considerados como significativos (grafados em negrito), enquanto $0,05 <$ valor-p $\leq 0,10$ (intervalo de confiança entre 90 e 95%) foram considerados “parcialmente” significativos (negrito em azul). A Tabela 4.3 apresenta os valores-p obtidos para a rugosidade média (R_a) em cada condição de lubrirrefrigeração, seguidos de seus respectivos percentuais de contribuição.

Tabela 4.3 – ANOVA para R_a sob diferentes condições lubrirrefrigerantes.

Fator	**Condição de Lubrirrefrigeração**					
	CCA		DRY		NMQL	
	Valor-p	Cont. (%)	Valor-p	Cont. (%)	Valor-p	Cont. (%)
v_c	0,894	0,380	**0,027**	0,050	0,223	2,090
f_z	0,339	61,190	**0,009**	80,010	0,208	32,950
a_p	0,875	27,730	**0,064**	2,010	0,111	0,000
v_c x v_c	0,846	0,100	**0,014**	4,730	0,224	6,350
f_z x f_z	0,326	1,170	**0,022**	4,030	0,582	0,740
a_p x a_p	0,700	0,170	**0,014**	6,240	**0,058**	27,390
v_c x f_z	0,946	0,010	0,881	0,010	0,395	3,960
v_c x a_p	0,282	1,510	0,388	0,400	0,729	0,620
f_z x a_p	0,180	2,530	0,467	0,280	0,456	2,990
R^2	94,80%		97,76%		77,08%	

Observa-se que os efeitos linear e quadrático do avanço por dente (f_z) e da velocidade de corte (v_c) são significativos (valor-p ≤ 0,05) sobre R_a na condição DRY. O efeito quadrático da profundidade de corte axial (a_p) também é significativo (intervalo de confiança de 98,6%), enquanto o efeito linear é parcialmente significativo (intervalo de confiança de 93,6%). O parâmetro com maior influência é f_z (84,04%), seguido por a_p (8,25%) e por v_c (4,78%). As interações entre os fatores e o efeito das demais condições lubrirrefrigerantes (CCA e NMQL) não são significativas sobre a rugosidade média. Entretanto, o efeito quadrático de a_p é parcialmente significativo (intervalo de confiança de 94,2%) sobre R_a na condição NMQL.

A Tabela 4.4 descreve a ANOVA para a rugosidade média parcial (R_z). Nota-se que o avanço por dente (f_z) apresenta efeito linear significativo (valor-p ≤ 0,05) e efeito quadrático parcialmente significativo (0,05 < valor-p ≤ 0,10) sobre R_z nas condições CCA e DRY. O efeito quadrático da profundidade de corte axial (a_p) afeta significativamente R_z nas condições DRY e NMQL, enquanto o efeito linear de a_p tem efeito significativo somente na condição DRY. Além disso, o efeito quadrático da velocidade de corte (v_c) é parcialmente significativo (intervalo de confiança de 91,8%) na condição DRY. Novamente, o parâmetro com maior influência é f_z, seguido por a_p e por v_c. Por fim, o efeito linear de v_c e as interações entre os fatores não são significativos sobre R_z para todas as condições lubrirrefrigerantes.

Tabela 4.4 – ANOVA para R_z sob diferentes condições lubrirrefrigerantes.

Fator	**Condição de Lubrirrefrigeração**					
	CCA		DRY		NMQL	
	Valor-p	Cont. (%)	Valor-p	Cont. (%)	Valor-p	Cont. (%)
v_c	0,999	1,54	0,112	3,30	0,180	1,37
f_z	**0,040**	64,87	**0,050**	76,19	0,203	32,26
a_p	0,851	26,38	**0,034**	5,68	0,120	0,22
v_c x v_c	0,698	0,01	**0,082**	1,50	0,223	5,53
f_z x f_z	**0,069**	2,47	**0,076**	1,87	0,915	0,03
a_p x a_p	0,125	1,77	**0,009**	8,60	**0,046**	26,51
v_c x f_z	0,987	0,00	0,482	0,29	0,151	10,98
v_c x a_p	0,458	0,34	0,934	0,00	0,531	1,73
f_z x a_p	0,873	0,01	0,789	0,04	0,479	2,24
R^2	97,39%		97,48%		80,87%	

Observa-se que existe uma influência considerável dos fatores controláveis avanço por dente (f_z) e profundidade de corte (a_p), principalmente na condição DRY. Na condição NMQL, f_z não apresentou efeito significativo, possivelmente devido às variáveis de resposta

(rugosidades) terem sido geradas com a interferência das nanoesferas de prata e contribuindo para um atrito maior entre peça e ferramenta.

A Tabela 4.5 apresenta a ANOVA para a rugosidade total (R_t).

Tabela 4.5 – ANOVA para R_t sob diferentes condições lubrirrefrigerantes.

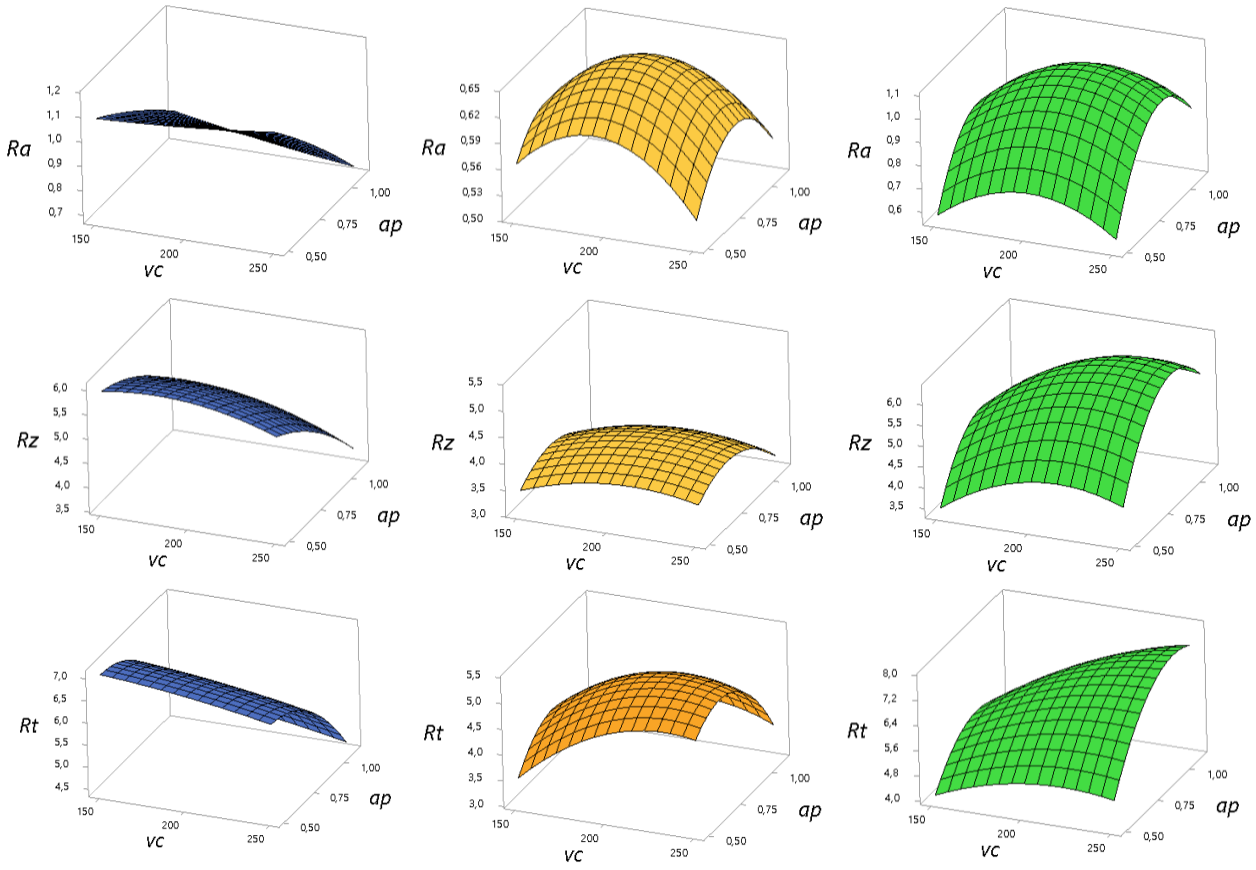
Fator	**Condição de Lubrirrefrigeração**					
	CCA		DRY		NMQL	
	Valor-p	Cont. (%)	Valor-p	Cont. (%)	Valor-p	Cont. (%)
v_c	0,532	1,590	**0,012**	6,910	0,154	0,820
f_z	**0,025**	61,500	**0,009**	62,830	**0,087**	34,260
a_p	0,282	23,250	**0,006**	4,600	0,115	0,660
v_c x v_c	0,385	0,200	**0,020**	3,200	0,197	4,210
f_z x f_z	**0,032**	4,980	**0,011**	5,550	0,725	0,050
a_p x a_p	**0,040**	5,040	**0,003**	13,460	**0,029**	24,760
v_c x f_z	0,921	0,010	0,837	0,020	**0,067**	14,650
v_c x a_p	0,743	0,080	0,165	1,160	0,250	4,540
f_z x a_p	0,835	0,030	0,746	0,050	0,368	2,630
R^2	96,68%		97,79%		86,59%	

Percebe-se que o efeito linear do avanço por dente (f_z) e o efeito quadrático da profundidade de corte axial (a_p) afetam a rugosidade total (R_t) para todas as condições lubrirrefrigerantes (apenas f_z com NMQL é parcialmente significativo, com intervalo de confiança de 91,3%). O efeito linear de a_p foi significativo apenas na condição DRY; o mesmo vale para os efeitos linear e quadrático da velocidade de corte (v_c). O efeito quadrático de f_z afeta de maneira significativa os valores de R_t nas condições CCA e DRY, enquanto a combinação v_c x f_z apresenta efeito parcialmente significativo (intervalo de confiança de 93,3%) sobre R_t em NMQL. Constata-se que a diminuição do avanço por dente (f_z) e o aumento da profundidade de corte axial (a_p) favorecem a obtenção de um bom acabamento da superfície do PEEK obtida por fresamento frontal para todas as condições lubrirrefrigerantes. A comparação entre as amostras 4 e 15 pode referenciar estas alterações de rugosidade.

Os gráficos de superfície para as rugosidades R_a, R_z e R_t obtidas em cada condição lubrirrefrigerante (CCA, DRY e NMQL) são mostrados pela Figura 4.4, considerando o nível mais baixo de avanço por dente (f_z = 0,05 mm/dente), pois este é o parâmetro mais significativo pela ANOVA e que resulta em maior qualidade de superfície à medida que seu valor é reduzido.

