

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

AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO DE ACABAMENTO EM  
TITÂNIO COMERCIALMENTE PURO GRAU 4 SOB UMA PERSPECTIVA DE  
USINAGEM AMBIENTALMENTE AMIGÁVEL

por

Fabio Telles

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Novembro de 2018

AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO DE ACABAMENTO EM  
TITÂNIO COMERCIALMENTE PURO GRAU 4 SOB UMA PERSPECTIVA DE  
USINAGEM AMBIENTALMENTE AMIGÁVEL

por

Fabio Telles  
Engenheiro Mecânico

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Aprovada por:

Prof. Dr. Álisson Rocha Machado ..... PPGEM / PUCPR

Prof.<sup>a</sup> Dra. Carla Schwengber ten Caten ..... PPGEP / UFRGS

Prof. Dr. Flavio José Lorini ..... PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 14 de Novembro de 2018

## AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador, Dr. André João de Souza, pelos ensinamentos, paciência, disponibilidade, solicitude e confiança.

Aos professores da banca de avaliação, Dr. Álisson Rocha Machado, Dra. Carla Schwengber ten Caten e Dr. Flavio José Lorini, por aceitarem o convite para avaliar esse trabalho, assim como pelas valiosas contribuições que o enriqueceram intelectualmente.

Às empresas Quimatic Tapmatic, pela doação do sistema nebulizador e fluido de corte, e Primuss Indústria Metal Técnica Ltda., pela doação da matéria-prima utilizada nesse estudo.

À UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) e ao PROMEC (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), pela oportunidade e pelo ensino de qualidade.

Ao pessoal técnico dos laboratórios LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física) e LAUS (Laboratório de Automação e Usinagem) da UFRGS, por disponibilizarem a infraestrutura necessária para os ensaios e medições. Em especial, ao técnico do LAUS, Guilherme Vargas Schirmer, pelo auxílio técnico, dicas valiosas para a experimentação e solicitude.

Aos colegas da pós-graduação, especialmente à Ma. Andressa Caroline da Silva Carvalho, Me. Bruno Santana Sória, Eng. Matheus Polly e Eng. Rafael Farias Garcia, pelo companheirismo, amizade, auxílio, conversas e momentos de descontração.

Ao Instituto Federal Sul-rio-grandense, campus Passo Fundo, pela disponibilização dos laboratórios e infraestrutura para a realização de ensaios e medições. Aos colegas da instituição, especialmente ao Dr. Albino Moura Guterres, Dr. Alexandre Pitol Boeira, Me. Alexsander Furtado Carneiro, Me. Claudio André Lopes de Oliveira, Dra. Maria Carolina Fortes e Me. Sandro Clodoaldo Machado, pela amizade e por todo o auxílio dispensado.

Aos meus pais, Adayr e Vera, pelo amor incondicional, pela vida, ensinamentos, oportunidades e por mostrar o valor do trabalho e da honestidade. À minha irmã, Letícia, pela ajuda e torcida. À minha esposa, Simone, pelo amor, companheirismo, cumplicidade e compreensão.

A todos que, direta ou indiretamente, auxiliaram nesse trabalho.

A Deus.

## RESUMO

As características únicas das ligas de titânio, como alta resistência mecânica a temperaturas elevadas, baixa densidade, excelente resistência à corrosão e biocompatibilidade tornam esse material adequado para várias finalidades. Entretanto, as mesmas propriedades físicas e químicas que proporcionam tais características também comprometem sua usinabilidade. Muitas aplicações requerem acabamento ótimo da superfície usinada, enquanto que as preocupações acerca dos impactos negativos causados pelo uso de fluidos de corte direcionam as pesquisas na busca da redução ou eliminação do seu uso. Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho foi avaliar a rugosidade média ( $R_a$ ) e altura máxima média do perfil ( $R_z$ ) no torneamento de acabamento em titânio comercialmente puro grau 4 em um contexto ambientalmente amigável. A usinagem foi realizada com inserto de metal-duro revestido e sob três condições de lubrificação: a seco, com mínima quantidade de lubrificante (MQL) e com quantidade reduzida de lubrificante (RQL). Três níveis de avanço, profundidade de corte e velocidade de corte foram combinados em um projeto de experimentos Box-Behnken. Equações de regressão estabeleceram a relação entre os parâmetros controláveis e as variáveis de resposta, ao passo que a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) possibilitou otimizar o experimento com vistas a minimizar a rugosidade. Conforme esperado, a análise estatística mostrou que o avanço é o parâmetro que mais afeta o acabamento, devendo ser mantido em nível baixo com vistas a melhorar a qualidade da superfície usinada. Menores valores de rugosidade foram alcançados com nível baixo de velocidade de corte e profundidade de corte no torneamento com RQL, enquanto que são necessários níveis mais altos desses parâmetros de corte para a usinagem a seco e com MQL. A otimização experimental através da função *desirability* atestou que a usinagem com RQL é a melhor alternativa para o torneamento de acabamento do titânio comercialmente puro grau 4 por proporcionar bom acabamento da superfície usinada, conforme demonstrado nos testes de validação da otimização. Além disso, o emprego de fluido de corte em quantidade reduzida torna essa condição uma alternativa ambientalmente viável em comparação à refrigeração com fluido em abundância.

Palavras-chave: Titânio comercialmente puro; Usinagem ambientalmente amigável; Mínima quantidade de lubrificante; Quantidade reduzida de lubrificante; Rugosidade.

## ABSTRACT

The unique properties of titanium alloys, such as high mechanical strength at high temperatures, low density, excellent corrosion resistance, and biocompatibility make this material suitable for various purposes. However, the physical and chemical properties of titanium alloys impair its machinability. Many applications require an optimal surface finish, while research seeks to reduce or eliminate the use of the cutting fluids because of their negative impacts. Thus, the aim of this work was to evaluate the average surface roughness ( $R_a$ ) and average maximum profile height ( $R_z$ ) in commercially pure titanium grade 4 finish turning in an environmentally friendly perspective. The machining was carried out with a coated-carbide tool under three lubricating conditions: dry machining, minimum quantity of lubrication (MQL) and reduced quantity of lubrication (RQL). Three levels of feed rate, depth of cut and cutting speed were combined in a Box-Behnken design of experiments. Regression equations established the relationship between the controllable parameters and the response variables. The minimization of the surface roughness was achieved with the optimization of the experiment through Response Surface Methodology (RSM). Statistical analysis showed that the feed rate is the cutting parameter that most affects the finishing, and should be kept at low level to improve the surface quality. Lower surface roughness values were achieved with low cutting speed and depth of cut in RQL turning, as well as higher levels of cutting speed and depth of cut are required for dry and MQL machining. Experimental optimization through the desirability function proved that RQL turning is the best alternative for commercially pure titanium grade 4 finish turning because it provides good machined surface finish, as demonstrated in the optimization validation tests. Moreover, the reduced quantity of cutting fluid makes this lubricating condition an environmentally friendly machining strategy compared to flood coolant condition.

Keywords: Commercially pure titanium; Environmentally friendly machining; Minimum quantity lubrication; Reduced quantity lubrication; Surface roughness.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Objetivo geral .....	2
1.2	Objetivos específicos .....	3
1.3	Estrutura do trabalho .....	3
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
2.1	Titânio e suas ligas .....	4
2.1.1	Titânio comercialmente puro .....	6
2.2	Usinagem de titânio .....	7
2.2.1	Parâmetros de corte .....	10
2.2.2	Ferramentas de usinagem .....	12
2.3	Usinagem ambientalmente amigável (EFM) .....	15
2.3.1	Métodos de lubrificação .....	17
2.4	Acabamento da superfície usinada .....	21
2.5	Análise estatística experimental .....	27
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
3.1	Corpos de prova e equipamentos de caracterização .....	35
3.2	Máquina-ferramenta e ferramenta de corte .....	37
3.3	Meios lubrificantes .....	38
3.4	Projeto de experimentos .....	39
3.5	Medição da rugosidade .....	40
3.6	Análise dos dados .....	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>43</b>
4.1	Relação entre parâmetros de corte e rugosidade .....	43
4.1.1	Usinagem a seco .....	50
4.1.2	Usinagem com MQL .....	52
4.1.3	Usinagem com RQL .....	55
4.2	Análise comparativa dos perfis de rugosidade .....	58

4.3	Otimização do experimento .....	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>70</b>
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	71
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>73</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Morfologia dos cavacos de Ti para as mesmas condições de corte ( $v_c = 87,96$ m/min; $f = 0,2$ mm/rev.; $a_p = 0,2$ mm) [Li e Xu, 2017] .....	9
Figura 2.2	Cavacos segmentados na usinagem de Ti-CP Gr. 2 [adaptado de Gu, 2018] .....	9
Figura 2.3	Formação da aresta postiça de corte durante a usinagem [adaptado de Ferraresi, 1970] .....	11
Figura 2.4	Fatores que afetam a fabricação sustentável e seus níveis desejados [adaptado de Fratila, 2013] .....	16
Figura 2.5	Sistema MQL: (a) Princípio de funcionamento; (b) Aplicação externa; (c) Aplicação interna [(a) adaptado de Astakhov, 2008; (b)(c) Stephenson e Agapiou, 2016] .....	19
Figura 2.6	Forma, ondulação e rugosidade de uma superfície [adaptado de Stephenson e Agapiou, 2016] .....	22
Figura 2.7	Alguns parâmetros de rugosidade definidos pela norma DIN EN ISO 4287 [adaptado de DIN EN ISO 4287, 2010, e Stephenson e Agapiou, 2016] .....	23
Figura 2.8	Definição da altura máxima média do perfil $R_z$ [adaptado de Stephenson e Agapiou, 2016] .....	25
Figura 2.9	Representação esquemática do perfil geométrico da rugosidade no torneamento [adaptado de Stephenson e Agapiou, 2016] .....	26
Figura 2.10	Representação de um processo ou sistema [adaptado de Montgomery, 2013] ..	28
Figura 2.11	Representação de um projeto Box-Behnken de três fatores [Montgomery, 2013] .....	31
Figura 3.1	Desenho esquemático do corpo de prova utilizado no experimento .....	35
Figura 3.2	Equipamentos utilizados para caracterização do material: (a) espectrômetro de emissão óptica Bruker Q2 ION; (b) durômetro analógico Panambra RASN-RB .....	36
Figura 3.3	Desenho dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração (dimensões em mm, exceto indicação contrária) [adaptado de ISO 6892-1, 2016] .....	36
Figura 3.4	Equipamentos utilizados para caracterização do material: (a) máquina universal para ensaio de tração Emic DL-3000; (b) torno CNC Romi Centur 30D .....	37
Figura 3.5	(a) Torno CNC Mazak QTN 100-II; (b) inserto TNMG 160404-SF 1105 .....	38
Figura 3.6	Esquema experimental: (a) montagem do experimento para uso com MQL/RQL; (b) posição do bico aspersor .....	39
Figura 3.7	Medição da rugosidade: (a) rugosímetro; (b) procedimento de medição .....	41
Figura 4.1	Gráficos de probabilidade normal para: (a) $R_a$ ; (b) $R_z$ .....	45
Figura 4.2	Gráficos de resíduos <i>versus</i> ordem de observação dos dados para: (a) $R_a$ ; (b) $R_z$ .....	45
Figura 4.3	Gráficos de resíduos <i>versus</i> rugosidade para: (a) $R_a$ ; (b) $R_z$ .....	46

Figura 4.4	Comparação entre valores experimentais e previstos de rugosidade na usinagem a seco .....	47
Figura 4.5	Comparação entre valores experimentais e previstos de rugosidade na usinagem com MQL .....	47
Figura 4.6	Comparação entre valores experimentais e previstos de rugosidade na usinagem com RQL .....	48
Figura 4.7	Gráficos de interação para $R_a$ .....	48
Figura 4.8	Gráficos de interação para $R_z$ .....	49
Figura 4.9	Gráficos de superfície de resposta para $R_a$ na usinagem a seco .....	50
Figura 4.10	Gráficos de superfície de resposta para $R_z$ na usinagem a seco .....	51
Figura 4.11	Gráficos de contorno de $v_c \times a_p$ na usinagem a seco para: (a) $R_a$ ; (b) $R_z$ .....	51
Figura 4.12	Gráficos de superfície de resposta para $R_a$ na usinagem com MQL .....	53
Figura 4.13	Gráficos de superfície de resposta para $R_z$ na usinagem com MQL .....	53
Figura 4.14	Gráficos de contorno de $v_c \times a_p$ na usinagem com MQL para: (a) $R_a$ ; (b) $R_z$ ..	53
Figura 4.15	Gráficos de superfície de resposta para $R_a$ na usinagem com RQL .....	55
Figura 4.16	Gráficos de superfície de resposta para $R_z$ na usinagem com RQL .....	55
Figura 4.17	Gráficos de contorno de $v_c \times a_p$ na usinagem com RQL para: (a) $R_a$ ; (b) $R_z$ ..	55
Figura 4.18	Perfil de rugosidade da amostra 1 na usinagem a seco ( $v_c = 80$ m/min; $f = 0,08$ mm/rev.; $a_p = 0,35$ mm) .....	58
Figura 4.19	Perfil de rugosidade da amostra 1 na usinagem com MQL ( $v_c = 80$ m/min; $f = 0,08$ mm/rev.; $a_p = 0,35$ mm) .....	58
Figura 4.20	Perfil de rugosidade da amostra 1 na usinagem com RQL ( $v_c = 80$ m/min; $f = 0,08$ mm/rev.; $a_p = 0,35$ mm) .....	59
Figura 4.21	Possíveis causas de perturbações nos perfis de rugosidade: (a) cavaco enrolado na peça; (b) marcas na superfície .....	60
Figura 4.22	Perfil de rugosidade da amostra 7 na usinagem a seco ( $v_c = 160$ m/min; $f = 0,15$ mm/rev.; $a_p = 0,35$ mm) .....	61
Figura 4.23	Perfil de rugosidade da amostra 7 na usinagem com MQL ( $v_c = 160$ m/min; $f = 0,15$ mm/rev.; $a_p = 0,35$ mm) .....	61
Figura 4.24	Perfil de rugosidade da amostra 7 na usinagem com RQL ( $v_c = 160$ m/min; $f = 0,15$ mm/rev.; $a_p = 0,35$ mm) .....	61
Figura 4.25	Perfil de rugosidade da amostra 2 na usinagem a seco ( $v_c = 240$ m/min; $f = 0,22$ mm/rev.; $a_p = 0,35$ mm) .....	62
Figura 4.26	Perfil de rugosidade da amostra 2 na usinagem com MQL ( $v_c = 240$ m/min; $f = 0,22$ mm/rev.; $a_p = 0,35$ mm) .....	62
Figura 4.27	Perfil de rugosidade da amostra 2 na usinagem com RQL ( $v_c = 240$ m/min; $f = 0,22$ mm/rev.; $a_p = 0,35$ mm) .....	63

Figura 4.28	Gráfico de otimização do experimento .....	64
Figura 4.29	Gráfico de otimização para a usinagem a seco .....	65
Figura 4.30	Gráfico de otimização para a usinagem com MQL .....	65
Figura 4.31	Perfil de rugosidade do teste de validação para a usinagem a seco ( $v_c = 240$ m/min; $f = 0,08$ mm/rev.; $a_p = 0,36$ mm) .....	68
Figura 4.32	Perfil de rugosidade do teste de validação para a usinagem com MQL ( $v_c = 240$ m/min; $f = 0,08$ mm/rev.; $a_p = 0,46$ mm) .....	68
Figura 4.33	Perfil de rugosidade do teste de validação para a usinagem com RQL ( $v_c = 80$ m/min; $f = 0,08$ mm/rev.; $a_p = 0,20$ mm) .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Comparação das ligas de titânio com base em suas propriedades [Peters et al., 2003a] .....	6
Tabela 2.2	Classificação do titânio comercialmente puro [Donachie Jr., 2000] .....	6
Tabela 2.3	Comparação das ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD [adaptado de Machado et al., 2015, e Sandvik, 2017] .....	14
Tabela 2.4	Principais métodos de lubrificação dentro da perspectiva de EFM [adaptado de Gupta e Laubscher, 2016, e Veiga et al., 2013] .....	18
Tabela 2.5	Valores recomendados para comprimentos de amostragem e de avaliação [DIN EN ISO 4288, 1998] .....	24
Tabela 2.6	Resumo dos principais trabalhos que utilizam análise estatística na avaliação da rugosidade no torneamento de titânio .....	33
Tabela 3.1	Composição química do Ti-CP Gr. 4 (% em massa) .....	37
Tabela 3.2	Propriedades mecânicas do Ti-CP Gr. 4 .....	37
Tabela 3.3	Parâmetros de corte iniciais recomendados para o inserto TNMG 160404-SF 1105 na usinagem de titânio [Sandvik, 2018] .....	38
Tabela 3.4	Fatores controláveis do experimento e seus respectivos níveis .....	40
Tabela 4.1	Matriz de experimentos Box-Behnken com os valores de rugosidade medidos	43
Tabela 4.2	ANOVA do torneamento de Ti-CP Gr. 4 .....	44
Tabela 4.3	Resultados da otimização experimental .....	64
Tabela 4.4	Resultados dos testes de validação da otimização .....	66

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANOVA	Análise de variância
APC	Aresta postiça de corte
ASB	Banda de cisalhamento adiabática ( <i>Adiabatic Shear Band</i> )
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBD	Projeto Box-Behnken ( <i>Box-Behnken Design</i> )
CBN	Nitreto de boro cúbico ( <i>Cubic Boron Nitride</i> )
CCC	Cúbico de corpo centrado
CCD	Projeto Composto Central ( <i>Central Composite Design</i> )
CVD	Deposição química de vapor ( <i>Chemical Vapour Deposition</i> )
DGUV	Seguro Estatal Alemão de Acidentes de Trabalho e Doenças Profissionais ( <i>Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung</i> )
DIN	Instituto Alemão para Normatização ( <i>Deutsches Institut für Normung</i> )
DOE	Projeto de Experimentos ( <i>Design of Experiments</i> )
EFM	Usinagem ambientalmente amigável ( <i>Environmentally Friendly Machining</i> )
FC	Fatores controláveis
Gr.	Grau do titânio comercialmente puro
HC	Hexagonal compacta
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LAUS	Laboratório de Automação em Usinagem
MQCL	Mínima quantidade de lubrificante refrigerado ( <i>Minimum Quantity Cooling Lubrication</i> )
ML	Mínima quantidade de lubrificante ( <i>Minimum Quantity Lubrication</i> )
NDM	Usinagem quase seca ( <i>Near-Dry Machining</i> )
PCD	Diamante sintético policristalino ( <i>Polycrystalline Diamond</i> )
PVD	Deposição física de vapor ( <i>Physical Vapour Deposition</i> )
RQL	Quantidade reduzida de lubrificante ( <i>Reduced Quantity Lubrication</i> )
RSM	Metodologia de Superfície de Resposta ( <i>Response Surface Methodology</i> )
SNR	Relação sinal/ruído no projeto experimental Taguchi ( <i>Signal-to-Noise Ratio</i> )
TiAlN	Nitreto de titânio-alumínio
Ti-CP	Titânio comercialmente puro
VR	Variáveis de resposta

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos latinos

$a_p$	Profundidade de corte [mm]
$d$	Função <i>desirability</i> de otimização experimental
$D$	Função <i>overall desirability</i> de otimização experimental
$f$	Avanço por volta [mm/rev.]
$F$	Estatística de teste que segue a distribuição $F$
$k$	Número de variáveis/fatores controláveis da equação de regressão
$l_n$	Comprimento de avaliação [mm]
$l_r$	Comprimento de amostragem ou <i>cut-off</i> [mm]
$N$	Número total de ensaios requeridos em um projeto experimental
$n_c$	Número de pontos centrais em um projeto experimental
$P$	Abordagem estatística do valor $P$
$R^2$	Coefficiente de determinação
$R_{aj}^2$	Coefficiente de determinação ajustado
$r_\epsilon$	Raio de ponta da ferramenta [mm]
$R_a$	Rugosidade média [ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	Altura máxima média de perfil [ $\mu\text{m}$ ]
$s$	Desvio padrão amostral
$v_c$	Velocidade de corte [m/min]
$x$	Eixo de medição de rugosidade [mm]
$x_{i,j}$	Fatores controláveis do experimento
$Z_p$	Altura de pico de um perfil [ $\mu\text{m}$ ]
$Z_t$	Altura de um elemento do perfil [ $\mu\text{m}$ ]
$Z_v$	Profundidade do vale de um perfil [ $\mu\text{m}$ ]

### Símbolos gregos

$\alpha$	Fase do titânio com estrutura HC e elementos de liga estabilizadores dessa fase
$\beta$	Fase do titânio com estrutura CCC e elementos de liga estabilizadores dessa fase
$\beta_0$	Ponto de intersecção da curva com o plano na equação de regressão
$\beta_{i(i,j)}$	Coefficientes de regressão
$\gamma_o$	Ângulo de saída da ferramenta [ $^\circ$ ]
$\epsilon$	Erro aleatório experimental

$\sigma_e$	Limite de resistência ao escoamento [MPa]
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Limite de resistência à tração [MPa]
$\chi_r$	Ângulo de posição principal da ferramenta [°]

# 1 INTRODUÇÃO

Ligas de titânio estão entre os melhores materiais para aplicações nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, marítima, petroquímica, médica, nuclear e de geração de energia devido às suas propriedades inerentes como elevada relação resistência/densidade, elevada resistência à fadiga e ao escoamento, resistência a altas temperaturas, biocompatibilidade e excelente resistência à corrosão. Porém, as mesmas propriedades físicas e químicas que tornam esse material desejável para uma série de aplicações também comprometem sua usinabilidade. Devido às altas dureza e resistência, temperaturas elevadas são geradas na usinagem. Como essas ligas têm baixa condutividade térmica, o calor gerado não é dissipado pelo cavaco, sendo retido pela ferramenta e provocando sua falha prematura. O baixo módulo de elasticidade desse material causa grandes deflexões na peça, que podem resultar em vibrações na ferramenta e baixa qualidade da superfície usinada [Khan e Maity, 2018; Revuru et al., 2017].

A rugosidade é tanto um parâmetro a ser considerado na estimativa da qualidade tecnológica de um componente quanto um indicador para avaliação da produtividade de máquinas-ferramenta e peças usinadas. Geralmente define-se um valor de rugosidade desejável para um produto com vistas a alcançar requisitos necessários de resistência à fadiga e à corrosão, ajustes de precisão e aspectos estéticos e tribológicos. Nesse sentido, a medição e a caracterização da qualidade da superfície usinada pode ser considerada como um tradutor do desempenho da usinagem [Revankar et al., 2014]. A diminuição da rugosidade é normalmente um tópico de interesse na usinagem de ligas de titânio. O acabamento em peças torneadas desse material é afetado por diferentes variáveis, como parâmetros de corte (avanço, velocidade de corte e profundidade de corte); geometria, revestimento e desgaste da ferramenta; temperatura; e formação de aresta postiça de corte. Esses efeitos estão presentes principalmente devido a esforços mecânicos e térmicos, transformações microestruturais e deformações mecânicas e térmicas ocorridas durante os processos de usinagem [Niknam et al., 2014].

A temperatura é um dos principais fatores associado a danos em ferramentas, erros dimensionais e baixa qualidade da superfície usinada [Islam et al., 2013]. A refrigeração abundante, que utiliza grandes quantidades de fluido na zona de corte, é amplamente utilizada para remoção do calor do processo de usinagem. Contudo, os fluidos de corte são ambientalmente prejudiciais e levam a altos custos de manutenção, descarte e reciclagem. As preocupações acerca dos impactos negativos e regulamentações sobre contaminação e poluição ambientais cada vez mais rigorosas têm levado as empresas a explorar novas soluções para reduzir ou eliminar completamente o uso de fluidos de corte convencionais em favor de

estratégias de lubrificação mais eficientes e menos poluentes. Com a tendência de “usinagem verde”, técnicas ambientalmente ecológicas têm sido consideravelmente estudadas [Park et al., 2014; Sartori et al., 2018].

A usinagem a seco é a melhor solução do ponto de vista ambiental, já que elimina o fluido de corte do processo. Dentre suas vantagens estão a redução dos custos de usinagem, a ausência de poluição ambiental, a geração de cavacos sem resíduos contaminantes e a não agressão à saúde dos operadores. Todavia, a ausência de fluido acarreta maior geração de calor, menor vida útil da ferramenta em muitos casos e maior cuidado na escolha de ferramentas, as quais devem ter características específicas para trabalhar nessa condição [Dixit et al., 2012]. Essas desvantagens fazem com que a usinagem a seco não consiga proporcionar uma vida de ferramenta e acabamento adequados em muitas situações. Além disso, o alto calor gerado na zona de corte limita o uso de velocidades de corte mais altas. Na usinagem de titânio, esse fator é mais pronunciado, tendo em vista a baixa condutividade térmica e alta reatividade química do material, o que agrava os problemas supracitados [Shokrani et al., 2012; Veiga et al.; 2013].

Uma alternativa à ausência de fluido ou à refrigeração em abundância é a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), em que pequenas quantidades de lubrificante atomizado são direcionadas à zona de corte através de uma mistura de ar e óleo na forma de aerossol [Astakhov, 2008]. Os principais benefícios do uso de MQL são a redução do consumo de fluido de corte, redução de custos, mitigação do impacto ambiental e desempenho geral melhorado nas operações de usinagem e na qualidade da superfície usinada [Debnath et al., 2014]. Em termos de eficácia, esse método tem mostrado grande potencial em processos tradicionais de fabricação como torneamento, fresamento e furação, melhorando aspectos relativos a desgaste de ferramenta, rugosidade, temperatura e forças de corte. Tal melhoria também foi verificada na usinagem de ligas de difícil corte, como é o caso do titânio [Boswell et al., 2017; Gupta e Laubscher, 2016; Revuru et al., 2017].

Embora haja uma tendência crescente de emprego de técnicas de usinagem sustentáveis, a maioria dos estudos relativos à fabricação de titânio focados nesse aspecto empregam um número limitado de ligas, pesquisando principalmente a liga Ti-6Al-4V. Existem pouquíssimos trabalhos na literatura relacionados ao titânio comercialmente puro [Gupta e Laubscher, 2016].

## 1.1 Objetivo geral

Diante do exposto, o presente trabalho tem o objetivo geral de avaliar o acabamento da superfície usinada em termos da rugosidade média ( $R_a$ ) e altura máxima média do perfil ( $R_z$ )

no torneamento de acabamento em titânio comercialmente puro grau 4 (Ti-CP Gr. 4) sob diferentes condições de lubrificação, com vistas a encontrar os melhores parâmetros que assegurem boa qualidade da superfície usinada dentro de uma perspectiva de usinagem ambientalmente amigável.

## 1.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- testar diferentes combinações de parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e meios lubrificantes (seco, MQL e RQL) na usinagem de Ti-CP Gr. 4, de forma a verificar sua influência sobre a rugosidade;
- avaliar estatisticamente a influência dos fatores controláveis sobre a resposta;
- otimizar o experimento, identificando os parâmetros de usinagem ótimos para o melhor acabamento possível da superfície;
- comprovar a viabilidade do uso de métodos ambientalmente amigáveis no torneamento de acabamento em Ti-CP Gr. 4.