No fresamento com CCA, as rugosidades R_a e R_z foram pouco sensíveis à variação da velocidade corte (v_c), mas muito afetadas pela profundidade de corte axial (a_p), ou seja, para

nível alto de a_p foram obtidas menores rugosidades. Comparando o passe 7 (a_p = 1,1 mm) e o passe 9 (a_p = 0,5 mm), para o mesmo avanço por dente (0,05 mm/dente) e mesma velocidade de corte (200 m/min), foram observadas rugosidades superiores para R_a (+52,11%) e para R_z (+36,5%) na amostra com menor a_p. Por fim, o comportamento de R_t foi similar ao de R_z. Segundo Bertolini et al. (2025), o aumento da profundidade de corte possibilita a obtenção de superfícies com menor rugosidade na usinagem criogênica. Ocorre uma redução na altura dos picos à medida que a profundidade de corte é aumentada e também a quebra do cavaco pode ser atribuída a presença sinérgica de baixas temperaturas e altas tensões devido a uma maior taxa de remoção de material.



(a) (b) (c)

Figura 4.4 – Gráficos de superfície das rugosidades R_a, R_z e R_t utilizando f_z = 0,05 mm/dente: (a) CCA; (b) DRY; (c) NMQL

Na condição DRY, nota-se uma relação mais definida com a velocidade de corte, ou seja, aumentando v_c e mantendo a profundidade de corte em nível alto, os valores de R_a e R_z tendem a diminuir. Para a_p em nível baixo e v_c em nível alto, baixos valores de rugosidade podem ser alcançados, conforme observado na amostra 11; contudo, pode não viabilizar a

produtividade necessária. O valor de R_t foi sensível ao aumento de v_c (amostra 15), variando positivamente (menor rugosidade) como aumento de a_p. As diferentes rugosidades superficiais em várias velocidades de corte podem ser atribuídas aos diferentes comportamentos viscoelásticos do PEEK na condição a seco (Betolini et al.,2025), ou seja, velocidades mais elevadas aproximam o polímero da temperatura de transição vítrea (Tg), ocorrendo uma redução da rigidez e induzindo uma menor rugosidade.

A condição NMQL mostra que a elevação da profundidade de corte axial teve influência significativa na alteração das rugosidades. No caso, o aumento de a_p causou o aumento de R_a e R_z. Nota-se ainda que os maiores valores de R_t são gerados em altas velocidades e altas profundidades de corte axiais. Não foram encontrados trabalhos precedentes para fundamentar este comportamento. Hipoteticamente, é possível admitir que o nanofluido possa ter interferido no processo pois, de acordo com Benedicto et al., (2017), os picos e vales de rugosidade podem ser preenchidos com as nanopartículas, favorecendo a diminuição do atrito e o corte do material.

4.1.3 Avaliação dos perfis de rugosidade

Os perfis de rugosidade relativos às amostras (passes) com menor e maior R_a para cada condição lubrirrefrigerante são ilustrados na Figura 4.5 e na Figura 4.6, respectivamente.

Os perfis com menor rugosidade foram obtidos com f_z = 0,05 mm/dente. O perfil da amostra 7 com CCA (Figura 4.5a), que possui R_a = 0,71 μm (média), pode ter sido influenciado pela baixa temperatura (–40 °C). Nessa condição, o PEEK exposto constantemente ao ar refrigerado possivelmente perdeu ductilidade, aumentando sua rigidez e oferecendo mais resistência ao corte. O perfil também mostra uma considerável amplitude de picos e vales, o que pode sugerir que a superfície possui arranhões ou pontos em vazio devido a possíveis arrancamentos de material. O perfil da amostra 7 na condição DRY (Figura 4.5b) apresenta R_a = 0,56 μm (média) e mostra a condição da superfície mais uniforme, com menores amplitudes entre picos e vales, possivelmente obtido por um corte mais suave devido a seu comportamento viscoelástico em temperatura ambiente. O perfil da amostra 5 produzido com NMQL (Figura 4.5c) teve R_a = 0,80 μm (média), observa-se maior frequência de vales profundos e uma distribuição pouco uniforme, possivelmente devido à interação entre a superfície da peça, as nano partículas do fluido e a ferramenta, resultando em efeito abrasivo.

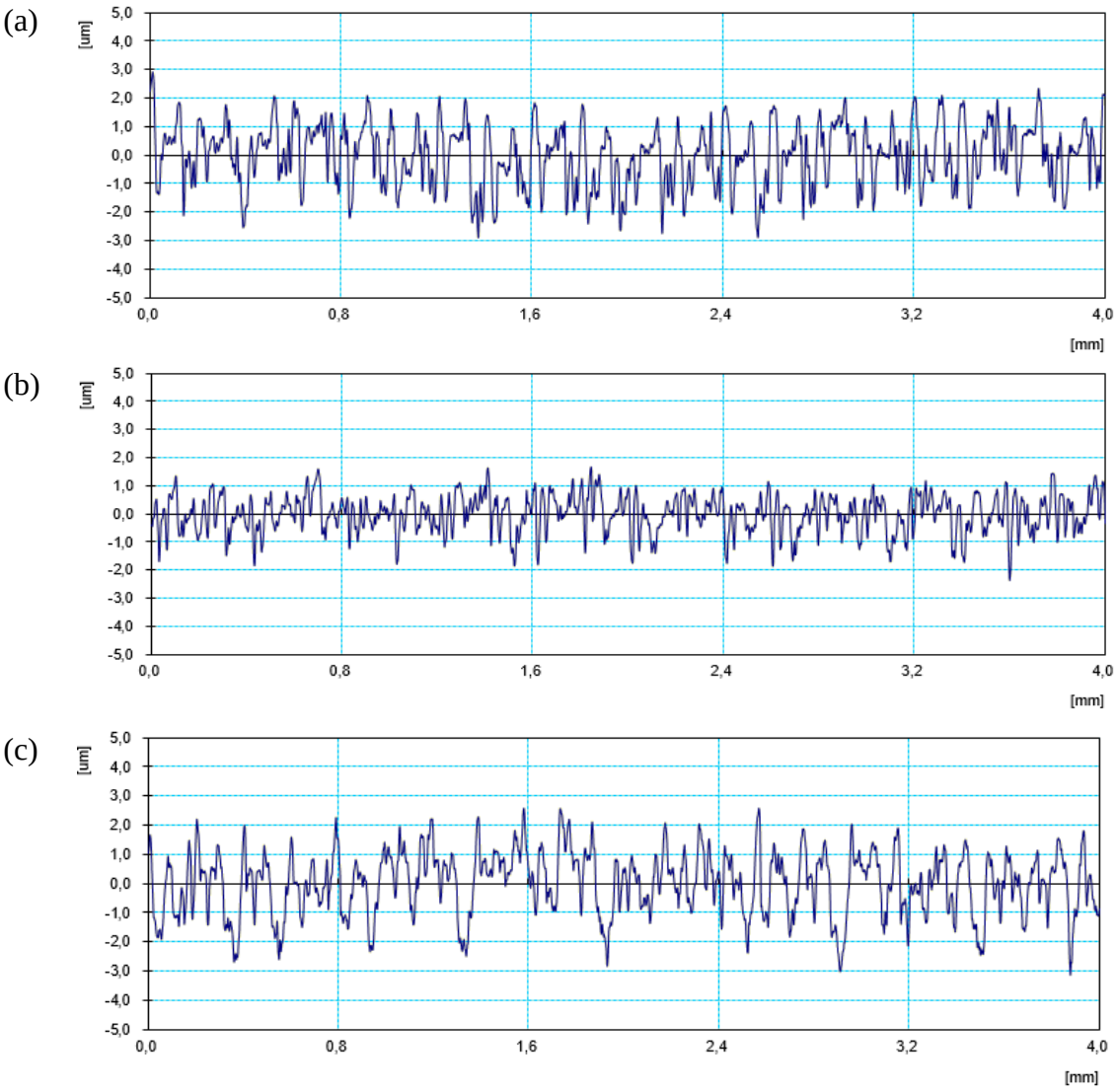


Figura 4.5 – Perfis de rugosidade das superfícies com menores valores de R_a em l_m = 4 mm: (a) amostra 7 com CCA; (b) amostra 7 com DRY; (c) amostra 5 com NMQL

Os perfis das amostras com maior R_a foram gerados com f_z = 0,10 mm/dente. O perfil da amostra 15 na condição DRY (Figura 4.6b) produziu o menor valor de R_a (0,87 µm) (média) em comparação às condições CCA (amostra 12 com R_a = 1,41 µm, Figura 4.6a) e NMQL (amostra 13 com R_a = 1,57 µm, Figura 4.6c). Nas três situações, as amplitudes de pico a vale aumentaram com o incremento de f_z, e a distribuição do perfil não teve um comportamento uniforme. Contudo, a amostra na condição DRY ainda apresentou uma textura mais próxima àquelas com bom acabamento, representado um processo mais estável.