## 1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi organizado em cinco capítulos:

- Capítulo 1 – introdução: faz uma breve contextualização do tema abordado, bem como da justificativa e objetivos do trabalho;
- Capítulo 2 – referencial teórico: apresenta os tópicos mais relevantes ao entendimento do objeto de pesquisa, destacando aspectos relacionados às características do titânio e sua usinabilidade, bem como tópicos relacionados à sustentabilidade da usinagem, ao acabamento da superfície usinada e à análise e planejamento estatístico experimental;
- Capítulo 3 – materiais e métodos: aborda os materiais, procedimentos e equipamentos utilizados para a caracterização e preparação do material de trabalho, assim como para a realização dos ensaios experimentais e análise dos resultados;
- Capítulo 4 – resultados e discussão: apresenta os resultados obtidos na experimentação, analisando-os estatisticamente e à luz da literatura do torneamento de titânio;
- Capítulo 5 – conclusões: capítulo de encerramento contendo as conclusões obtidas a partir do objeto de pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção abrange temas relevantes ao embasamento teórico do trabalho realizado. Sob esse aspecto, são abordados tópicos relativos à classificação, características principais e usinagem das ligas de titânio (com ênfase no processo de torneamento), à aplicação de técnicas de usinagem ambientalmente amigáveis, à qualidade da superfície usinada e à utilização da estatística no delineamento e análise experimental.

### 2.1 Titânio e suas ligas

O titânio (Ti) é o nono elemento e o quarto material estrutural mais abundante da crosta terrestre, sendo superado somente pelo alumínio, ferro e magnésio. Ele normalmente é extraído dos minerais ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) e rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) e dificilmente é encontrado em grandes quantidades. Essa característica, aliada à dificuldade na sua extração e processamento, tornam-no um material de alto custo [Peters et al., 2003a].

Dentre as principais propriedades que tornam o titânio atrativo para uma ampla gama de aplicações, destacam-se a elevada resistência mecânica (a qual é mantida em altas temperaturas), baixa densidade, excelente resistência à corrosão e biocompatibilidade. A indústria aeroespacial foi a pioneira no uso desse material, aproveitando-se sobretudo das duas primeiras propriedades citadas. Entretanto, diversas outras áreas também foram beneficiadas, como as indústrias química, petroquímica, de geração de energia, naval, automobilística, da construção civil, esportes e lazer, biomédica, odontológica, de segurança e proteção, dentre outras [Lütjering e Williams, 2007; Peters e Leyens, 2003b].

O titânio é um material alotrópico. A baixas temperaturas, sua estrutura cristalina é do tipo hexagonal compacta (HC), a qual recebe o nome de fase  $\alpha$ . No titânio puro, essa estrutura transforma-se em cúbica de corpo centrado (CCC) a 882 °C, sendo chamada de fase  $\beta$ . A temperatura exata de transição  $\beta$  é fortemente influenciada pelos elementos de liga presentes no material. Dependendo da influência na temperatura de transformação alotrópica, esses elementos são classificados como neutros, estabilizadores  $\alpha$  ou estabilizadores  $\beta$ . Os elementos neutros, como estanho (Sn) e zircônio (Zr), têm influência mínima na temperatura de transição. Os estabilizadores  $\alpha$  aumentam a temperatura de transformação com o incremento da quantidade de soluto dessa fase. O alumínio (Al) é o mais importante deles, mas outros elementos, como carbono (C), nitrogênio (N) e oxigênio (O), também são largamente utilizados. Os elementos estabilizadores  $\beta$  diminuem a temperatura de transformação dessa fase e são divididos em dois grupos, dependendo dos detalhes do diagrama de fases binário resultante:  $\beta$

isomorfos, cujos elementos mais comuns são vanádio (V), molibdênio (Mo) e nióbio (Nb), e  $\beta$  eutetóides, destacando-se os elementos cromo (Cr), ferro (Fe) e silício (Si) [Lütjering e Williams, 2007; Peters et al., 2003a].

A classificação das ligas comerciais de titânio baseia-se na microestrutura do material. Essas ligas são usualmente classificadas em três categorias, de acordo com o percentual dos elementos estabilizadores constituintes:  $\alpha$ ,  $\alpha + \beta$  e  $\beta$ . Também é comum uma subdivisão em ligas “quase  $\alpha$ ” e ligas  $\beta$  metaestáveis. As características gerais de cada liga são dadas a seguir, tendo por base os trabalhos de Balazic et al., 2007, e Peters et al., 2003a.

As ligas  $\alpha$  compreendem o titânio comercialmente puro (Ti-CP) e demais ligas cujos elementos são exclusivamente estabilizadores  $\alpha$  ou neutros. São adequadas para aplicações a baixas temperaturas, por não apresentar transição dúctil-frágil, e também a altas temperaturas, pela alta resistência à fluência. Essas ligas não são passíveis de tratamento térmico, possuem moderada resistência mecânica, boa tenacidade à fratura e baixa forjabilidade. A adição de uma pequena fração de estabilizadores  $\beta$  configura uma pequena mudança nas características da liga, a qual algumas vezes é classificada como liga “quase  $\alpha$ ”.

Ligas  $\beta$  são obtidas quando uma grande quantidade de estabilizadores  $\beta$  é adicionada ao titânio. Se a proporção desses elementos aumenta ao ponto em que  $\beta$  não se transforma mais em martensita após têmpera rápida, as ligas são chamadas de  $\beta$  metaestáveis devido à presença de fase  $\beta$  residual na microestrutura. De acordo com Lütjering e Williams, 2007, a expressão “ligas  $\beta$ ” é usada para designar as ligas da fase  $\beta$  metaestável, uma vez que as ligas localizadas na região da fase  $\beta$  monofásica não existem como material comercial. As ligas  $\beta$  são passíveis de tratamento térmico, são frágeis a temperaturas criogênicas e não são apropriadas para altas temperaturas de trabalho devido à baixa resistência à fluência.

Por fim, as ligas  $\alpha + \beta$  incluem todas as ligas com estabilizadores  $\alpha$  e  $\beta$  suficientes para expandir a região  $\alpha + \beta$  à temperatura ambiente. O volume de estabilizadores  $\beta$  dessa região varia entre 5 a 40%. A combinação das fases permite reunir as melhores características de ambas e as propriedades mecânicas também podem ser melhoradas pela aplicação de tratamentos térmicos e processamento termomecânico. Devido a sua grande disponibilidade, excelente trabalhabilidade e melhor comportamento mecânico a baixas temperaturas, ligas  $\alpha + \beta$  são as mais utilizadas entre as ligas de titânio.

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação entre as três classes gerais de ligas de titânio com base nas suas propriedades físicas, mecânicas e tecnológicas.

Tabela 2.1 – Comparação das ligas de titânio com base em suas propriedades

	$\alpha$	$\alpha + \beta$	$\beta$
Densidade	+	+	-
Resistência	-	+	++
Ductilidade	-/+	+	+/-
Tenacidade à fratura	+	-/+	+/-
Resistência à fluência	+	+/-	-
Comportamento de corrosão	++	+	+/-
Comportamento de oxidação	++	+/-	-
Soldabilidade	+	+/-	-
Capacidade de deformação a frio	--	-	-/+

Fonte: Peters et al., 2003a.

### 2.1.1 Titânio comercialmente puro

O titânio comercialmente puro (Ti-CP) tem a menor resistência mecânica, mas apresenta a maior resistência à corrosão dentre as ligas de titânio. Esse material é classificado em quatro graus pela norma ASTM F67, os quais diferem entre si pela quantidade de impurezas que estão contidas na estrutura. A diferença básica entre essas classes é o percentual de Fe e O presentes, sendo esse último o principal elemento regulador da resistência mecânica [Donachie Jr., 2000]. Contudo, Boyer et al., 2007, afirmam que a classificação do Ti-CP deve levar em conta não só a composição química, mas também as propriedades mecânicas da liga, uma vez que pequenas adições de impurezas podem afetar tais propriedades de maneira relevante.

A Tabela 2.2 mostra os limites mínimos de resistência à tração ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ), de escoamento ( $\sigma_e$ ) com 0,2% de deformação e a composição química das classes de Ti-CP.

Tabela 2.2 – Classificação do titânio comercialmente puro

Classes	$\sigma_{m\acute{a}x}$	$\sigma_e$ 0,2%	Composição química (% peso) máx				
	MPa (mín)	MPa (mín)	N	C	H	Fe	O
Grau 1	240	170	0,03	0,08	0,015	0,20	0,18
Grau 2	340	280	0,03	0,08	0,015	0,30	0,25
Grau 3	450	380	0,05	0,08	0,015	0,30	0,35
Grau 4	550	480	0,05	0,08	0,015	0,50	0,40

Fonte: Donachie Jr., 2000.

O Ti-CP é usado em aplicações que necessitem resistência mecânica moderada combinada com boa capacidade de deformação e alta resistência à corrosão. Essa última é a propriedade que mais se destaca e é o principal critério de escolha desse material. Dentre as classes, o grau 1 possui a mais baixa resistência, mas tem excelente capacidade de deformação

a frio, ao passo que o grau 4 tem a mais alta resistência mecânica devido sobretudo à maior quantidade de oxigênio presente na estrutura cristalina, mantendo sua resistência a temperaturas moderadas [Boyer et al., 2007]. Entre as aplicações, o Ti-CP, juntamente com a liga  $\alpha + \beta$  Ti-6Al-4V, foram alguns dos primeiros materiais e ainda continuam a ser usados na área biomédica em implantes e próteses. As indústrias química, petrolífera e naval são algumas das que mais utilizam o Ti-CP em equipamentos como trocadores de calor, vasos criogênicos e componentes para processamento químico, por exemplo. Além disso, também há aplicações na indústria automotiva, aeronáutica e aeroespacial (componentes estruturais), odontológica (implantes), de construção civil (estrutura de edifícios), dentre outras [Lütjering e Williams, 2007; Peters e Leyens, 2003b; Peters et al, 2003b].

## 2.2 Usinagem de titânio

A usinabilidade é definida como a facilidade (ou dificuldade) com que um material pode ser usinado sob um dado conjunto de condições operacionais. Isso também pode ser descrito como uma medida da resposta do material a ser usinado com um determinado material de ferramenta, resultando em vida de ferramenta aceitável, ao mesmo tempo em que proporciona boa qualidade da superfície e características funcionais adequadas dos componentes [Ramesh et al., 2009]. As propriedades físicas e químicas do titânio, embora tornem esse material adequado para uma ampla gama de aplicações, também fazem com que ele seja reconhecido pela baixa usinabilidade. Dentre as características que dificultam sua usinagem, destacam-se [Ezugwu et al., 2003; Gupta e Laubscher, 2016; Pramanik, 2013; Veiga et al., 2013]:

- baixa condutividade térmica: essa característica atua concentrando o calor na zona de corte, criando altos gradientes de temperatura que levam a um rápido desgaste da ferramenta e que, em alguns casos, podem causar sua falha catastrófica;
- alta reatividade química: a alta reatividade química do Ti com outros materiais, especialmente em elevadas temperaturas, causa adesão localizada na ferramenta que provoca aumento do desgaste, lascamento e eventual falha da ferramenta, além de formar aresta postiça de corte (APC) instável que deteriora o acabamento da peça. Essa afinidade também facilita a difusão intersticial de nitrogênio e oxigênio na estrutura do material, contribuindo parcialmente para o endurecimento da superfície e encruamento do Ti;
- dureza e resistência: a alta dureza a quente e alta resistência mecânica das ligas de Ti geram altas forças de usinagem que resultam em deformação da ferramenta. Além disso, a alta resistência ao cisalhamento dinâmico durante o corte resulta em tensões de cisalhamento

localizadas e cavacos segmentados que geram forças dinâmicas cíclicas devido à variação da espessura e largura do cavaco, causando baixa qualidade da superfície usinada, *chatter*<sup>1</sup> e ruptura na ponta da ferramenta;

- baixo módulo de elasticidade: implica em grandes deflexões da peça durante a usinagem, aumentando a vibração, *chatter* e o atrito, prejudicando o acabamento;
- encruamento: aumenta o ângulo de cisalhamento, produzindo um cavaco muito fino, com consequente área de contato com a ferramenta muito pequena, causando altas tensões na ponta do inserto. Essa característica, aliada a baixa condutividade térmica, faz aumentar a temperatura do material, favorecendo a rápida falha da ferramenta.

O tipo do cavaco formado também tem influência na usinabilidade, bem como no acabamento da superfície usinada. Atribui-se a formação de cavacos segmentados na usinagem do Ti, os quais apresentam-se na forma macroscopicamente contínua e que consistem em estreitas bandas de material altamente deformadas entre segmentos com pouca ou quase nenhuma deformação. Esse tipo de cavaco é formado quando as altas temperaturas geradas em função da deformação proveniente da usinagem, aliadas à baixa condutividade térmica do titânio, provocam amolecimento térmico localizado que diminui a resistência mecânica do material. Com isso, são formadas bandas de cisalhamento adiabáticas (ASB) com resistência menor que o material ao seu redor, o que leva a deformações localizadas e à morfologia característica desse tipo de cavaco. A ocorrência de ASB pode causar grandes variações nas forças de corte e induzir *chatter*, o que provoca problemas de usinagem e prejuízo à qualidade da superfície usinada [Machado et al., 2015; Stephenson e Agapiou, 2016].

O mecanismo do cisalhamento adiabático é dependente das condições de corte e propriedades do material da peça. Sobre esses aspectos, Li e Xu, 2017, compararam a morfologia dos cavacos de titânio comercialmente puro grau 2 (Ti-CP Gr. 2) e Ti-6Al-4V sob velocidades de corte ( $v_c$ ) entre 34,5 m/min e 141,37 m/min. Eles concluíram que os cavacos de Ti-CP Gr. 2 são aproximadamente contínuos e que não há ocorrência aparente de ASB, ao passo que os cavacos de Ti-6Al-4V são segmentados (Figura 2.1). Esses autores atestaram que a presença de impurezas na liga Ti-6Al-4V faz com que ela tenha, aproximadamente, uma resistência mecânica 2 vezes maior e uma condutividade térmica 2,8 vezes menor do que o Ti-

---

<sup>1</sup> *Chatter* é um tipo de vibração instável autoexcitada frequentemente induzida por variações nas forças de corte (causadas por mudanças na velocidade de corte ou na seção do cavaco), a qual aumenta em amplitude ao longo do tempo. Esse tipo de vibração nunca é desejável, pois pode causar desgaste acelerado da máquina-ferramenta, baixa qualidade da superfície usinada e falha catastrófica da ferramenta [Stephenson e Agapiou, 2016].

CP Gr. 2, o que influencia sobremaneira na morfologia do cavaco. A maior condutividade térmica do Ti-CP Gr. 2 facilitaria a dissipação do calor gerado, de modo que a temperatura necessária ao amolecimento térmico do material não fosse atingida e não haveria a ocorrência de ASB, formando cavaco contínuo. No entanto, Gu, 2018, atestou a formação de cavaco em fita somente para pequenas velocidades de corte ( $v_c$ ) e avanços ( $f$ ) no torneamento de Ti-CP Gr. 2, ao passo que o aumento desses parâmetros promove a formação de cavacos segmentados, podendo, inclusive, provocar a separação de cada segmento do cavaco se a  $v_c$  for extremamente elevada (acima de 1600 m/min), como mostrado na Figura 2.2.

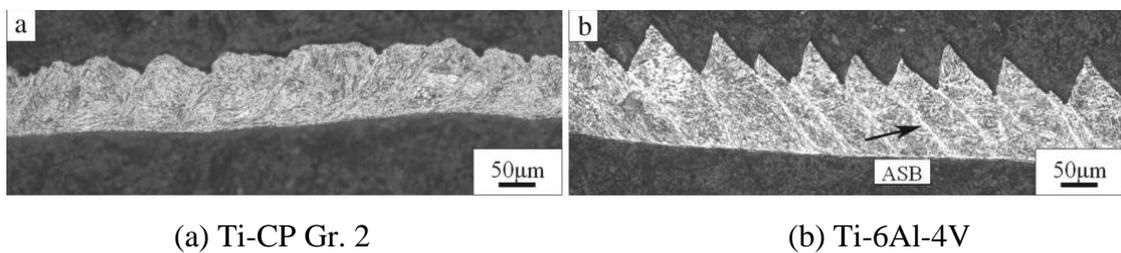


Figura 2.1 – Morfologia dos cavacos de Ti para as mesmas condições de corte ( $v_c = 87,96$  m/min;  $f = 0,2$  mm/rev.;  $a_p = 0,2$  mm) [Li e Xu, 2017]

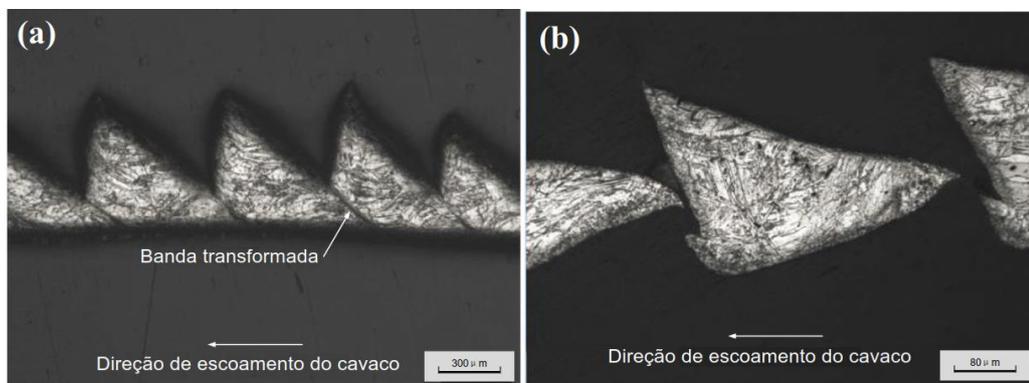


Figura 2.2 – Cavacos segmentados na usinagem de Ti-CP Gr. 2 [adaptado de Gu, 2018]

Para minimizar as dificuldades mencionadas, as pesquisas sobre usinagem de titânio foram direcionadas em quatro tópicos de interesse: (1) desenvolvimento de novos materiais de ferramenta; (2) melhoramento dos projetos de ferramentas existentes; (3) condução de estudos extensivos de usinabilidade visando verificar as combinações apropriadas de ferramentas, máquinas e parâmetros de corte e; (4) desenvolvimento e implementação de processos de usinagem híbridos avançados [Niknam et al., 2014]. A abordagem tradicional da usinagem de titânio sugere algumas recomendações gerais para um processo de fabricação bem-sucedido [Donachie Jr., 2000; Peters e Leyens, 2003a; Stephenson e Agapiou, 2016]:

- a peça de trabalho deve ser tão curta quanto possível e as máquinas e dispositivos de fixação devem ser rígidos para tornar o corte estável, minimizando vibrações;
- ferramentas afiadas devem ser utilizadas e substituídas nos primeiros sinais de desgaste, pois sua falha acontece rapidamente após o desgaste inicial;
- é necessária a aplicação de grandes quantidades de fluido de corte para promover a dissipação do calor produzido na usinagem;
- baixa velocidade de corte ( $v_c$ ) deve ser usada para controlar as temperaturas geradas e maximizar a vida da ferramenta;
- alto avanço ( $f$ ) deve ser utilizado, pois a temperatura de usinagem é menos afetada pelo  $f$  do que pela  $v_c$ . Além disso, conforme Ezugwu e Wang, 1997, maior  $f$  proporciona aumento de produtividade, o que compensaria um pouco a diminuição da  $v_c$ ;
- a profundidade de corte ( $a_p$ ) de cada passe sucessivo deve ser maior do que a profundidade da camada endurecida por deformação (encruada) do passe anterior;
- ferramentas com ângulos de saída e inclinação positivos e ângulo de folga adequado devem ser usadas, sobretudo em torneamento de acabamento, por favorecer a formação e o escoamento de cavacos e evitar a formação de aresta postiça de corte (APC).

Aliados à abordagem tradicional de usinagem, outros métodos também têm sido investigados mais recentemente no intuito de incrementar a produtividade, buscando minimizar os problemas inerentes à fabricação de peças em Ti. Dentre eles, destacam-se o emprego de *kit* de análise de vibração; usinagem termicamente assistida; uso de meios de refrigeração alternativos, como refrigeração a alta pressão e criogênica; uso de ferramentas e suportes com maior condutividade térmica; usinagem híbrida (combina várias técnicas em uma mesma operação); e adoção de operações extras (visa eliminar ou minimizar problemas decorrentes de deflexão da peça ou tensões residuais provenientes da usinagem) [Pramanik e Littlefair, 2015].

### 2.2.1 Parâmetros de corte

Mesmo com a adoção de estratégias avançadas, a seleção apropriada dos parâmetros de corte na usinagem com ferramentas de geometria definida é um dos pontos fundamentais para o sucesso na operação de corte do titânio. Como já mencionado, a abordagem tradicional de fabricação recomenda a adoção de baixas  $v_c$  e altos  $f$  e  $a_p$ , visando aliar um aumento de produtividade com a mitigação dos problemas decorrentes das propriedades do material.

Está consolidado na literatura que o aumento da  $v_c$  tem efeito pronunciado na redução

da vida útil da ferramenta, pois é o principal parâmetro responsável pelo aumento de temperatura na região de formação dos cavacos, o que acelera os mecanismos de desgaste. Essa é a razão pela qual a curva de vida de uma ferramenta é expressa em termos da velocidade de corte [Machado et al., 2015; Veiga et al., 2013]. Além disso, a baixa condutividade térmica do Ti faz com que a temperatura da usinagem não seja eficientemente dissipada pelo cavaco, ficando concentrada na ferramenta e favorecendo ainda mais sua deterioração. Por outro lado,  $v_c$  baixas e intermediárias podem favorecer a ocorrência de aresta postiça de corte (APC), na qual uma porção do cavaco se une à ferramenta por meio de ligações químicas devido à deformação e encruamento do material durante a usinagem (Figura 2.3). O material da peça adere à superfície de saída da ferramenta, o que tem efeito prejudicial ao acabamento da peça. Há um determinado valor de velocidade de corte em que a temperatura de corte aumenta ao ponto em que a APC é eliminada, pois a temperatura de recristalização do cavaco é ultrapassada e não há mais encruamento [Diniz et al., 2014]. Porém, como atestado por Trent, 1988, o fenômeno da APC ocorre somente em metais polifásicos, uma vez que a deformação intensa causada pela usinagem faz com que a tensão de escoamento desses materiais seja muito maior (e mantida a temperaturas mais altas) do que é possível atingir em metais puros. Por esse motivo, não há possibilidade de ocorrência de APC na usinagem de Ti-CP.

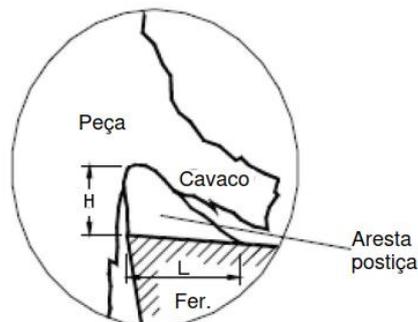


Figura 2.3 – Formação da aresta postiça de corte durante a usinagem [adaptado de Ferraresi, 1970]

Em termos de acabamento de peça de titânio torneada, a seleção das condições de corte pode vir de encontro ao preconizado pelo ponto de vista da produtividade. Alguns estudos (que serão citados posteriormente) demonstraram que a adoção de níveis mais altos de  $v_c$  podem melhorar o acabamento, assim como menores valores de avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ) tendem a proporcionar uma rugosidade mais baixa em detrimento da maior taxa de remoção de material. Por outro lado, conforme Diniz et al., 2014, a diminuição de  $f$  reduz a espessura do cavaco, tornando-o mais flexível (dúctil), o que dificulta sua quebra. Isso pode

gerar cavacos longos com tendência a enrolar na peça, danificando o acabamento da superfície usinada e, em alguns casos, causando a quebra da ferramenta. Isso é mais problemático em materiais como o titânio. Além disso, para um dado raio de ponta de ferramenta ( $r_\epsilon$ ), uma menor  $a_p$  faz com que o cavaco seja dobrado lateralmente, com grande ângulo de fluxo, o que também dificulta a sua quebra. Outrossim, conforme Sandvik, 2017, a força radial exercida sobre a peça (força passiva) aumenta quando  $r_\epsilon$  é maior que  $a_p$ , podendo causar vibração que compromete o acabamento. Dessa forma, a seleção dos parâmetros de corte requer um estudo criterioso para que proporcione as melhores condições de usinagem conforme os resultados desejados.

### 2.2.2 Ferramentas de usinagem

Segundo Pervaiz et al., 2014, o material da ferramenta de corte é o parâmetro mais básico que influencia a usinabilidade, não sendo possível conduzir eficientemente um processo de usinagem se o mesmo não for apropriado, mesmo que outros fatores sejam cuidadosamente monitorados. Para Machado et al., 2015, as principais propriedades desejáveis em uma ferramenta de corte são:

- alta dureza;
- tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- alta resistência ao desgaste abrasivo;
- alta resistência à compressão;
- alta resistência ao cisalhamento;
- boas propriedades térmicas e mecânicas em temperaturas elevadas;
- alta resistência ao choque térmico;
- alta resistência ao impacto;
- baixa afinidade química.

Tendo em vista os motivos que promovem a baixa usinabilidade das ligas de Ti, Gupta e Laubscher, 2016, afirmam que os parâmetros mais importantes na escolha de uma ferramenta para o processamento desse material são: alta dureza a quente, alta condutividade térmica (para minimizar os gradientes e choques térmicos), baixa afinidade química com o titânio e alta resistência compressiva e ao cisalhamento.

Levando em consideração essas variáveis, os materiais de ferramentas mais comumente utilizados na usinagem de Ti são diamante sintético policristalino (PCD), nitreto de boro cúbico (CBN) e metal-duro revestido e não revestido [Gupta e Laubscher, 2016; Pramanik, 2013].

Ferramentas de metal-duro são as mais amplamente utilizadas por possuírem boa combinação de dureza e tenacidade. Ferramentas de CBN são adequadas para usinagem de Ti devido a alta dureza a quente, mas são vulneráveis a quebra e lascamento devido a sua extrema dureza, o que deixa sua aplicação restrita a operações de acabamento. Além disso, esse material é reativo ao Ti, o que favorece o mecanismo de difusão. Ferramentas de diamante apresentam baixo desgaste na usinagem, mas são altamente reativas quanto a temperatura excede 700 °C e seu custo muito elevado é um limitante para sua ampla utilização. Ferramentas de cerâmica e de aço-rápido são pouco utilizadas devido à fragilidade da primeira e à baixa dureza a quente da segunda [Hosseini e Kishawy, 2014; Pervaiz et al., 2014].

O metal-duro é um produto da metalurgia do pó que consiste basicamente de partículas de carbonetos de tungstênio (WC) aglutinadas com um ligante rico em cobalto (Co), podendo haver a adição de outros elementos, como carbonetos de titânio, tântalo e nióbio. O tamanho de grão do WC e a quantidade de Co do ligante são os parâmetros mais importantes de ajuste da relação dureza/tenacidade de uma classe. O aumento do teor de Co e a diminuição do tamanho de grão de WC contribuem para aumentar a tenacidade do substrato. O refino do grão também contribui para o aumento da resistência da ferramenta (incrementando sua dureza a quente), redução da condutividade térmica para o interior da ferramenta e aumento da resistência da cunha de corte, além de proporcionar menor tendência à aderência em comparação às ferramentas com grãos convencionais. Assim, ferramentas de metal-duro de grãos finos são utilizadas para aplicações que requerem alta dureza a quente e alta resistência a microlascamentos, como é o caso da usinagem de aços inoxidáveis, superligas e titânio [Diniz et al., 2014; Machado et al., 2015; Rosa, 2017].