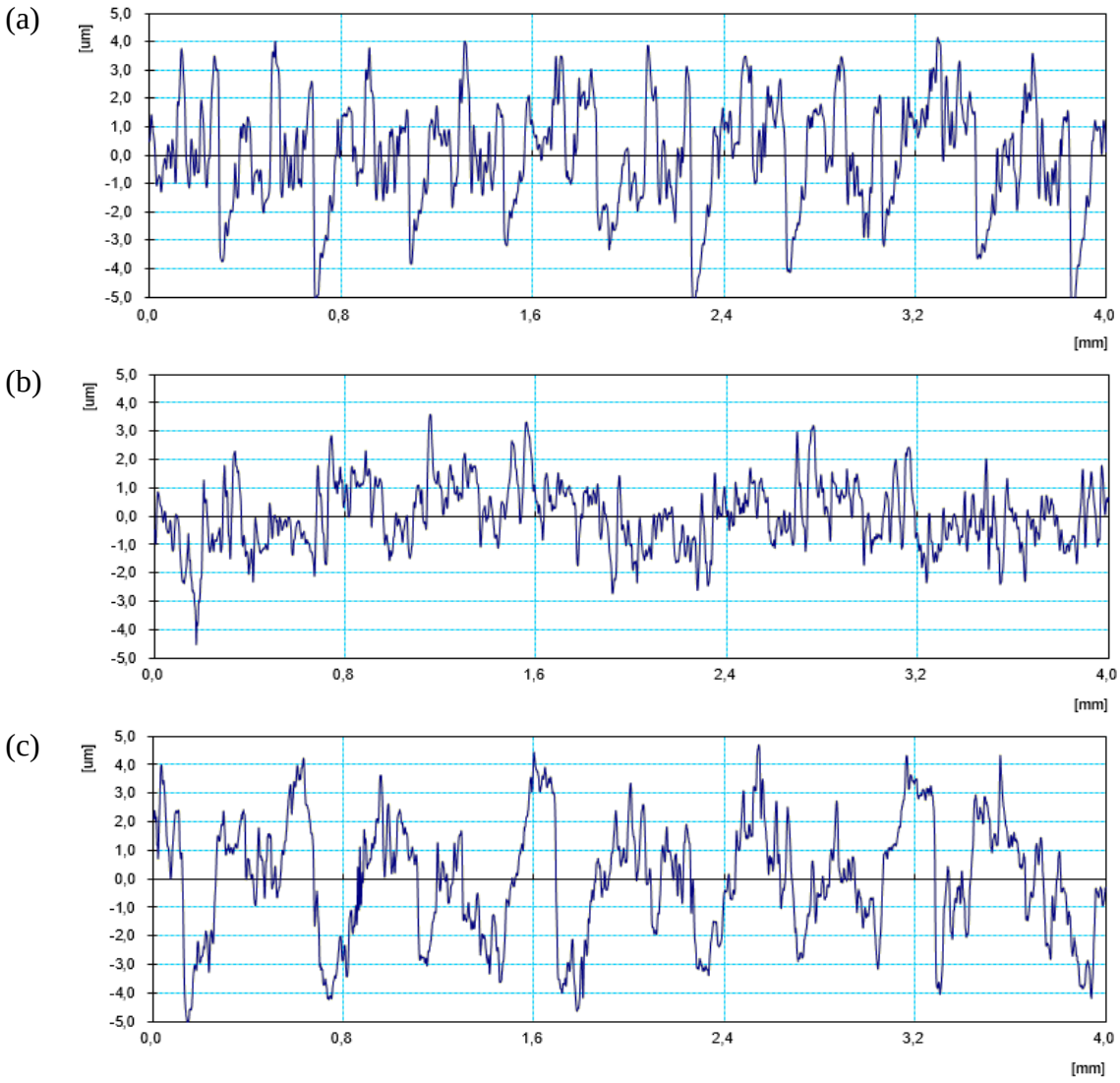


Figura 4.6 – Perfis de rugosidade das superfícies com pior acabamento (R_a) em l_m = 4,0 mm: (a) amostra 12 com CCA; (b) amostra 15 com DRY; (c) amostra 13 com NMQL.

A análise comparativa da curva de Abbott-Firestone (AFC) e da distribuição de probabilidade de amplitude (APD) para as menores e maiores rugosidades foi feita nas três condições para os melhores e piores acabamentos. Nos melhores acabamentos (Figura 4.7), a condição CCA resultou em uma leve variação em relação ao DRY, com uma maior dispersão de resultados. O DRY apresentou melhor distribuição dos picos e vales, com menor inclinação da curva AFC, e maior concentração de valores em torno da média na curva APD, ou seja, distribuição leptocúrtica (curtose positiva); isso indica que o perfil possui baixos valores de rugosidade e menor variação em picos e vales, o que é adequado para usinagem em certos componentes para determinadas aplicações. Por outro lado, a curva APD na condição NMQL mostrou-se assimétrica, com uma maior quantidade de picos em relação ao de vales; entretanto,

o número de vales ficou mais distante da média em comparação ao número de picos, apresentando uma distribuição platicúrtica (curtose negativa).

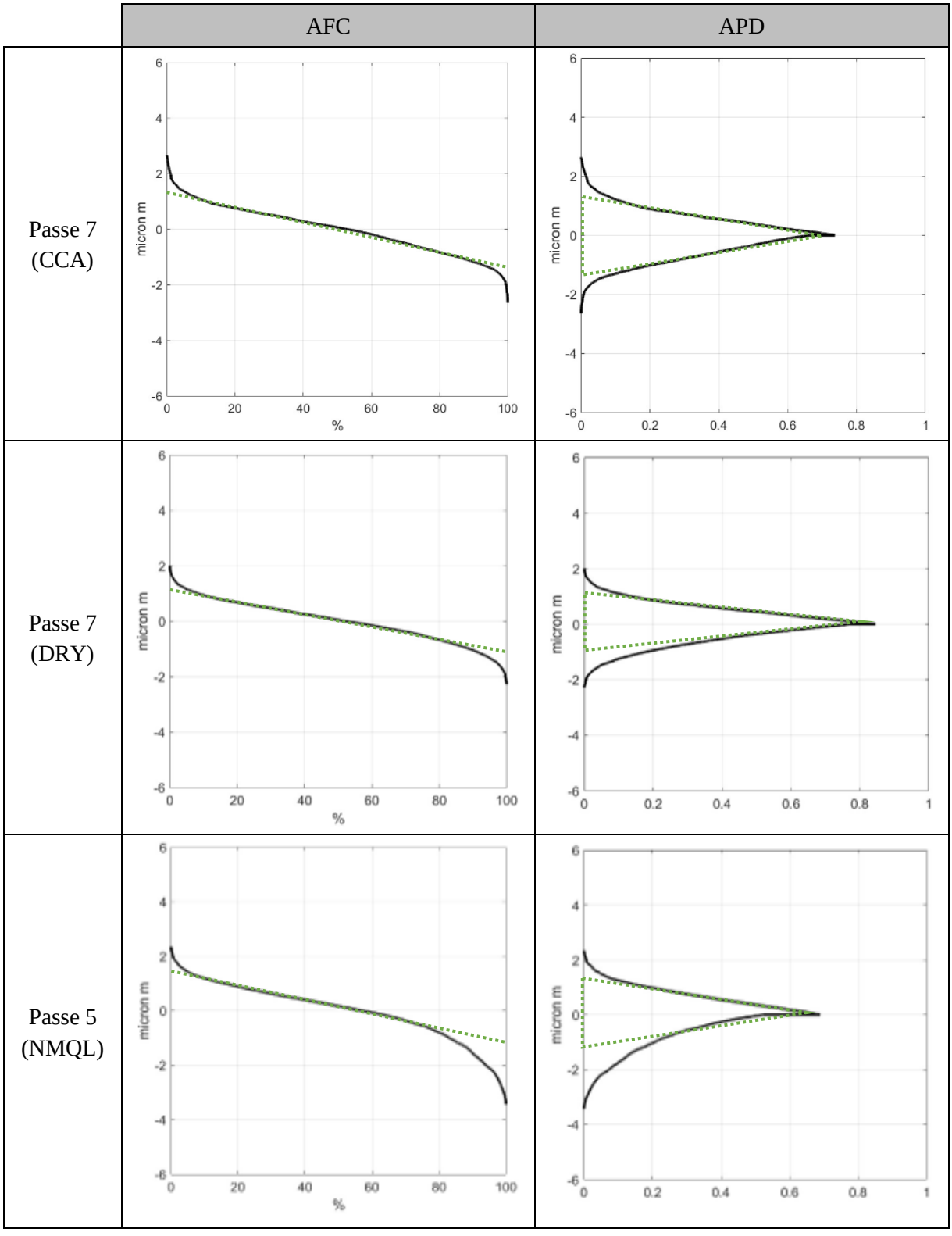


Figura 4.7 – Curvas AFC e APD para as menores rugosidades (R_a) das amostras avaliadas

Nos piores acabamentos (Figura 4.8), a condição CCA apresentou desempenho com distribuição homogênea entre picos e vales, contudo, com alta dispersão em torno da média.

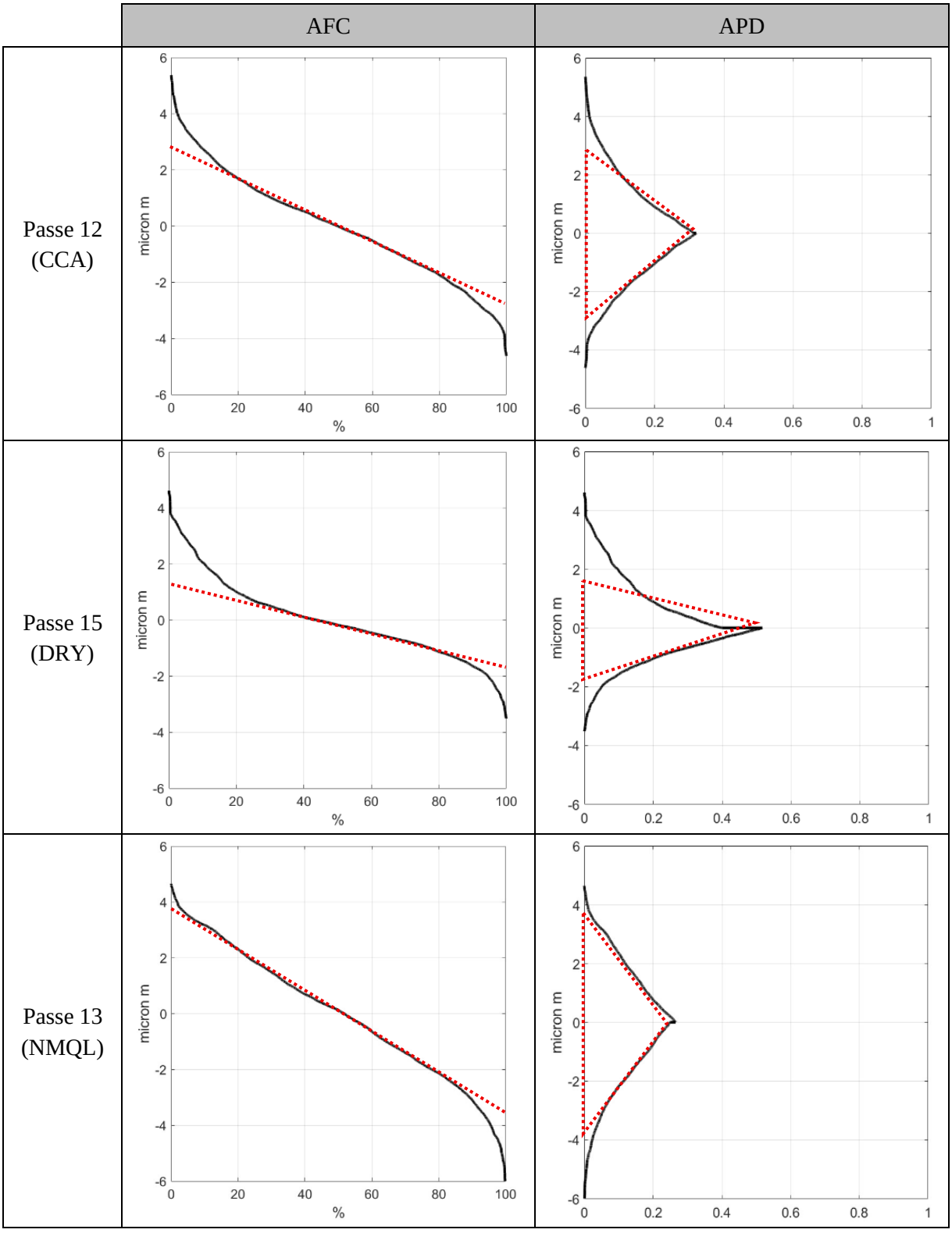
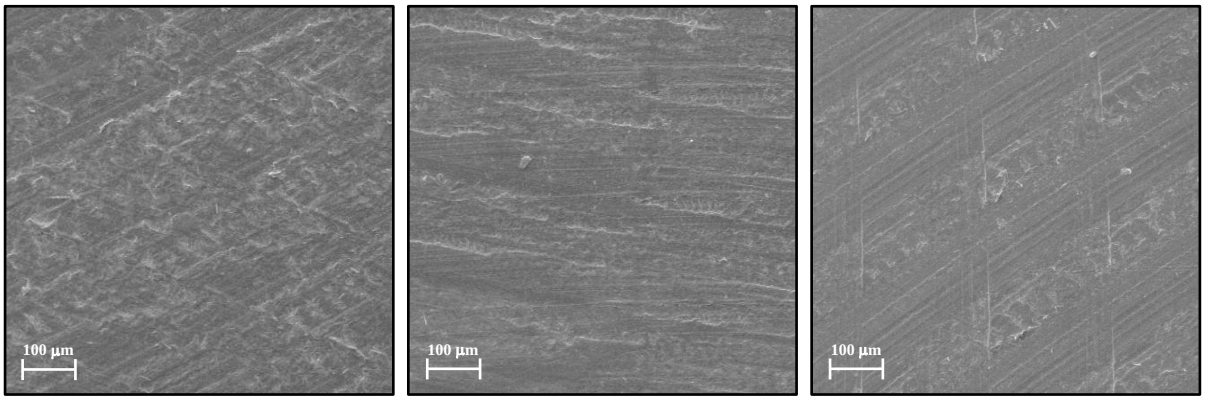


Figura 4.8 – Curvas AFC e APD para as maiores rugosidades (R_a) das amostras avaliadas

A condição NMQL, por sua vez, apresentou vales mais profundos que picos, o que pode evidenciar a influência do nanofluido, em que a aglomeração de partículas pode ter induzido a marcas na superfície pelo atrito com a ferramenta. A análise comparativa entre os meios lubrirrefrigerantes, através das curvas AFC e APD, permitiu verificar que o perfil de rugosidade produzido na condição DRY possui menor inclinação da reta, o que indica menores rugosidades e uniformidade na distribuição de picos e vales com menores amplitudes de pico a vale.

4.1.4 Avaliação da textura da superfície

A Figura 4.9 mostra as imagens MEV das superfícies usinadas com menor rugosidade média (R_a) nas três condições lubrirrefrigerantes (CCA, DRY e NMQL). O avanço por dente em nível baixo (f_z = 0,05 mm/dente) foi usado nas três condições, confirmando ser o parâmetro responsável pela baixa rugosidade. Contudo, as diferenças de textura ainda persistem.

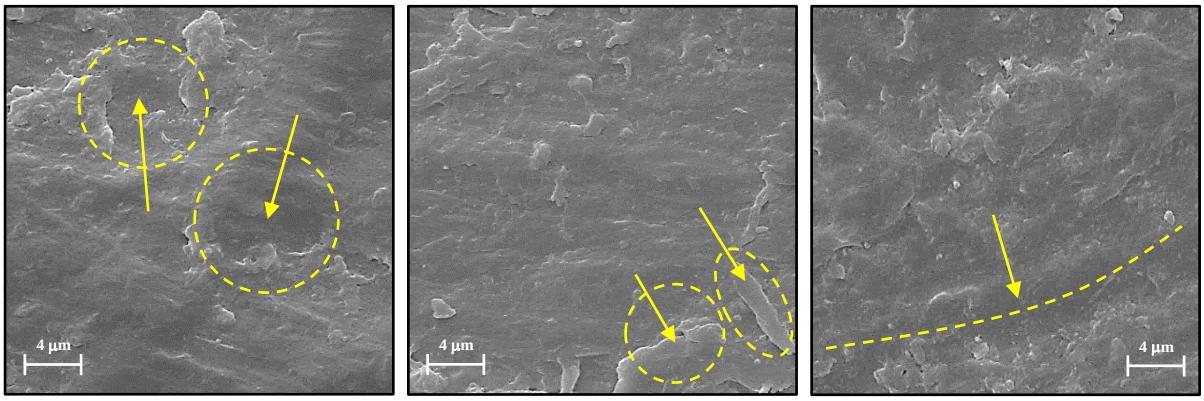


(a) (b) (c)

Figura 4.9 – Imagem MEV das superfícies com melhor acabamento: (a) amostra 7 com CCA; (b) amostra 7 com DRY; (c) amostra 5 com NMQL (ampliação 200x)

Conforme Izamshah et al. (2013), o avanço é o principal fator de influência na rugosidade superficial, o que pode indicar a presença de fatores não controlados no experimento. Percebe-se que a superfície usinada com CCA (Figura 4.9a) apresenta aspectos de marcas de ferramenta em linhas cruzadas. O aspecto da superfície usinada com DRY (Figura 4.9b) mostra linhas uniformes e concordantes com sentido de corte da ferramenta. O meio lubrirrefrigerante (NMQL) gerou ranhuras circunferenciais (Figura 4.9c).

Para uma verificação mais detalhada e clara, as imagens MEV das superfícies usinadas foram ampliadas em 5000x (Figura 4.10).



(a) (b) (c)

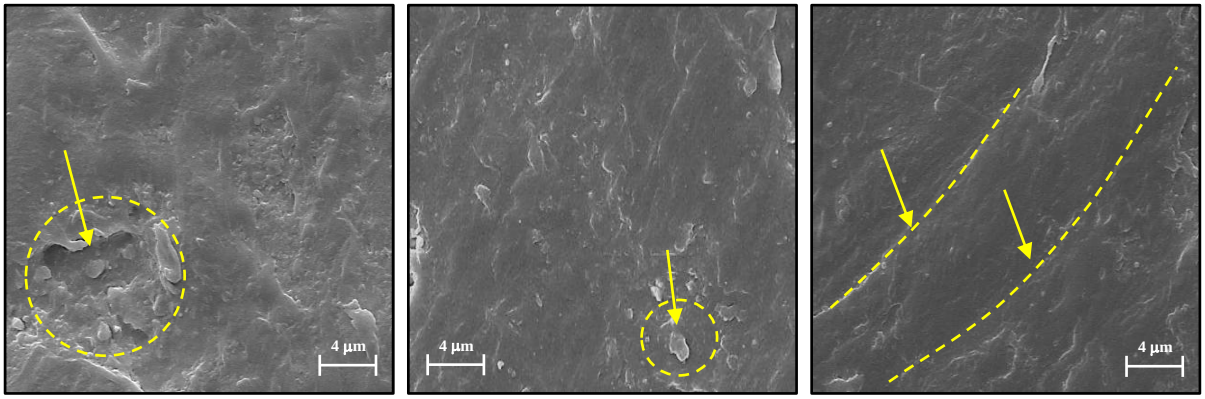
Figura 4.10 – Imagem MEV das superfícies com melhor acabamento: (a) amostra 7 com CCA; (b) amostra 7 com DRY; (c) amostra 5 com NMQL (ampliação 5000x).

A amostra da Figura 4.10a (CCA) mostra o aparecimento de vazios na superfície, indicando possíveis pontos de retirada de material pela ação das arestas de corte da fresa. A textura observada pode ter sido influenciada pela fragilidade do material devido à ação da temperatura mais baixa no processo (–40 °C). Garcia-Gonzales et al. (2015) consideram que a exposição progressiva do termoplástico em baixas temperaturas conduz o material a uma transição conhecida como dúctil-frágil. Durante esta transição, o polímero perde energia cinética, resultando em restrições de movimento das cadeias intermoleculares. Conforme o autor, a pouca mobilidade atômica devido à baixa temperatura conduz a uma condição de aumento da rigidez e pouca absorção de energia pelo material, e esse processo resulta em perda de ductilidade. Conforme Canevarolo Jr. (2010), o comportamento viscoelástico de um polímero é afetado pela temperatura. O polímero passa de um comportamento totalmente dúctil para totalmente frágil, ou seja, com a redução da temperatura, ocorre o aumento do módulo de elasticidade, onde para o mesmo nível de tensão, ocorrem pequenas deformações anteriores à ruptura da seção, reduzindo drasticamente a fase de deformação plástica do material.

A Figura 4.10b apresenta uma superfície com aparência mais uniforme das camadas cortadas sob a condição DRY. Nota-se também a formação em relevo de partículas de material depositado resultantes da ação da ferramenta. Já a Figura 4.10c exibe uma zona de arraste, possivelmente devido ao atrito ferramenta/peça e à presença de nanopartículas nesta interface, contribuindo para o aparecimento de marcas na superfície usinada com NMQL. Conforme já mencionado, Huang et al. (2016) consideraram a possibilidade de haver aglomeração das partículas, podendo influenciar no acabamento superficial.

Considerando as amostras com pior acabamento, em todas as amostras apresentadas, o avanço por dente (f_z) foi de 0,1 mm e as profundidades de corte axiais (a_p) foram 0,5 mm para

CCA e 0,8 mm para DRY e NMQL. A observação destas superfícies (Figura 4.11) pode sugerir que a amostra obtida na condição DRY, por apresentar o aspecto mais homogêneo, é a mais adequada para esses níveis de parâmetros de entrada.



(a) (b) (c)

Figura 4.11 – Imagem MEV das superfícies com o pior acabamento: (a) amostra 12 com CCA; (b) amostra 15 com DRY; (c) amostra 13 com NMQL (ampliação 5000x).

Algumas pesquisas na usinagem de polímeros em baixas temperaturas ilustram a possível interferência do meio lubrirrefrigerante nos resultados de textura superficial obtidos. Bertolini et al. (2020) investigaram, em processo de torneamento, a usinabilidade de poliamida-6 em condições de resfriamento criogênico (abaixo de −150 °C) e obtiveram superfícies mais lisas e duras comparadas ao processo usando fluidos convencionais. Dhokia et al. (2010), congelaram acetato de etileno-vinil, usando nitrogênio líquido (LN_2) e obtiveram uma superfície do polímero endurecida, a qual em processo de torneamento permitiu erros dimensionais de apenas 1% após a usinagem. Putz et al. (2016) estudaram a influência do resfriamento criogênico nas forças de corte e integridade superficial de elastômero de borracha nitrílica-butadieno. Os autores constataram que utilizando resfriamento criogênico houve aumento das forças de usinagem e a deformação da superfície foi reduzida, obtendo uma melhor qualidade da superfície se comparada à obtida na condição DRY. Aldwell et al. (2015) submergiram polietileno de alto peso molecular em LN_2 por aproximadamente 24 horas antes de usinar o material e obtiveram uma superfície mais rígida se comparada à condição DRY. Não foram encontrados trabalhos em usinagem de polímeros com a utilização de nanofluidos.