A aplicação de revestimentos em ferramentas também é um método bastante utilizado para incrementar sua vida útil e aumentar seu desempenho em termos de alta produtividade, da utilização de parâmetros de corte mais agressivos ou em situações de maior exigência da ferramenta, como na usinagem a seco e em materiais de difícil corte. Entre as vantagens do uso dos revestimentos, estão o aumento da dureza da superfície e da resistência ao desgaste da ferramenta; prevenção de reações químicas entre ferramenta e peça; redução da formação de aresta postiça de corte; diminuição do atrito entre ferramenta e cavaco ou entre ferramenta e peça, que reduz o calor gerado; prevenção da deformação da aresta de corte devido ao aquecimento excessivo; redução da parcela de calor que flui para a peça; aumento da resistência à oxidação e corrosão; e melhoria da qualidade da superfície de peças usinadas [Astakhov e Davim, 2008; Stephenson e Agapiou, 2016].

Os dois processos mais comuns utilizados para revestir as ferramentas são por deposição

química de vapor (CVD) e deposição física de vapor (PVD), os quais podem ser aplicados em camadas únicas ou múltiplas. No processo CVD, a ferramenta é aquecida em um forno e exposta a uma atmosfera gasosa específica, cuja reação química forma a camada de revestimento. No processo PVD, o material do revestimento é vaporizado e condensa na superfície da ferramenta [Sandvik, 2017; Stephenson e Agapiou, 2016]. A Tabela 2.3 apresenta as principais características de ambos os processos.

Tabela 2.3 – Comparação das ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD

Característica	Processo CVD	Processo PVD
Temperatura do processo	De 800 a 1100 °C	≅ 500 °C
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Aresta de corte	Requer arredondamento	Pode ser quina viva
Espessura do revestimento	De 4 a 20 μm	De 2 a 6 μm
Camadas	TiC-TiN, TiN-TiCN-TiN, TiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiN, Ti(C,N), (Ti,Al)N, (Ti,Al,Cr)N e óxidos de Al
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior resistência ao desgaste</li> <li>• Cobertura uniforme</li> <li>• Coberturas espessas</li> <li>• Ótima aderência ao substrato</li> <li>• Maior resistência à craterização</li> <li>• Resistência térmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Substitui ferramentas sem revestimento com mesma tenacidade, mesma precisão e mesma configuração de aresta</li> <li>• Reduz APC</li> <li>• Mais tenaz</li> </ul>

Fonte: adaptado de Machado et al., 2015, e Sandvik, 2017.

Gupta e Laubscher, 2016, afirmam que o metal-duro não revestido, juntamente com o CBN, são alguns dos melhores e mais extensivamente utilizados materiais de ferramenta na usinagem de Ti. Contudo, eles também relatam que alguns revestimentos, como TiAlN, TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e AlCrN, são importantes na redução do desgaste e, conseqüentemente, no aumento de vida da ferramenta. Pervaiz et al., 2014, ressaltam que o metal-duro sem revestimento só pode ser utilizado para o processamento do Ti a baixas  $v_c$ , uma vez que as altas temperaturas geradas a altas  $v_c$  causam amolecimento térmico da ferramenta e promovem rápida difusão, diminuindo muito a sua vida útil. Por isso, conforme esses autores, as ferramentas de metal-duro revestidas têm superado as ferramentas não revestidas em termos de desempenho devido às vantagens oferecidas pelo revestimento, o que também foi atestado por Revuru et al., 2017. Além disso, os autores que defendem a superioridade do uso do revestimento também afirmam que as ferramentas revestidas pelo processo PVD são mais adequadas para a usinagem de Ti porque mantêm a integridade do substrato e oferecem maior resistência à difusão em comparação às ferramentas equivalentes revestidas pelo processo CVD.

Outro aspecto importante no torneamento de Ti refere-se à geometria da ferramenta de corte. Acerca disso, uma das práticas comuns para incrementar a vida da ferramenta é tornar o ângulo de saída ( $\gamma_o$ ) mais positivo para reduzir o comprimento de contato entre cavaco e ferramenta, no intuito de minimizar a temperatura do processo [Gupta e Laubscher, 2016]. Adicionalmente, há uma tendência de diminuição das forças de atrito, forças de corte e da adesão do material da peça na ferramenta (presença de APC), já que um aumento de  $\gamma_o$  aumenta o ângulo de cisalhamento do cavaco, o que reduz sua espessura e facilita o escoamento do mesmo. Isso reduz as forças de corte e tensões na ponta do inserto, ocasionando menor vibração. Tais consequências também apresentam efeito benéfico na melhoria da rugosidade, tendo em vista que menores vibrações, forças de corte e desgaste da ferramenta contribuem para uma melhor qualidade da superfície usinada pelos motivos supracitados [Nouari e Makich, 2014; Stephenson e Agapiou, 2016]. Além disso, durante a usinagem pode haver fluxo lateral, em que uma porção do material à frente da ferramenta é comprimida pela superfície de folga. Parte desse material se recupera elasticamente e outra porção sofre deformação sem, contudo, se separar da peça. Essa porção não removida sob a forma de cavaco fica na peça na forma de rebarbas dos sulcos formados e pode comprometer a qualidade da superfície usinada. Assim, quanto maior  $\gamma_o$ , menor é o fluxo de material na superfície da peça [Machado et al., 2015].

Outra característica da geometria da ferramenta que influencia a rugosidade é o raio de ponta ( $r_\epsilon$ ). De modo geral, maior  $r_\epsilon$  diminui os efeitos das marcas de avanço, com apreciável melhora no acabamento. Contudo, um raio de ponta excessivamente alto pode induzir vibrações devido ao aumento do atrito causado pela maior área de contato, prejudicando a qualidade da superfície usinada. A mudança do ângulo de posição principal da ferramenta ( $\chi_r$ ) pode ter efeitos opostos na superfície da peça. Uma redução de  $\chi_r$  pode melhorar o acabamento pela diminuição das marcas de avanço, o que promove um melhor escoamento do cavaco. Por outro lado, menor  $\chi_r$  reduz a espessura do cavaco, tornando-o mais flexível e dificultando sua quebra. Isso normalmente é um problema na usinagem de materiais dúcteis, pois o cavaco pode enrolar na peça, prejudicando o acabamento [Diniz et al., 2014; Machado et al., 2015].

### **2.3 Usinagem ambientalmente amigável (EFM)**

A palavra sustentabilidade tornou-se recorrente e alcançou posição de destaque nos últimos anos, tendo em vista a alta demanda por recursos em consequência do aumento populacional mundial e os impactos ambientais associados. A Organização das Nações Unidas define sustentabilidade como o “desenvolvimento que atenda às necessidades do presente sem

comprometer a capacidade das gerações futuras de atender as suas próprias necessidades”. Nesse contexto, a fabricação sustentável tem o objetivo de gerar produtos usando processos que minimizem impactos ambientais negativos, conservem energia e recursos naturais, sejam seguros para funcionários, comunidades e consumidores e sejam economicamente viáveis [Dixit et al., 2012; Dornfeld et al., 2013]. A Figura 2.4 mostra os fatores que afetam a fabricação sustentável e os seus níveis desejados.



Figura 2.4 – Fatores que afetam a fabricação sustentável e seus níveis desejados [adaptado de Fratila, 2013]

A usinagem ambientalmente amigável ou usinagem ambientalmente consciente, também conhecida pela sigla EFM (*Environmentally Friendly Machining*), preocupa-se com o desenvolvimento de métodos para a fabricação de novos produtos que utilizem processos e técnicas selecionados para serem economicamente viáveis, ao mesmo tempo que minimizem os impactos ao meio ambiente. Tal preocupação estende-se desde o projeto conceitual, passando pela aplicação para a qual o produto é destinado, até o descarte no fim de vida. Para isso, há três objetivos básicos: redução dos resíduos, redução da energia e diminuição dos materiais e processos perigosos [Dixit et al., 2012].

Segundo Gupta e Laubscher, 2016, o alcance da sustentabilidade na usinagem passa por:

- seleção das condições de usinagem ótimas para minimizar o consumo de energia e manter o custo eficiente;
- seleção de materiais, geometrias e revestimentos de ferramentas adequados para reduzir as falhas de ferramenta e aumentar a qualidade da superfície usinada da peça, mantendo, assim, a eficiência dos recursos;

- emprego de processos de usinagem híbridos para reduzir a cadeia de processos pela eliminação da necessidade de operações subsequentes de acabamento;
- adoção de técnicas avançadas de lubrificação, como a mínima quantidade de lubrificante (MQL) e refrigeração criogênica, para minimizar o custo associado aos fluidos e reduzir o impacto ambiental que eles podem proporcionar.

### 2.3.1 Métodos de lubrificação

Os fluidos de corte são um item importante nos processos de fabricação em muitas aplicações, sendo utilizados para melhorar o acabamento e a estabilidade dimensional da peça, aumentar a vida da ferramenta e reduzir as forças de usinagem. Suas principais funções são a lubrificação a baixas velocidades de corte, refrigeração a altas velocidades de corte, remoção dos cavacos da zona de corte e proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a oxidação. A baixas  $v_c$ , a refrigeração tem pouca importância, uma vez que as temperaturas na zona de corte são mais baixas, mas a lubrificação é fundamental para reduzir o atrito e a formação de APC. Em contrapartida, a temperatura de usinagem é mais elevada a altas  $v_c$  e o fluido favorece a transferência de calor da zona de corte nessa condição, reduzindo a temperatura da peça e da ferramenta. Isso evita problemas associados ao alto gradiente térmico na usinagem, como o aumento do desgaste da ferramenta e possíveis distorções na peça [Machado et al., 2015].

Muitas vezes, o sistema de aplicação de fluido é projetado e selecionado pressupondo que, quanto maior a quantidade utilizada, maior é o suporte ao processo [Astakhov, 2008]. No entanto, a eficácia dos fluidos de corte depende em grande parte do método de aplicação na zona de corte. A forma tradicional de aplicação é o sistema de refrigeração em abundância, em que uma grande quantidade de fluido de corte a baixa pressão é direcionada através de tubos flexíveis ou fixos diretamente sobre a região de usinagem. Se o volume do fluido é suficiente, esse sistema é eficaz em expulsar os cavacos da zona de corte e refrigerar a peça, mas a eficiência de lubrificação é limitada [Stephenson e Agapiou, 2016]. Porém, ainda que tenha o intuito de melhorar a usinabilidade e incrementar a produtividade, a aplicação em abundância é ineficiente por dois motivos: (1) pela alta quantidade de fluido necessária e; (2) pela dificuldade do refrigerante alcançar a zona de corte devido à obstrução decorrente dos cavacos gerados na usinagem [Dixit et al., 2012]. Além disso, o alto calor gerado na usinagem evapora o fluido antes que ele penetre na zona de corte. Dessa forma, não é possível eliminar todo o calor do processo, o que afeta negativamente a vida da ferramenta [Gupta et al., 2016a].

Não bastassem esses inconvenientes, há vários problemas econômicos, ambientais e de

saúde associados ao uso dos fluidos de corte. Do ponto de vista econômico, os custos associados à aquisição, armazenamento, preparo, utilização e descarte de fluido são bastante significativos, podendo chegar ao dobro do valor requerido em ferramental para determinadas situações [Astakhov, 2008]. Os impactos ambientais são altamente relevantes, tendo em vista que a grande maioria dos fluidos e aditivos utilizados para melhorar suas propriedades são derivados do petróleo. O descarte incorreto dos resíduos é capaz de poluir do solo e o lençol freático, podendo levar à contaminação dos alimentos. Doenças ocupacionais também estão associadas ao uso de fluido. O contato direto do produto com a pele pode causar irritações alérgicas e dermatites, ao passo que a exposição prolongada à névoa produzida na usinagem pode ocasionar e agravar diversos problemas respiratórios, além de aumentar os riscos de câncer em vários órgãos do corpo humano [Dixit et al., 2012; Shokrani et al., 2012]. Diante desses problemas, a Tabela 2.4 mostra as principais técnicas de lubrificação empregadas com vistas à EFM.

Tabela 2.4 – Principais métodos de lubrificação dentro da perspectiva de EFM

Método	Descrição
Usinagem a seco	Minimiza a poluição ambiental, o risco à saúde do trabalhador e o choque térmico em corte interrompido. Porém, a ausência de fluido limita a $v_c$ empregada e pode resultar em alta temperatura, desgaste rápido da ferramenta e degradação da integridade da superfície da peça.
Mínima quantidade de lubrificante (MQL)	Baseia-se na aplicação de pequena quantidade de fluido na zona de corte, permitindo reduzir a temperatura e rugosidade da peça, além do custo do fluido. Sua desvantagem é que pode ser perigosa à saúde pela geração de névoa. O uso de óleos vegetais é melhor que os óleos minerais em termos de custo, saúde, segurança e meio ambiente.
Refrigeração criogênica	O fluido, normalmente nitrogênio líquido, é aplicado à zona de corte a baixas pressão e temperatura, sendo eficiente em manter a temperatura de corte bem abaixo da temperatura de amolecimento do material da ferramenta. Essa técnica aumenta a vida da ferramenta, não causa poluição ambiental e possibilita aumentar a produtividade.
Ar gelado	Gás refrigerado comprimido com pequena quantidade de óleo é direcionado à zona de corte. A mistura ar/óleo melhora seu desempenho.
Mínima quantidade de lubrificante refrigerado (MQCL)	Técnica híbrida que combina MQL com refrigeração criogênica ou ar gelado para promover ação lubrificante e refrigerante na zona de corte. A combinação dos métodos tende a melhorar o desempenho em relação aos sistemas em separado, principalmente quanto à remoção de calor do processo e problemas associados a isso, mas o investimento inicial é alto.
Lubrificantes sólidos	Grafite e dissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) são os materiais mais comuns usados em forma de pó seco, cujo desempenho é melhor a alta $v_c$ . A eliminação da poluição ambiental e a capacidade de diminuir a temperatura de usinagem têm encorajado seu uso.