4.1.5 Otimização multivariada

Com base na ANOVA, e nos gráficos de superfície que apresentam as condições que proporcionam melhores acabamentos superficiais, percebe-se que existe uma correspondência

entre os comportamentos de R_a, R_z e R_t em regiões com menores valores de rugosidade. Este comportamento sugere a possibilidade de atingir simultaneamente os valores mais baixos para tais parâmetros. Assim, foi realizada uma otimização multivariada para rugosidade superficial utilizando-se o Minitab®18. A Figura 4.12 apresenta a função de desejabilidade composta (D) para resultados de otimização, considerando as condições CCA, DRY e NMQL.

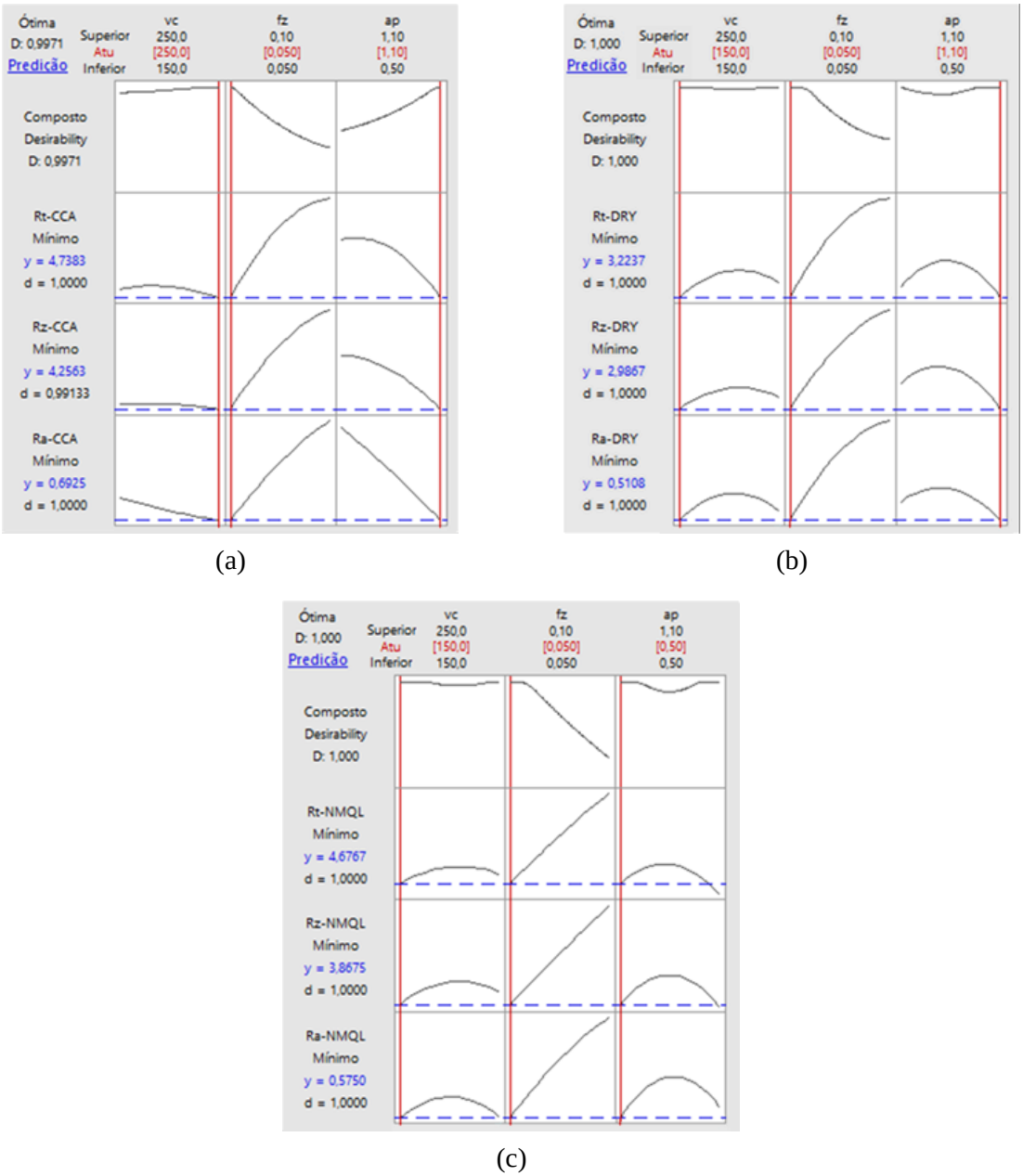


Figura 4.12 – Otimização da desejabilidade composta: (a) CCA; (b) DRY; (c) NMQL.

A função desejabilidade composta atingiu valores de D = 0,9971 (CCA) e D = 1,0 (DRY e NMQL). Isso representa uma probabilidade superior a 99,5% de que os níveis

otimizados dos parâmetros sejam os mais adequados para minimizar a rugosidade dentro do intervalo de valores analisado. Os resultados resumidos são apresentados na Tabela 4.6. Conforme Ferreira et al. (2007), esses níveis mostram o máximo e mínimo ótimo como referência para os parâmetros de usinagem.

Tabela 4.6 – Resultados da otimização multivariada.

Condição Lubrirrefrigerante	Fatores Controláveis			Variáveis de Resposta Estimadas		
	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)
CCA	250	0,05	1,1	0,69	4,25	4,74
DRY	150	0,05	1,1	0,51	2,98	3,22
NMQL	150	0,05	0,5	0,57	3,87	4,68

Testes de validação do modelo foram executados, em que três amostras foram usinadas para cada condição lubrirrefrigerante, considerando os fatores controláveis indicados pela otimização multivariada. As variáveis de resposta obtidas com os passes de validação são apresentadas na Tabela 4.8, mostrando divergências dos valores estimados (Tabela 4.6), com valores de rugosidade medidos superiores aos estimados na ordem de 29,33% para CCA, 39,64% para DRY e 16,44% para NMQL, possivelmente devido a interferência de fatores não controláveis intrínsecos ao processo (p.ex. variação da baixa temperatura do CCA, variação da viscoelasticidade do PEEK no DRY, tamanho e quantidade de nanoesferas no NMQL etc.).

Tabela 4.7 – Resultados dos passes de validação.

Condição Lubrirrefrigerante	Fatores Controláveis			Variáveis de Resposta Medidas		
	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)
CCA	250	0,05	1,1	0,82	5,40	6,30
DRY	150	0,05	1,1	0,58	4,09	4,70
NMQL	150	0,05	0,5	0,82	4,60	5,24

Contudo, as rugosidades obtidas com os passes de validação apresentaram poucas diferenças das rugosidades das amostras do experimento. A Tabela 4.9 apresenta uma comparação entre as amostras com menor rugosidade (obtidas nos 15 passes iniciais) e as geradas pelos passes de validação.

Nas amostras 7 e 5 foram observadas combinações de parâmetros de usinagem próximas das otimizadas e foram as menores rugosidades médias (R_a) obtidas no experimento para as três

condições lubrirrefrigerantes, divergindo somente na velocidade de corte (CCA e DRY) e na profundidade de corte (NMQL). O passe 7 com v_c = 200 m/min resultou nas amostras com os menores valores de R_a para a condição CCA (0,71 µm) e DRY (0,56 µm), enquanto o passe 5 com a_p = 0,8 mm gerou R_a = 0,80 µm.

Analisando todos os parâmetros de rugosidade, nota-se que os valores de R_a, R_z e R_t obtidos com os ensaios de validação são bastante próximos aos valores de rugosidade gerados pelo passe 7 na condição DRY e pelo passe 5 na condição NMQL. Por outro lado, a validação na condição CCA proporcionou valores de rugosidade maiores que os da amostra 7. Nesse caso, o aumento de v_c de 200 para 250 m/min pode ter promovido um aumento da temperatura na zona de corte que, em combinação com o ar refrigerado a –40 °C, pode ter afetado o comportamento viscoelástico do PEEK.

Tabela 4.8 – Comparação entre as variáveis de resposta (R_a, R_z, R_t) obtidas no experimento e as otimizadas (validação) com base nos parâmetros de corte.

	Meios Lubrirrefrigerantes								
	CCA			**DRY**			**NMQL**		
	Menor rugosidade (experimento)	Rugosidade otimizada	Diferença (%)	Menor rugosidade (experimento)	Rugosidade otimizada	Diferença (%)	Menor rugosidade (experimento)	Rugosidade otimizada	Diferença (%)
Ra (µm)	**Passe 7**	**validação**		**Passe 7**	**validação**		**Passe 5**	**validação**	
	0,71	**0,82**	+15,49%	**0,56**	**0,58**	+3,57%	**0,80**	**0,82**	+2,50%
v_c (m/min)	200	250	+25%	200	150	-25%	150	150	+0%
a_p (mm)	1,1	1,1	0%	1,1	1,1	0%	0,8	0,5	-37,50%
f_z (mm/dente)	0,05	0,05	0%	0,05	0,05	0%	0,05	0,05	0%
Rz (µm)	**Passe 7**	**validação**		**Passe 7**	**validação**		**Passe 5**	**validação**	
	4,22	**5,40**	+27,96%	**3,46**	**4,09**	+18,20%	**4,56**	**4,60**	+0,08%
v_c (m/min)	200	250	+25%	200	150	-25%	150	150	0%
a_p (mm)	1,1	1,1	0%	1,1	1,1	0%	0,8	0,5	-37,50%
f_z (mm/dente)	0,05	0,05	0%	0,05	0,05	0%	0,05	0,05	0%
Rt (µm)	**Passe 7**	**validação**		**Passe 7**	**validação**		**Passe 5**	**validação**	
	5,04	**6,30**	+25,00%	**4,09**	**4,70**	+14,91%	**5,27**	**5,24**	-0,57%
v_c (m/min)	200	250	+25%	200	150	-25%	150	150	0%
a_p (mm)	1,1	1,1	0%	1,1	1,1	0%	0,8	0,5	-37,50%
f_z (mm/dente)	0,05	0,05	0%	0,05	0,05	0%	0,05	0,05	0%

4.2 Considerações sobre as Forças de Usinagem

Os pontos de controle foram as referências para a observação dos sinais de força obtidos na usinagem ao longo do trajeto da ferramenta nos passes 2, 8 e 14. Os sinais para o cálculo das forças foram coletados na região de maior estabilidade da usinagem, ou seja, não foram consideradas a entrada e a saída da fresa. Os gráficos da Figura 4.15 mostram os valores das forças ativa (F_a) e passiva (F_p), obtidos em cada condição lubrirrefrigerante. Os resultados obtidos mostram valores muito baixos. Assim, por não haver repetições do experimento, a observação sobre a participação ou não do meio lubrirrefrigerante não é conclusiva na avaliação das variáveis de resposta.

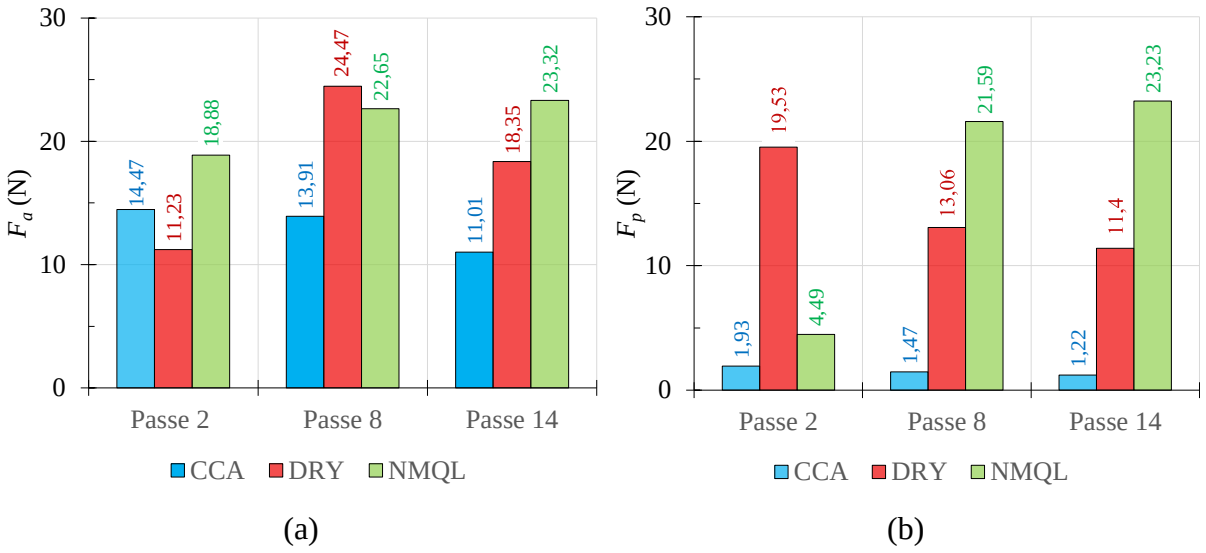


Figura 4.13 – Forças nos passes com parâmetros em nível médio: (a) ativas; (b) passivas.

As forças ativas na condição CCA possuem a média de valores 27,1% abaixo da condição DRY e 39,2% abaixo da NMQL. As forças passivas na condição CCA apresentaram valores insignificantes comparativamente à condição DRY e NMQL. É desejável ter forças de usinagem (F_U) baixas pois podem contribuir para obtenção de melhores acabamentos, maior vida útil de ferramentas e viabilidade econômica do processo [Diniz et al., 2013]. As forças resultantes das componentes ativas e passivas apresentaram valores sem relevância em relação a critérios de avaliação na usinagem do material em cada passe de controle (Tabela 4.9).

A observação sugere de forma hipotética que a condição CCA pode ter oferecido a menor resistência ao corte devido à alteração física molecular do corpo de prova. A baixa temperatura, ou seja, a transição dúctil-frágil, de forma interpretativa, pode ter facilitado a

redução dos esforços de cisalhamento do material. Segundo Canevarolo (2010), o comportamento físico-mecânico vítreo que um polímero se caracteriza, ocorre abaixo da temperatura de transição vítrea (Tg) que corresponde à 150ºC, sendo intensificado pela baixa temperatura. Neste nível energético as cadeias poliméricas não têm energia suficiente para apresentar mobilidade, respondendo de forma elástica às solicitações. A deformação plástica existe, mas com uma contribuição muito baixa. O polímero é rígido e frágil.

Tabela 4.9 – Valores médios e desvios-padrões das forças de usinagem (F_U)

Passe	Forças de Usinagem		
	CCA	DRY	NMQL
2	14,6	22,5	19,4
8	13,9	27,7	31,1
14	11,1	21,6	32,9
Média	13,20	23,94	27,80
Desvio-padrão	1,85	3,29	7,33

De acordo com os dados da Tabela 4.9, a F_U na condição CCA possui média inferior de 44,86% e 52,51% em relação aos meios DRY e NMQL, respectivamente. O desvio padrão baixo em CCA, pode caracterizar o comportamento físico-mecânico do material (indicativo da pouca mobilidade molecular), contribuindo para forças de corte menores e mais uniformes, caracterizando uma repetibilidade entre os passes. A forças de usinagem (F_U) médias, em cada passe, encontram-se no **APÊNDICE I**.

Os sinais de força (F_U) obtidos no experimento nos passes 2, 8 e 14, em cada meio lubrirrefrigerante são apresentados nos **APÊNDICES II**, **III** e **IV**, e caracterizam a distribuição das forças de usinagem ao longo do trajeto da ferramenta, bem como os patamares de força mais elevados, em cada passe de controle, nas três condições lubrirrefrigerantes.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa buscou avaliar o uso de diferentes condições de corte e lubrirrefrigeração no fresamento frontal de acabamento no polímero termoplástico poli-éter-éter-cetona (PEEK). Os parâmetros de rugosidade R_a, R_z e R_t, as texturas das superfícies e os perfis de rugosidade foram investigados. As forças de usinagem ativas (F_a) e passivas (F_p) foram verificadas para observar o comportamento do material associado a estas condições de usinagem. As causas das diferenças encontradas ainda são objeto de estudo de possíveis fatores constantes (não avaliados no experimento), como a influência da temperatura no comportamento da estrutura física do material no caso de (CCA), ou mesmo interferência de nano partículas do fluido em NMQL.

A melhor superfície usinada utilizando ar comprimido refrigerado a −40 °C (CCA) apresentou uma textura com formação de crateras, possivelmente devido ao desprendimento de partículas. Este processo deve ser mais bem estudado quanto às condições da superfície em baixas temperaturas, pois pode estar ligado à transformação dúctil-frágil. Esta mudança nas propriedades do polímero pode implicar no corte do material e influenciar em sua textura. Não foram encontradas evidências que a utilização de ar gelado supera outros meios lubrirrefrigerantes.

O processo de usinagem a seco (DRY) produziu os menores valores de rugosidade R_a (0,56 μm), R_z (3,46 μm) e R_t (4,09 μm). Contudo, o acabamento usinado seco, quando comparado com os obtidos nas demais condições lubrirrefrigerantes, pode não apresentar diferenças significativas quanto à aplicação. Por exemplo, os componentes fabricados em PEEK usados em aplicações médicas requerem superfícies com R_a entre 1,0 μm e 1,5 μm [Besliu-Bãncescu et al.,2024], que geralmente possuem superfícies complexas e requisitos específicos de textura. As melhores superfícies obtidas em todas as condições lubrirrefrigerantes tiveram valores de $R_a < 0{,}8$ μm.

O fresamento frontal utilizando o nanofluido Way 45-B em mínima quantidade (NMQL) gerou valores de R_a 5,3% menores que sob CCA e 40,3% maiores que com DRY. A textura obtida mostra riscos circunferenciais ao longo da trajetória de deslocamento da ferramenta. Possivelmente houve arraste de nanopartículas sólidas devido ao contato ferramenta/peça. As pesquisas envolvendo nanofluidos referem-se basicamente à usinagem de metais. Busca-se entender o comportamento deste meio lubrirrefrigerante em polímeros.

Com relação à influência dos parâmetros de corte, a análise de variância (ANOVA) mostrou que o avanço por dente (f_z) é o fator significativo que mais afeta os valores de R_a, R_z e

R_t na condição DRY. De maneira geral, o menor avanço (f_z) e a maior profundidade de corte axial (a_p) tendem a gerar melhor acabamento. Essa condição não utiliza meios lubrirrefrigerantes, portanto apresenta custo inferior devido à ausência de equipamentos e gasto com obtenção de fluidos, além de ser ambientalmente favorável. Contudo, o f_z em nível baixo, exigido para se obter baixa rugosidade, pode não possibilitar a produtividade desejada.

Algumas dificuldades foram encontradas na pesquisa. Não foram encontrados muitos trabalhos relativos ao fresamento frontal do PEEK, considerando as relações entre os parâmetros de corte e os meios lubrirrefrigerantes. Associado a isso, cabe salientar que o processo utilizando ar comprimido refrigerado (CCA) ainda necessita de uma avaliação mais detalhada sobre o comportamento molecular desse polímero termoplástico na fase dúctil-frágil, citado por alguns autores. A aplicação de nanofluidos em polímeros ainda é uma questão de pesquisa a ser avaliada.

REFERÊNCIAS

Aita, C. A. G., Passari, E. S., Souza, A. J. “Comparative study of front milling of PEEK and PEEK-CF30”, **Proceedings of the 27th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2023)**, Florianopolis, SC, Brazil, 2023.

Aldwell, B., O`Mahony, J., O'Donnell, G.E. The effect of workpiece cooling on the machining of biomedical grade polymers, **Procedia CIRP**, v. 33, p. 305-310, 2015.

Barros, B. N, Scarminio, I. S e Bruns, R. E. **Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. 2. ed., Editora da UNICAMP, Campinas, 2001.

Baumgaertner Filho, A. J. **Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2017.

Benedicto, E., Carou, D., Rubio E. M. “Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling system used in machining processes”, **Procedia Engineering**, v. 184, p. 99-116, 2017.

Bernardos P. G., Vosniakos, G. C. “Prediction surface roughness in machining: a review”. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, p. 833-844, 2003.

Bertolini, A., Ghiotti, S. “Machinability of polyamide-6 under cryogenic cooling conditions”, **Procedia Manufacturing**, v. 48, p. 419-427, 2020.

Beșliu-Băncescu, I., Tamașag, I., Slătineanu, L. “The influence of the machining strategy on milling of polyetheretherketone (PEEK)”. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 132, p. 2773–2785, 2024.

Black, J. T. “Introduction to machining processes”. **Metals Handbook: Machining**. 9º ed. ASM International, New York, 1995.

Canevarolo Jr., S. V. **Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros**, 3. ed., Artliber, São Paulo, 2010.