Fonte: adaptado de Gupta e Laubscher, 2016, e Veiga et al., 2013.

Dentre as técnicas de lubrificação que buscam a EFM, a usinagem a seco é a melhor alternativa por eliminar o fluido de corte da usinagem e os problemas associados à sua utilização. Contudo, tal método nem sempre pode ser empregado com sucesso, pois o alto calor gerado pode influenciar negativamente a qualidade da peça e a vida da ferramenta, além de limitar a produtividade. Não obstante, a usinagem a seco requer investimento em ferramental específico ou adoção de técnicas alternativas que supram as principais finalidades do fluido (refrigeração, lubrificação e expulsão dos cavacos da zona de corte), o que pode elevar os custos de fabricação [Sharif et al., 2017; Shokrani et al., 2012].

A técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), também conhecida como usinagem quase a seco ou *Near-Dry Machining* (NDM), é uma das mais investigadas na literatura pelo seu potencial de aumento de desempenho da usinagem e por possibilitar reduzido impacto ambiental, social e econômico. Nesse sistema, uma quantidade muito pequena de fluido de corte é atomizada ao ser misturada com ar comprimido, formando gotículas que são aplicadas na região do corte sob a forma de aerossol (também conhecido como névoa). Tal aplicação pode ser realizada externa ou internamente à ferramenta [Astakhov, 2008]. A Figura 2.5a mostra um esquema do funcionamento do sistema, ao passo que as Figuras 2.5b e 2.5c apresentam os métodos de aplicação do fluido em processo de furação, os quais podem ser adaptados a outros processos de usinagem.

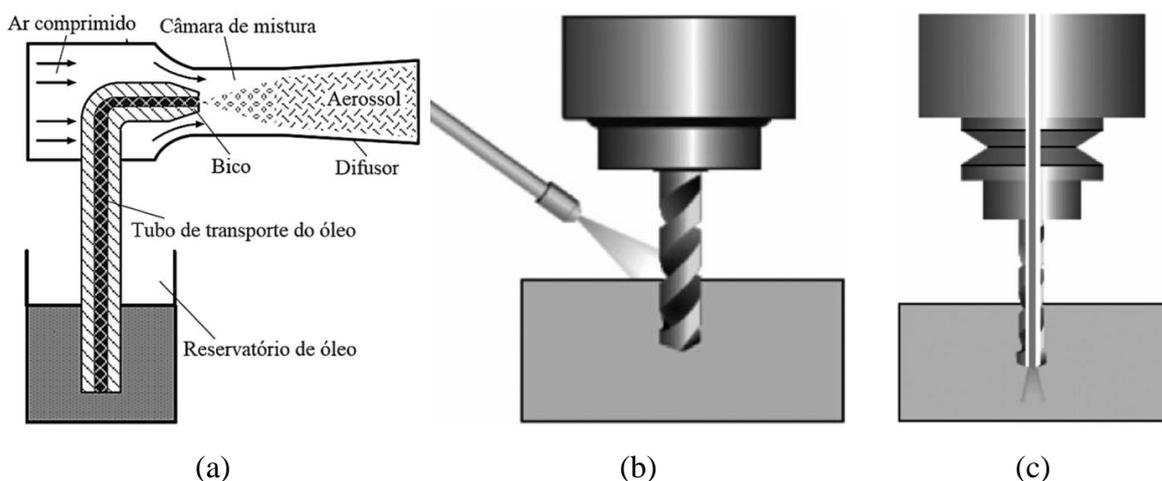


Figura 2.5 – Sistema MQL: (a) Princípio de funcionamento; (b) Aplicação externa; (c) Aplicação interna [(a) adaptado de Astakhov, 2008; (b)(c) Stephenson e Agapiou, 2016]

Conforme Sharif et al., 2017, e Shokrani et al., 2012, a névoa penetra na zona de corte e lubrifica a interface cavaco-ferramenta, reduzindo o atrito e, por conseguinte, a temperatura. A troca térmica se dá principalmente pela vaporização do fluido na zona de corte e convecção

do calor pelo ar. Para esses autores, assim como para Sartori et al., 2018, MQL é somente um método lubrificante, pois sua capacidade de refrigeração é muito baixa. Porém, Revuru et al., 2017, afirmam que a alta velocidade do ar comprimido auxilia na refrigeração por proporcionar maior coeficiente de transferência de calor nas interfaces com a ferramenta de corte. Outros pesquisadores também compartilham a ideia de que o método MQL possui capacidade conjunta de lubrificação e refrigeração [Astakhov, 2008; Sharma et al., 2016]. Dessa forma, como identificado por Boswell et al., 2017, não há concordância sobre o real potencial refrigerante do sistema MQL, embora sua capacidade de lubrificação pareça estar consolidada.

Outra falta de consenso presente na literatura é sobre a faixa de vazão que delimita a técnica MQL. Dependendo do autor consultado, há variação considerável na estimativa. Mencionam-se vazões entre 0,01 a 0,1 l/h [Kuram et al., 2013; Shokrani et al., 2012], 0,05 a 0,5 l/h [Chetan et al., 2015], 0,005 a 0,2 l/h [Stephenson e Agapiou, 2016] e 0,05 a 2 l/h [Debnath et al., 2014; Tschätsch e Reichelt, 2009]. Também há casos de subdivisão dessas faixas. O Seguro Estatal Alemão de Acidentes de Trabalho e Doenças Profissionais (DGUV), 2010, afirma em sua normativa BGI/GUV-I 718-E que a vazão média de MQL é de 0,05 l/h e que vazões até 2 l/h identificam o método de Quantidade Reduzida de Lubrificação (RQL – *Reduced Quantity Lubrication*). Enquanto grande parte dos pesquisadores consideram MQL e NDM duas siglas para o mesmo sistema, Souza et al., 2016, fazem clara distinção entre ambas: para eles, NDM compreende aplicações com vazões menores que 0,05 l/h e MQL abrange vazões entre 0,05 e 0,5 l/h. Ainda segundo esses autores, ambos são parte do sistema RQL, que engloba vazões entre 0,01 a 10 l/h. No presente trabalho, adotou-se a classificação proposta por Souza et al., 2016.

Em geral, MQL é uma técnica eficiente para a usinagem, mas sua eficácia depende de vários fatores como material da peça, operação de usinagem, vazão de fluido, pressão de ar comprimido, tipo de lubrificante e método de aplicação. Ainda assim, duas conclusões consistentes podem ser tiradas com base nas pesquisas comparativas com outros métodos de aplicação de fluido: (1) MQL proporciona diminuição do desgaste da ferramenta e; (2) MQL é melhor que a usinagem a seco [Boswell et al., 2017]. Outra vantagem é que o sistema MQL normalmente pode ser aplicado em diferentes processos de usinagem, materiais de peça e ferramentas de corte, o que nem sempre é possível com outras técnicas [Lawal et al., 2013].

Pesquisadores têm conseguido bons resultados na usinagem de Ti com MQL. Trabalhos que investigam diferentes métodos de aplicação de fluido evidenciaram que MQL supera o desempenho da usinagem a seco e do fluido em abundância em muitas situações, sendo uma das técnicas mais promissoras com vistas à melhoria da eficiência energética do processo e à

EFM [Deiab et al., 2014; Gupta e Laubscher, 2016; Revuru et al., 2017]. Khan e Maity, 2018, verificaram que MQL tem desempenho superior à usinagem a seco e com fluido em abundância na redução das forças de corte, rugosidade média, atrito e desgaste de flanco no torneamento de Ti-CP Gr. 2. Lauro et al., 2018, conseguiram bons resultados na redução da força específica de corte e rebarbas no microtorneamento de tubo de Ti-6Al-7Nb. Também houve redução das forças de corte a baixas  $v_c$  na comparação com a usinagem a seco.

Liu et al., 2013, atestaram que MQL pode proporcionar bons resultados na redução das forças de corte e rugosidade média no torneamento de Ti-6Al-4V em comparação à refrigeração abundante e usinagem a seco, desde que os parâmetros de corte sejam adequadamente selecionados. Liu et al., 2015, também concluíram que a seleção dos parâmetros de corte é de fundamental importância no fresamento de Ti-6Al-4V, podendo proporcionar diminuição do atrito na interface cavaco-ferramenta com o uso de MQL. Park et al., 2014, testaram diferentes condições de lubrificação (usinagem a seco, fluido em abundância, MQL, MQCL, criogenia e usinagem termicamente assistida) no fresamento de Ti-6Al-4V. Os resultados mostraram que MQL e MQCL superaram os demais tipos de aplicação de fluido, reduzindo as forças de corte e desgaste da ferramenta. Adicionalmente, MQL teve desempenho superior na redução da potência consumida, mesmo sendo um sistema de aplicação relativamente simples. Wang et al., 2009, estudaram o torneamento contínuo e interrompido de tubo de Ti-6Al-4V e concluíram que MQL é mais eficaz que o corte a seco e com fluido abundante no torneamento interrompido e também apresenta desempenho superior no torneamento contínuo a alta  $v_c$ .

Em suma, a técnica MQL tem grande potencial na melhoria do desempenho da usinagem, além de contribuir para um processo ambientalmente consciente. Contudo, os parâmetros de corte devem ser adequadamente selecionados para tirar o maior proveito possível da técnica, como já mencionado. Outras variáveis específicas do sistema MQL, como distância e angulação do bocal em relação a peça, quantidade de fluido e pressão de ar comprimido, também podem influenciar seu desempenho e devem ser cuidadosamente escolhidas para maximizar o processo [Zhiqiang, 2014].

## **2.4 Acabamento da superfície usinada**

A qualidade da superfície é considerada um parâmetro crítico em relação ao desempenho de peças usinadas, tendo efeitos relevantes em várias propriedades mecânicas, como vida em fadiga, resistência à corrosão e vida sob fluência. Outros atributos funcionais, como atrito, desgaste, lubrificação e condutividade térmica e elétrica também podem ser

afetados. Por isso, um bom acabamento é de fundamental importância para garantir o desempenho funcional de peças mecânicas [Gupta e Sood, 2017].

O titânio é reconhecido como um dos materiais de maior biocompatibilidade devido a sua habilidade de formar uma camada estável de óxido ( $\text{TiO}_2$ ) na sua superfície. Com esse propósito, a resposta esperada do corpo humano em relação a próteses e implantes está diretamente relacionada, entre outros fatores, à rugosidade do material inserido na pessoa. Para dispositivos biomédicos utilizados em aplicações ósseas, por exemplo, o parâmetro mais importante a ser considerado é a osseointegração, que refere-se basicamente à ligação química entre o implante e o tecido ósseo [Faticchi, 2017]. Para tal finalidade, estudos têm mostrado que superfícies com maior rugosidade tendem a favorecer a osseointegração pela melhor capacidade de fixação das células fibroblásticas e osteoblásticas [Melo et al., 2016]. Por outro lado, a hemocompatibilidade do biomaterial é fundamental para dispositivos biomédicos em contato direto com a corrente sanguínea. A hemocompatibilidade está diretamente relacionada às reações da superfície do biomaterial com a resposta inflamatória do corpo humano, a qual acontece devido à presença do material estranho no corpo. No caso de válvulas cardíacas artificiais, por exemplo, um mínimo de rugosidade é essencial, uma vez que uma textura áspera causa turbulência no sangue, podendo prejudicar a integridade das hemácias e provocar aderência de bactérias na região de contato. Isso pode levar à formação de coágulos, causando sérios riscos de trombose [Jackson e Ahmed, 2007]. Tais aspectos ressaltam a importância da avaliação da textura em peças de titânio.

Em geral, o perfil de uma superfície pode ser descrito por três parâmetros de caracterização, os quais são listados a seguir e representados esquematicamente na Figura 2.6 [Machado et al., 2015; Stephenson e Agapiou, 2016]:

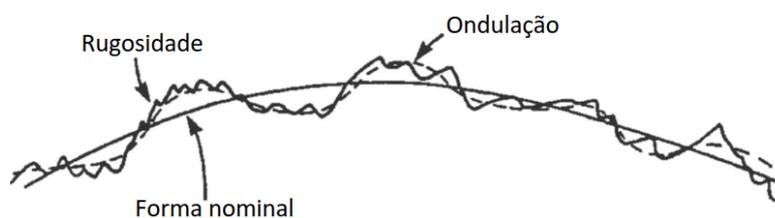


Figura 2.6 – Forma, ondulação e rugosidade de uma superfície [adaptado de Stephenson e Agapiou, 2016]

- forma: corresponde ao contorno macroscópico da superfície. Erros de forma podem ser resultado das condições inadequadas da máquina-ferramenta, distorções devido às forças de fixação da peça ou tratamentos térmicos posteriores e desgaste da ferramenta;

- ondulações: variações na superfície com comprimento relativamente longo (ou baixas frequências), as quais podem ser resultar de erros de fixação, erros na ferramenta ou na sua geometria e vibrações no sistema;
- rugosidade: composta de irregularidades finas ou erros microgeométricos na superfície, os quais resultam de dois componentes: (1) geométrico, que depende dos parâmetros de corte e da ferramenta (avanço, raio de ponta, ângulo de posição, velocidade de corte) e; (2) natural ou inerente ao processo, o qual resulta do desgaste da ferramenta, falta de homogeneidade do material da peça, vibrações de alta frequência do sistema e danos na superfície causados pelo contato do cavaco na peça durante a usinagem.

A norma DIN EN ISO 4287, 2010, define os termos e parâmetros para avaliação do perfil de rugosidade. A Figura 2.7 mostra alguns desses parâmetros.

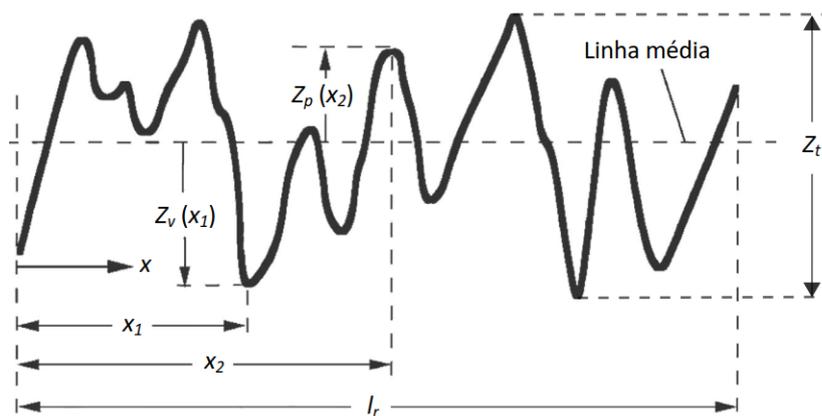


Figura 2.7 – Alguns parâmetros de rugosidade definidos pela norma DIN EN ISO 4287 [adaptado de DIN EN ISO 4287, 2010, e Stephenson e Agapiou, 2016]

De acordo com a norma DIN EN ISO 4287, 2010, o eixo  $x$  corresponde ao eixo de medição da rugosidade e as variáveis  $Z_p$ ,  $Z_v$  e  $Z_t$  referem-se à altura de pico, profundidade de vale e altura de um elemento do perfil, respectivamente, avaliadas em qualquer posição  $x$ . O comprimento de amostragem ou *cut-off* ( $l_r$ ) é o comprimento na direção do eixo  $x$ , usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação. Já o comprimento de medição ou de avaliação ( $l_n$ ) é usado para estabelecer o perfil sob avaliação, também mensurado na direção do eixo  $x$ , o qual pode conter um ou mais comprimentos de amostragem. A norma DIN EN ISO 4288, 1998, recomenda que o comprimento de avaliação seja igual a cinco vezes o comprimento de amostragem ( $l_n = 5 l_r$ ) para determinada faixa de rugosidade.

Há vários parâmetros para avaliar a rugosidade, mas a escolha daquele que será utilizado

dependerá da aplicação da peça. Entre alguns dos principais parâmetros de avaliação de amplitude definidos pela norma DIN EN ISO 4287, 2010, têm-se:

- desvio aritmético médio ( $R_a$ ): corresponde à média dos valores absolutos das ordenadas  $Z(x)$  no comprimento de avaliação;
- altura máxima do perfil ( $R_{zi}$ ): refere-se à soma da altura do maior pico e da profundidade do vale mais profundo no comprimento de amostragem;
- altura máxima média do perfil ( $R_z$ ): representa a média aritmética de cinco valores de  $R_{zi}$  obtidos de cinco comprimentos de amostragem, mensurados no comprimento de avaliação.

A Tabela 2.5 mostra os valores recomendados para comprimento de amostragem e avaliação de acordo com as faixas de  $R_a$  e  $R_z$  medidas.

Tabela 2.5 – Valores recomendados para comprimentos de amostragem e de avaliação

Faixa de $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Faixa de $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Comprimento de amostragem $l_r$ [mm]	Comprimento de avaliação $l_n$ [mm]
Até 0,02	Até 0,1	0,08	0,4
De 0,02 a 0,1	De 0,1 a 0,5	0,25	1,25
De 0,1 a 2	De 0,5 a 10	0,8	4
De 2 a 10	De 10 a 50	2,5	12,5
De 10 a 80	De 50 a 200	8	40

Fonte: DIN EN ISO 4288, 1998.

O desvio médio aritmético  $R_a$ , também conhecido como rugosidade média, é o parâmetro mais utilizado para controle do processo de usinagem e da qualidade de produto por ser de fácil medição e por proporcionar uma descrição geral da amplitude da superfície usinada [Petropoulos et al., 2010]. Conforme os parâmetros dados pela norma DIN EN ISO 4287, 2010, e apresentados na Figura 2.7,  $R_a$  é calculada por

$$R_a = \frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} |Z(x)| dx \quad (2.1)$$

Por representar um valor médio,  $R_a$  é um parâmetro estável, que não recebe influência de efeitos ocasionais. Isoladamente, porém, a rugosidade média não é suficiente para identificar algumas características importantes, pois superfícies geometricamente diferentes podem apresentar valores de  $R_a$  bem próximos, mas desempenhos em serviço bastante diversos. Assim, em casos onde é desejável (ou mesmo necessário) especificar a altura máxima da



A Equação 2.3 mostra que, no torneamento estável e com ferramenta nova, o perfil de rugosidade depende basicamente do raio de ponta da ferramenta e, principalmente, do avanço, já que  $R_a$  tende a aumentar na proporção quadrática desse. A Figura 2.9 mostra uma representação esquemática do perfil geométrico de rugosidade no torneamento.

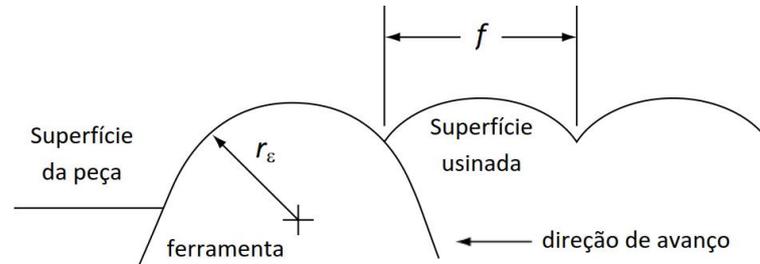


Figura 2.9 – Representação esquemática do perfil geométrico da rugosidade no torneamento [adaptado de Stephenson e Agapiou, 2016]

A literatura atesta que os parâmetros de corte – velocidade de corte ( $v_c$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ) e avanço ( $f$ ) – têm algum grau de influência sobre a rugosidade no torneamento. Já está consolidado que  $f$  é o parâmetro mais influente na rugosidade e que sua diminuição acarreta a melhoria do acabamento, tendo relação com a Equação 2.3 e que também é afirmado por Petropoulos et al., 2010, e Stephenson e Agapiou, 2016. As pesquisas que avaliam o acabamento em torneamento de Ti comprovam a grande influência do avanço sobre a rugosidade, o qual deve ser mantido em nível baixo para proporcionar melhor qualidade da superfície usinada [Ali et al., 2017; Çelik et al., 2017; Deiab et al., 2014; Gupta e Sood, 2017; Gupta et al., 2016a; Gupta et al., 2016b; Islam et al., 2013; Kosaraju e Anne, 2013; Kumar et al., 2013; Liu et al., 2013; Ramana e Aditya, 2017; Ramesh et al., 2012; Revankar et al., 2014; Revuru et al., 2017; Revuru et al., 2018; Sangwan et al., 2015; Ulutan e Ozel, 2011].

Contudo, em relação a  $v_c$ , a literatura apresenta resultados distintos. Alguns trabalhos atestam que o aumento da  $v_c$  atua deteriorando o acabamento da peça, o que é principalmente atribuído à aderência do material da peça na ponta da ferramenta, ao alto atrito gerado na interface de usinagem e ao alto nível de desgaste da ferramenta [Çelik et al., 2017; Chauhan e Dass, 2012; Gupta et al., 2016a; Gupta et al., 2016b; Kumar et al., 2013; Patil et al., 2016; Ramesh et al., 2012]. Por outro lado, vários estudos têm demonstrado que  $v_c$  maiores podem favorecer a obtenção de melhor qualidade da superfície torneada, sendo esse fenômeno explicado sobretudo pelo efeito de amolecimento térmico do material que contribui para a diminuição da resistência mecânica da peça, diminuindo as forças de corte e facilitando a usinagem, e pela menor deformação do cavaco, que tende a preservar a superfície recém usinada

[Khan e Maity, 2018; Liu et al., 2013; Muthukrishnan e Davim, 2011; Niharika et al., 2016; Ramesh et al., 2008; Ramesh et al., 2009; Revankar et al., 2014; Sahu e Andhare, 2015]. Cabe ressaltar que a definição de  $v_c$  alta ou baixa é relativa, tendo em vista os diversos níveis adotados na literatura para esse parâmetro de corte.

Algumas vezes,  $a_p$  é mantida constante e sua influência não é verificada nos estudos que avaliam o acabamento de peças de Ti. Entretanto, os trabalhos que analisam esse parâmetro mostram que seu aumento normalmente prejudica o acabamento, embora sua influência sobre a rugosidade usualmente seja pouco significativa ou desprezível em comparação ao  $f$  e  $v_c$  no torneamento. A ocorrência de um pior acabamento com o aumento de  $a_p$  estaria associada ao incremento da carga térmica e vibração da máquina-ferramenta devido aos altos níveis gerados de atrito e desgaste da ferramenta [Chauhan e Dass, 2012; Kosaraju e Anne, 2013; Niharika et al., 2016; Ramesh et al., 2008; Revankar et al., 2014]. No entanto, menor rugosidade foi alcançada com nível maior de  $a_p$  nos trabalhos de Kumar et al., 2013, e Sangwan et al., 2015. Esses últimos atribuem essa melhora à maior temperatura de usinagem proveniente do aumento do volume de material removido em virtude da maior  $a_p$ . Sob esse ponto de vista, haveria um efeito semelhante ao aumento da  $v_c$  em determinadas situações no sentido de promover o amolecimento térmico do material com conseqüente diminuição da resistência mecânica da peça. A menor resistência provocaria, segundo esses autores, a redução das forças de corte, facilitando o escoamento do cavaco e preservando a superfície usinada. Por tudo isso, observa-se que a definição dos parâmetros de corte ideais com vistas à obtenção de um acabamento aceitável deve ser feita de forma criteriosa e depende dos requisitos de qualidade exigidos.

## 2.5 Análise estatística experimental

A experimentação tem papel importante em problemas de engenharia, sendo geralmente usada para estudar o desempenho de sistemas e processos. Um processo, como representado esquematicamente pela Figura 2.10, pode ser descrito como uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam alguma entrada (geralmente um material) em uma saída que tem uma ou mais variáveis de resposta observáveis. Algumas das variáveis do processo são controláveis, enquanto outras variáveis são não controláveis (ruído).

Os experimentos frequentemente envolvem vários fatores e, geralmente, um dos seus objetivos é determinar a influência que tais fatores têm sobre a resposta do sistema. Nesse aspecto, a experimentação permite o real entendimento das relações de causa e efeito em um sistema em que as variáveis de entrada são deliberadamente alteradas para que sejam

observadas as mudanças que tais variáveis provocam na saída desse sistema. Contudo, para que o objetivo seja alcançado, o experimento deve ser projetado e conduzido seguindo uma estratégia de experimentação [Montgomery, 2013].

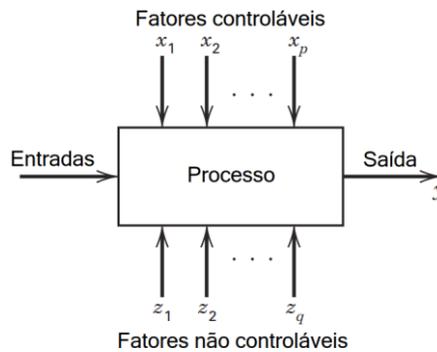


Figura 2.10 – Representação de um processo ou sistema [adaptado de Montgomery, 2013]

O Projeto de Experimentos (DOE – *Design of Experiments*) refere-se ao processo de planejamento de um experimento, seguindo uma metodologia adequada, de forma que dados apropriados sejam coletados para análises estatísticas posteriores, resultando em conclusões válidas e objetivas. Um fator de entrada em um processo é determinado como uma fonte de variabilidade na saída do mesmo e isso permite ao experimentador estabelecer correlação estatística entre ambos. Uma das vantagens do uso de DOE é que um experimento pode ser estatisticamente projetado para que valores ótimos de cada fator atinjam a qualidade desejada na saída [Astakhov, 2016]. Outrossim, o uso de planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos permitem ao pesquisador extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil fazendo um número mínimo de ensaios [Neto et al., 2003].

A análise de variância (ANOVA) é uma importante ferramenta estatística amplamente empregada em experimentos. Ela é normalmente usada como meio para estudar a variabilidade das médias de observações experimentais, para examinar a significância dos fatores em um experimento multifatorial ou para identificar a significância dos parâmetros de uma equação de regressão. A variância relativa aos tratamentos e erros é analisada pelo teste  $F$ . Esse teste é obtido pela relação entre os quadrados médios das variâncias do fator que está sendo testado e do resíduo. Caso a hipótese nula seja rejeitada, há um indicativo de que os valores médios de cada nível diferem significativamente [Markopoulos et al., 2016]. Uma abordagem alternativa ao teste  $F$  é a do valor  $P$ , que corresponde ao nível de significância mais baixo para o qual o valor observado da estatística de teste é significativa ou para o qual a hipótese nula pode ser rejeitada [Walpole et al., 2009]. Como exemplo, considerando que o nível de confiança de um

determinado estudo seja de 95%, então um parâmetro é considerado significativo se o valor  $P$  for menor ou igual a 0,05 [Sahoo e Barman, 2016]. Assim, quanto menor o valor  $P$ , mais significativo é o parâmetro.

Há alguns princípios básicos para a aplicação e validação da ANOVA. O experimento deve ser realizado em ordem aleatória para que seja eliminada a tendenciosidade que poderia resultar de uma atribuição sistemática. Outrossim, a variância dos resíduos deve ser homogênea ao longo da faixa estudada. Também se supõe que os erros são variáveis aleatórias independentes (não correlacionadas), que seguem uma distribuição normal. Na maioria dos experimentos, a suposição de normalidade é uma boa aproximação, graças ao teorema do limite central<sup>2</sup> e ao esforço que todo pesquisador faz para eliminar de suas experiências os erros sistemáticos [Neto et al., 2003; Walpole et al., 2009].