Carvalho, A. C. S. **Análise da furação do aço inoxidável AISI 304 com a aplicação externa de nanofluidos em quantidade reduzida**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

Chinchanikar, S., Kore, S. S., Hujare, P. "A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining". **Journal of Manufacturing Processes**, v. 68, p. 56-70, 2021.

Davim, J. P., Reis, P., Lapa, V., Antonio, C. C. "Machinability study on polyetheretherketone (PEEK) unreinforced and reinforced (GF30) for applications in structural components". **Composite Structures**, v. 62, p. 67-73, 2003.

Davim, P., Mata, F. "Chemical vapour deposition (CVD) diamond coated tools performance in machining of peek composites". **Materials & Design**, v. 29, p. 1568-1574, 2006.

Debnath, S., Reddy, M. M., Yi, Q. S. "Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review". **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33-47, 2014.

Dhar, N. R., Islam, M. W., Islam, S., Mithu, M. A. H. "The influence of minimum quantity of lubricant (MQL) on cutting temperature, chip, and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel". **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, p. 93-99, 2006.

Dhokia, V. G., Newman, S. T., Crabtree, P., Ansell, M. P. "A methodology for determination of foamed polymer contraction rates as a result of cryogenic CNC machining", **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 26, p. 665-670, 2010.

DIN EN ISO 4287. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: profile method – Terms, definitions and surface texture parameters, **Deutsches Institut für Normung**. Berlim,2010.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 8. ed., Artliber, São Paulo, 2013.

Fan, J. P., Tsui, C. P., Tang, C.Y., Chow, C. L. "Influence of interphase layer on the overall elasto-plastic behaviors of HA/PEEK bio-composite". **Biomaterials**, v. 25, p. 5363-5373, 2004.

Ferraresi, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, 16ª Reimpressão, Blucher, São Paulo, 2013.

Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., Silva, E. G. P., Portugal, L. A., Reis, P. S., Souza, A. S., Santos, W. N. L. "Box Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods". **Analytica Chimica Acta**, v. 597, p. 179-186, 2007.

Garcia-Gonzales D., Rodrigues-Millan M., Rusinek A. "Low temperature effect on impact energy absorption capability of PEEK composites". **Composite Structures**, v. 134, p. 440-449, 2015.

Goindi, G. S., Sarkar, P. "Dry machining: A step towards sustainable machining – Challenges and future directions". **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1557-1571, 2017.

Green. S., Schlegel, J. "A polyaryletherketone biomaterial for use in medical implant applications". **Proceedings of the Polymers for the Medical Industry**, Brussels, Belgium, 2001.

Gupta, K. "A review on green machining techniques". **Procedia Manufacturing**, v. 51, p. 1730-1736, 2020.

Ha, S. W., Kirsh, M., Birchler, F., Eckert, K. L., Mayer, J., Wintermantel, E., Sittig, C., Pfund-Klingenfuss, I., Textor, M., Spencer, N. D., Guecheva, M., Vonmont, H. "Surface activation of polyetheretherketone (PEEK) and formation of calcium phosphate coatings by precipitation". **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 8, p. 683-690, 1997.

Hackenhaar, W. **Avaliação da eficiência térmica e de fusão na soldagem MAG em diferentes geometrias de juntas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

Hair Jr., J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., Tatham, R.L. **Análise Multivariada de Dados**. 6 ed., Bookman, Porto Alegre, 2009.

Hanafi, I., Khamlichi, A., Mata, F., López, P. “Prediction of surface roughness in turning of PEEK CF30 by using an artificial neural network”. **Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers**, v.29, p.337-347, 2012.

Huang, W. T., Liu, W. S., Wu, D. H. “Investigations into lubrication in grinding process using MWCNTs nanofluids with ultrasonic-assisted dispersion”. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1553-1559, 2016.

Itoigawa, F., Takeuchi, D., Nakamura, T., Childs, T. H. C. “Experimental study on lubrication mechanism in MQL intermittent cutting process”. **Machining Science and Technology**, v. 11, p. 355-365, 2007.

Izamshah R., Long, A. Y., Ali, M. M., Kasim, M. S., Hadzley, M., Subramonian, S. “Optimization of machining parameters for milling polyetheretherketones (PEEK) biomaterial”. **Applied Mechanics and Materials**, v. 699, p 198-203, 2015.

Izamshah, R., Azam, M. A., Hadzley, M., Ali, M. M., Kazim, M. S., Aziz, M. A. “Study of surface roughness on milling unfilled-polyetheretherketones engineering plastics”. **Procedia Engineering**, v. 68, p. 654-660, 2013.

Jayaram, S., Kapoor, S., De Vor, R. “Estimation of the specific cutting pressures for mechanistic”. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, p. 265-281, 2001.

Jesus, J. S., Aita, C. A. G., Souza A. J., Passari E. S., Schirmer, G. V. “Investigação sobre os efeitos da geometria da fresa no acabamento gerado pelo fresamento frontal de PEEK natural”. **Anais do 13º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF 2025)**, Salvador, BA, Brasil, 2025.

Kalpakjian, S., Schmid, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**, 7 ed., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 2010.

Khoran, M., Amirabadi, H., Azarhoushang, B. “The effects of cryogenic cooling on the grinding process of polyether ether ketone (PEEK)”. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 56, p. 1075-1087, 2020.

Kizuki T, Matsushita T, Kokubo T. “Apatite-forming PEEK with TiO_2 surface layer coating”. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 26, p. 41, 2015.

Klocke, F. **Manufacturing Processes 1 – Cutting**. Springer, Berlin-Heidelberg, 2011.

Kuram, E., Ozcelik, B., Demirbas, E. “Environmental friendly machining: vegetable-based cutting fluids”. In: Paulo Davim, J. (Ed.) **Green Manufacturing Processes and Systems**. Springer, Berlin-Heidelberg, p. 23-47, 2013.

Kurtz, S. M., Devine, J. N. “PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants”. **Biomaterials**, v. 28, p. 4845-4869, 2007.

Kurtz, S. M. **Peek biomaterials handbook,** Elsevier, Philadelphia, USA, 2011.

Le Coz, G., Marinescu, M., Devillez, A., Dudzinski, D., Velnom, L. “Measuring temperature of rotating cutting tools: application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys”. **Applied Thermal Engineering**, v. 36, p. 434-441, 2012.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B. **Teoria da Usinagem dos Metais**, 2.ed., Edgard Blücher, São Paulo, 2015.

Mata, F., Gaitone, V. N., Karnik, S. R., Davim, J. P. “Influence of cutting conditions on machinability aspects of PEEK, PEEK CF 30 and PEEK GF 30 composites using PCD tools”. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 1980-1987, 2009.

Montgomery, D. C. **Estatística aplicada à Engenharia.** 2 ed., LTC, Rio de Janeiro,2004.

Montgomery, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4 ed., LTC, Rio de Janeiro, 2004.

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

Policena, M. R., Devitte, C., Fronza, G., Garcia, R. F., Souza, A. J. “Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205”. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, p. 1617-1625, 2018.

Putz, M., Dix, M., Neubert, M., Schmidt, G., Wertheim, R. “Investigation of turning elastomers assisted with cryogenic cooling”, **Procedia CIRP**, v. 40, p. 631-636, 2016.

Rech, J., Hamdi, H., Valette, S. “Workpiece surface integrity”. In: Davim, J. (eds) **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. Springer, London, p. 59-96, 2008.

Rubio, E. M., Agustina, B., Marín, M., Bericua, A. “Cooling systems based on cold compressed air: A review of the applications in machining processes”. **Procedia Engineering**, v. 132, p. 413-418, 2015.

Sandvik. **Manual Técnico de Usinagem**. Sandvik Coromant, São Paulo, 2018.

Santos, S. C.; Sales, F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**, Artliber, São Paulo, 2007.

Sória, B. S. **Estudo do comportamento das vibrações em fresamento frontal do aço inoxidável AISI 316 utilizando transformada de Wavelet**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

Sreejit, P. S., Ngoi, B. K. A. “Dry machining: machining of the future”. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 101, p. 287-291, 2000.

Stemmer, C. E. **Ferramentas de Corte**. 2. ed., Editora da UFSC, Florianópolis, 1989.

Su, Y., He, N., Li, L., Li, X. L. “Experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V”. **Wear**, v. 261, p. 760-766, 2006.

Vieira, J. M., Machado, A. R., Ezugwu, E. O. “Performance of cutting fluids during face milling of steels”. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 116, p. 244-251, 2001.

Vinayagamoorthy, R. “Parametric optimization studies on drilling of sandwich composites using the Box-Behnken design”. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 32, p. 645-653, 2017.

Werkema, M. C. C., Aguiar, S. **Planejamento e análise de experimentos: Como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo**. Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte, 1996.

Yoo, D.-H., Hong, K. S., Yang, H. -S. “Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids”. **Thermochimica Acta**, v. 455, p. 66-69, 2007.

Zheng, Z., Liu, P., Zhang, X., Xin, J., Wang, Y., Zou, X., Mei, X., Zhang, S., Zhang, S. “Strategies to improve bioactive and antibacterial properties of polyetheretherketone (PEEK) for use as orthopedic implants”. **Materials Today Bio**, v. 16, p. 100402, 2022.

ANEXOS

ANEXO I – Tipos de PEEK e Aplicações na Indústria

Tipo de PEEK	Utilização Industrial
PEEK TF10	Indústria de Alimentos
PEEK CMF	Indústria de óleo e gás
PEEK PVX	Indústria aeronáutica
PEEK nano ELS	Indústria de componentes elétricos / eletrônicos
PEEK CF30	Polímero c/ 30% de fibra de carbono (uso geral)
PEEK GF30	Polímero c/ 30% de fibra de vidro (uso geral s/ aplicações de deslize)
PEEK Classix	Aplicações médicas e dentárias
PEEK Colorido	Cor original amarelo-bege; outras cores possíveis: preto, azul, vermelho
PEEK MT	Emprego em aplicações médicas (inocuidade fisiológica)
PEEK CW50	Polímero c/ 50% de fibra de carbono

Fonte: www.ensingerplastics.com

ANEXO II – Propriedades Mecânicas e Térmicas do Poli-Éter-Éter-Cetona

Propriedades do Material	
Nome e sigla:	Poli-éter-éter-cetona (PEEK)
Classificação:	Polímero de alta performance
Origem:	Sintético (policondensação)
Fórmula química:	$(C_{19}\,H_{12}\,O_3)_n$
Comportamento mecânico:	Termoplástico
Organização molecular:	Semicristalino
Densidade (sólido):	1,31 g/cm^3
Contração volumétrica:	0,1 a 1,4%
Rigidez dielétrica:	73 KV/mm
Absorção de água a 20 ºC:	0,10%
Absorção de água até a saturação:	0,50%
Propriedades Mecânicas	
Resistência à tração (escoamento):	116 MPa
Módulo de elasticidade:	4200 MPa
Módulo de compressão:	3400 MPa
Resistência à tração no escoamento:	116 MPa
Resistência ao impacto c/ entalhe (Charpy):	4 kJ/m^2
Alongamento (escoamento):	5%
Alongamento (ruptura):	15%
Resistência (flexão):	175 MPa
Propriedades Térmicas	
Temperatura de transição vítrea:	150 ºC
Coeficiente de condutividade térmica a 20 ºC:	0,25 W/(K·m)
Temperatura de fusão:	341 ºC
Temperatura de distorção térmica:	162 ºC
Condutividade térmica a 20 ºC:	0,27 W/(K·m)
Calor específico:	1,1 J/g·K
Temperatura de serviço (curta duração):	300 ºC
Temperatura de serviço (longa duração):	260 ºC
Temperatura de processamento:	370 a 410 ºC
Temperatura de uso contínuo:	até 260 ºC

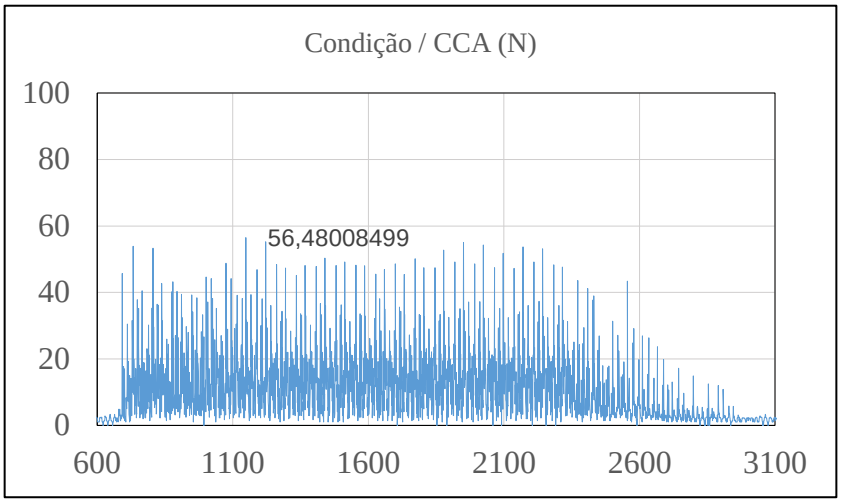
Fonte: www.ensingerplastics.com

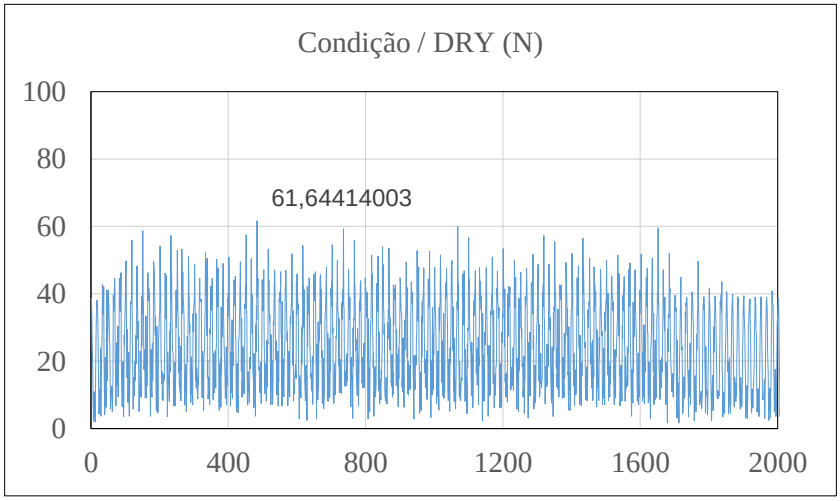
APÊNDICES

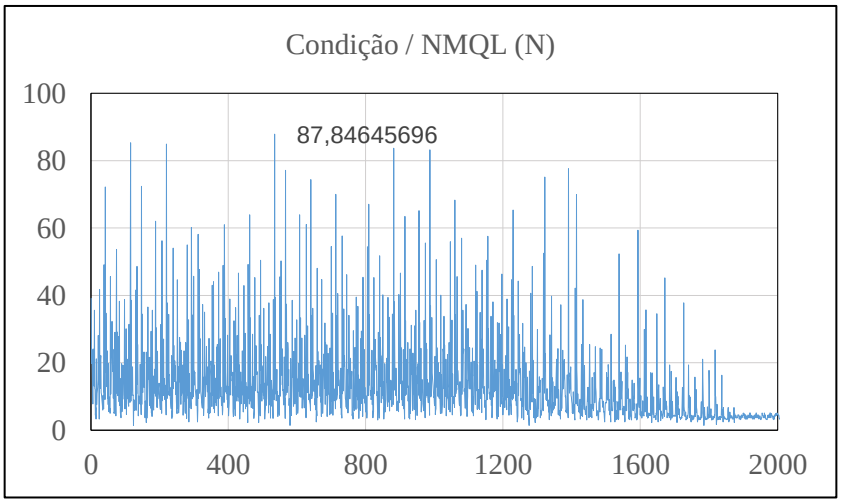
APÊNDICE I – Parâmetros de Corte e Forças de Usinagem - F_U (N)

Passe	v_c (m/min)	a_p (mm)	f_z (mm/volta)	CCA	DRY	NMQL
1	150	1,1	0,08	21,00	28,40	21,00
2	200	0,8	0,08	14,60	22,25	19,40
3	150	0,5	0,08	8,20	25,40	12,30
4	250	1,1	0,08	17,80	22,00	29,80
5	150	0,8	0,05	11,90	15,00	21,70
6	250	0,5	0,08	8,90	16,80	20,30
7	200	1,1	0,05	15,90	19,50	24,90
8	200	0,8	0,08	13,90	27,70	31,30
9	200	0,5	0,05	6,90	15,70	25,20
10	200	1,1	0,10	19,50	34,80	39,10
11	250	0,8	0,05	9,10	15,70	31,20
12	200	0,5	0,10	8,00	18,80	30,70
13	150	0,8	0,10	14,40	23,10	32,60
14	200	0,8	0,08	11,10	21,60	32,90
15	200	0,8	0,10	5,10	24,20	28,90

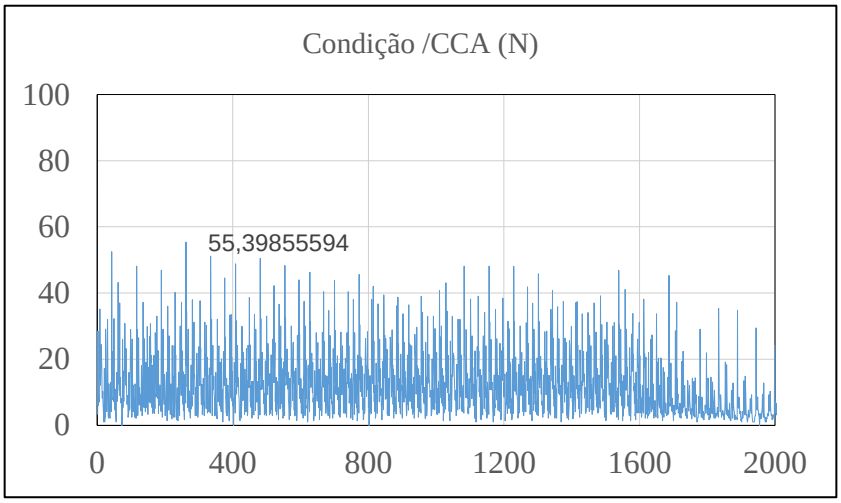
APÊNDICE II – Sinais de Força de Usinagem - F_U (passe de controle 2)

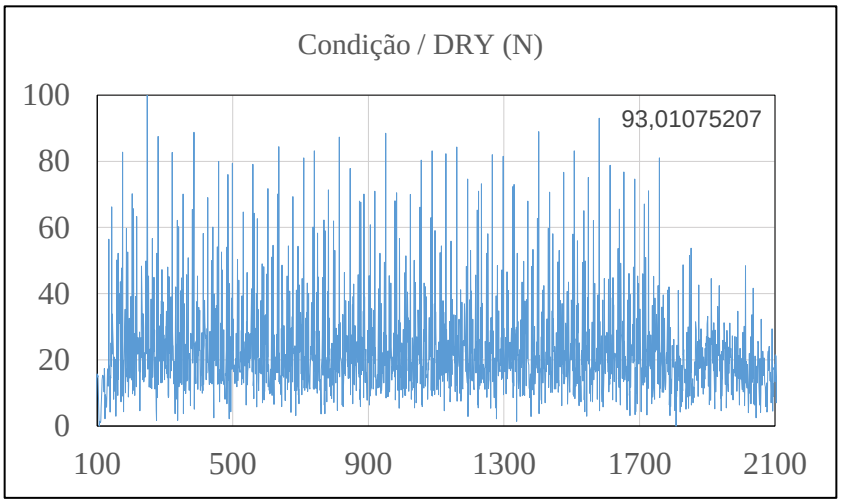


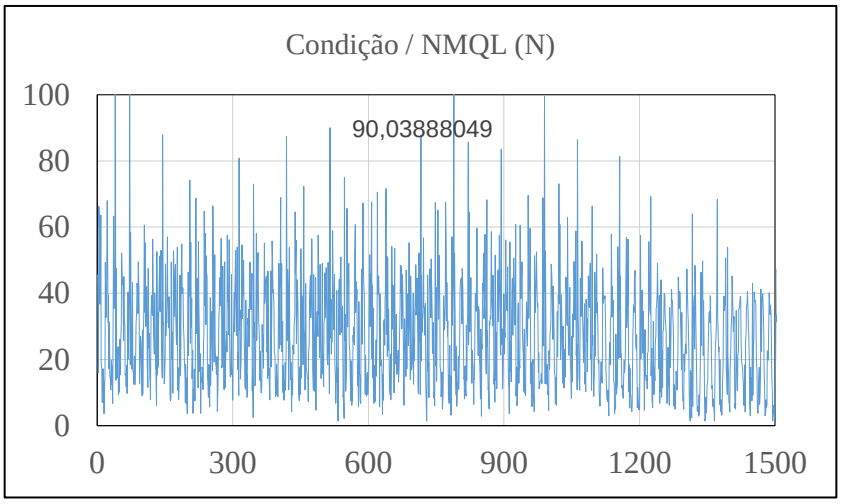




APÊNDICE III – Sinais de Força de Usinagem - F_U (passe de controle 8)







APÊNDICE IV – Sinais de Força de Usinagem - F_U (passe de controle 14)