A Metodologia de Superfície de Resposta (RSM – *Response Surface Methodology*) compreende um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas úteis para modelamento e análise de problemas em que uma resposta de interesse é influenciada por várias variáveis, tendo como objetivo a otimização dessa resposta [Montgomery, 2013]. O termo Superfície de Resposta é empregado por descrever a superfície que representa a saída de um processo quando os valores dos parâmetros de entrada variam dentro de faixas específicas [Markopoulos et al., 2016]. Em torneamento, RSM é um dos métodos mais empregados para determinação dos melhores parâmetros de corte e para criação de modelos de predição de rugosidade [Kosaraju e Anne, 2013; Revankar et al., 2014].

As etapas a serem seguidas na aplicação da RSM são [Markopoulos et al., 2016; Myers et al., 2009; Niharika et al., 2016]:

1. Projetar uma série de experimentos para medição adequada e confiável da resposta de interesse. O uso de DOE é necessário, pois leva a uma melhor distribuição de pontos, reduz o erro e resulta em uma estimativa mais acurada dos coeficientes de regressão;
2. Desenvolver um modelo matemático de superfície de resposta que represente a relação entre as variáveis de entrada e de saída com o melhor ajuste dos dados. Modelos de segunda ordem são geralmente empregados, pois os problemas reais são bem aproximados por ele e os parâmetros do modelo são facilmente estimáveis;

---

<sup>2</sup> Conforme Neto et al., 2003, p. 35, o teorema do limite central é um dos teoremas fundamentais da estatística, que diz essencialmente o seguinte: “Se a flutuação total numa certa variável aleatória for o resultado da soma das flutuações de muitas variáveis independentes e de importância mais ou menos igual, a sua distribuição tenderá para a normalidade, não importa qual seja a natureza das distribuições das variáveis individuais.”

3. Encontrar o conjunto ótimo de parâmetros que produzem um valor máximo ou mínimo da resposta (otimização);
4. Representar os efeitos principais e de interação dos parâmetros do processo através de gráficos bidimensionais (de contorno) ou tridimensionais (superfície de resposta).

A otimização de múltiplas respostas também pode ser feita através da RSM. Nesse caso, um modelo é construído para cada resposta e, então, busca-se um conjunto de condições que otimizem todas as respostas ou, ao menos, mantenham-nas dentro de uma faixa desejada. Uma das formas de otimização faz uso da função *desirability* ( $d$ ). A escala dessa função varia entre  $d = 0$ , que sugere uma resposta completamente inaceitável, e  $d = 1$ , que indica que a resposta atingiu exatamente o valor alvo [Montgomery, 2013]. A forma da função *desirability* de uma dada resposta depende do objetivo do experimento e pode ser de 3 tipos: (i) nominal é melhor: deve-se atingir um valor alvo dentro de uma faixa contida entre os limites inferior e superior; (ii) maior é melhor: espera-se que o valor da resposta seja o maior possível e; (iii) menor é melhor: espera-se um valor de resposta tão baixo quanto possível [Costa et al., 2011].

Uma vez especificadas as funções *desirability* para todas as respostas, elas devem ser combinadas em uma função composta denominada *overall desirability* ( $D$ ). Com isso, a otimização simultânea de várias respostas se reduz à maximização de um único valor (*overall desirability*), transformando o problema em descobrir os níveis dos fatores que maximizem o valor de  $D$ . Depois da descoberta desses níveis, deve-se examinar o comportamento individual de cada uma das respostas para certificar-se que todas estão realmente em regiões aceitáveis, com todas as restrições satisfeitas. Também é recomendável fazer alguns experimentos confirmatórios nas condições selecionadas. Quando várias respostas estão em jogo, tais experimentos tornam-se praticamente imprescindíveis [Neto et al., 2003].

Vários projetos de experimentos podem ser empregados através da RSM. O Projeto Composto Central (CCD – *Central Composite Design*) baseia-se em um projeto fatorial completo  $2^k$  (todas as combinações dos fatores são executadas) ou fracionado (uma fração das combinações é executada, dependendo do número de fatores e réplicas do experimento). No fatorial  $2^k$ , cada fator controlável ( $k$ ) é investigado em dois níveis: alto (+1) e baixo (-1), estimando os efeitos principais e de interação entre os fatores. O CCD adiciona pontos centrais e axiais ao experimento para investigar os efeitos quadráticos existentes, sendo um dos projetos mais populares usadas no estudo de modelos de segunda ordem [Montgomery, 2013].

O projeto Box-Behnken (BBD – *Box-Behnken Design*) é um dos mais eficientes em relação ao número de ensaios requeridos. Ele permite a estimação de parâmetros de modelo

quadrático, construção de projetos sequenciais, detecção de falta de ajuste do modelo e uso de blocagem [Ferreira et al, 2007]. É um projeto de três níveis fatoriais incompletos obtidos pela combinação de projetos fatoriais  $2^k$  blocados, onde os pontos experimentais são escolhidos para permitir a estimação eficiente dos coeficientes de um modelo de segunda ordem [Baumgaertner Filho, 2017; Box et al., 2005]. De forma análoga ao CCD, o projeto Box-Behnken permite a análise dos efeitos principais e quadráticos, assim como das interações entre os fatores controláveis do experimento em relação à resposta do sistema.

A Figura 2.11 mostra a representação gráfica de um projeto Box-Behnken com três fatores e três níveis. Observa-se que o BBD não contém pontos nos vértices do cubo criado pelos limites superior e inferior de cada fator. Isso pode ser vantajoso quando os pontos extremos representam combinações que são proibitivamente onerosas ou impossíveis de testar devido a restrições físicas do processo [Montgomery, 2013].

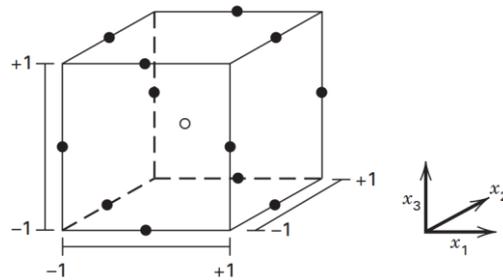


Figura 2.11 – Representação de um projeto Box-Behnken de três fatores [Montgomery, 2013]

O número total de ensaios ( $N$ ) necessários para o Box-Behnken é dado por

$$N = 2k(k - 1) + n_c \quad (2.4)$$

onde  $n_c$  é o número de réplicas do ponto central. No BBD, para um experimento com três fatores e três níveis, normalmente são realizados 15 experimentos. Em 12 deles, a combinação experimental conjuga os níveis máximo e mínimo de dois fatores, enquanto o terceiro fator é mantido no nível médio. Os três ensaios restantes referem-se às réplicas do ponto central (nível médio dos três fatores) para verificar a repetitividade (ou estimar o erro) do experimento [Baumgaertner Filho, 2017].

O projeto Taguchi é outra classe de projeto experimental que compõe a RSM e que é frequentemente usado em análise estatística. Esse método quantifica a perda que um processo sofre devido à presença de variabilidade provocada pelos fatores de ruído, buscando identificar

o conjunto de parâmetros apropriados dos fatores controláveis nos quais o desempenho do sistema é robusto (menos afetado) pela variabilidade não controlável do sistema. O projeto Taguchi usa arranjos ortogonais cruzados e uma estatística que relaciona as informações entre média e variância, a qual é chamada de relação sinal-ruído (SNR – *signal-to-noise ratio*). Tal relação é supostamente definida para que um valor máximo de SNR minimize a variabilidade transmitida a partir dos fatores de ruído [Freitas et al., 2007; Montgomery, 2013]. O projeto Taguchi também permite a análise de efeitos principais, além dos efeitos quadráticos e de interação dos fatores controláveis.

A resposta de um sistema ( $y$ ) em modelos de segunda ordem é dada pela Equação 2.5:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon, \quad (2.5)$$

em que  $n$  corresponde ao número de variáveis de regressão,  $\beta_0$  é o ponto de intersecção da curva com o plano,  $\beta_{i(i,j)}$  são os coeficientes de regressão,  $x_{i,j}$  representam as variáveis de entrada (fatores controláveis) e  $\epsilon$  é o erro aleatório experimental.

A equação estabelecida permite a análise de regressão, que é um método estatístico usado para determinar as relações existentes entre várias variáveis estudadas em um problema, fornecendo informação sobre como os valores da resposta mudam quando o valor dessas variáveis é alterado. O método dos mínimos quadrados é o mais amplamente empregado no ajuste dos dados do modelo e algumas relações auxiliam a verificar a validade desse ajuste. Entre elas, estão o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ). O termo  $R^2$  indica a medida da quantidade de variação em torno da média que é explicada pelo modelo, ao passo que  $R_{aj}^2$  faz um ajuste de  $R^2$ , levando em consideração o número de variáveis empregadas. Os valores dos coeficientes de determinação situam-se entre 0 (zero) e 1 (um). Quanto mais próximo de um, melhor os dados experimentais são explicados pelo modelo (melhor ajuste). Métodos de regressão podem facilmente trabalhar em conjunto com outras técnicas estatísticas, como a ANOVA, de forma a realizar uma análise mais detalhada dos resultados e checar a validade do modelo [Markopoulos et al., 2016; Niharika et al., 2016].

Diversos trabalhos voltados à avaliação da rugosidade no torneamento de titânio têm utilizado métodos estatísticos para auxiliar no planejamento do experimento e na avaliação dos resultados. A Tabela 2.6 mostra um resumo desses trabalhos, destacando os projetos

experimentais e recursos utilizados, bem como a quantidade de fatores controláveis (FC) e de variáveis de resposta (VR) empregados.

Tabela 2.6 – Resumo dos principais trabalhos que utilizam análise estatística na avaliação da rugosidade no torneamento de titânio

Autor	Projeto	FC	VR	Recursos utilizados
Ali et al., 2017	Taguchi	4	3	ANOVA, SNR
Chauhan e Dass, 2012	CCD	4	2	ANOVA, $R^2$ , regressão, gráficos de superfície de resposta e de probabilidade normal
Gupta e Sood, 2017	BBD	4	3	ANOVA, regressão, $R^2$ , gráficos de perturbação, de contorno e de probabilidade normal, otimização
Gupta et al., 2016b	BBD	4	4	ANOVA, gráficos de perturbação, otimização, regressão, $R^2$
Islam et al., 2013	Taguchi	3	3	ANOVA, SNR
Kosaraju e Anne, 2013	CCD	4	2	ANOVA, $R^2$ , regressão, gráficos de superfície de resposta e probabilidade normal, otimização
Kumar et al., 2013	Taguchi	3	1	ANOVA, SNR, regressão, gráficos de contorno e de superfície de resposta, otimização
Liu et al., 2013	Taguchi	3	2	ANOVA, gráficos de efeitos principais, regressão
Niharika et al., 2016	BBD	3	1	ANOVA, regressão, $R^2$ , gráficos de resíduos, de perturbação, de probabilidade normal e de superfície de resposta, otimização
Ramana e Aditya, 2017	Taguchi	3	1	ANOVA, gráficos de efeitos principais e de interação, regressão
Ramesh et al., 2008	Taguchi	3	1	ANOVA, regressão, gráficos de probabilidade normal, de resíduos, de contorno e de superfície de resposta, $R^2$
Ramesh et al., 2012	Taguchi	3	1	ANOVA, regressão, gráficos de probabilidade normal, de resíduos e de superfície de resposta
Revankar et al., 2014	Taguchi	5	2	ANOVA, SNR, otimização
Revuru et al., 2018	Taguchi	4	3	ANOVA, SNR, testes de validação
Sahu e Andhare, 2015	CCD	3	1	ANOVA, regressão, gráficos de efeitos principais e de superfície de resposta
Singh e Sharma, 2017	BBD	4	4	ANOVA, $R^2$ , gráficos de perturbação, regressão, otimização

Em todos os estudos apresentados na Tabela 2.6 foram adotados velocidade de corte ( $v_c$ ) e avanço ( $f$ ) como fatores controláveis e a grande maioria também investigou a influência da profundidade de corte ( $a_p$ ) sobre a rugosidade. Outros parâmetros de entrada também foram avaliados por alguns pesquisadores, tais como geometria da ferramenta (ângulo de posição, de inclinação e raio de ponta), diferentes tipos de inserto, parâmetros de MQL e presença de diferentes tipos ou concentrações de nanopartículas nos fluidos de corte. Frequentemente outras variáveis de saída são analisadas juntamente com a rugosidade, sendo as mais comuns o

desgaste da ferramenta e algum componente da força de usinagem. A liga Ti-6Al-4V é a mais investigada, exceto pelos trabalhos de Gupta e Sood, 2017, Gupta et al., 2016b, e Singh e Sharma, 2017, os quais adotaram Ti-CP grau 2 como matéria-prima. A ANOVA, por ser uma técnica de avaliação estatística básica, é um ponto comum entre os estudos, avaliando a influência dos fatores controláveis em relação às variáveis de resposta.

Percebe-se pela revisão apresentada que a análise estatística tem papel importante na experimentação, pois auxilia na verificação da influência dos parâmetros que afetam um conjunto de respostas, permitindo sua otimização com vistas a maximizar, minimizar ou atingir um determinado valor alvo ou faixa de especificação. Em materiais com alto valor agregado como o titânio, esse método auxilia a reduzir os custos e tempo relativos à realização de experimentos pela redução do número de ensaios requeridos, além de ser útil na identificação da região de desempenho ótimo do processo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os materiais, máquinas e procedimentos utilizados na caracterização da matéria-prima e na execução de torneamento longitudinal externo de acabamento em titânio comercialmente puro grau 4 (Ti-CP Gr. 4), com vistas a avaliar a rugosidade média ( $R_a$ ) e altura máxima média do perfil ( $R_z$ ) da superfície da peça sob uma perspectiva de usinagem ambientalmente amigável.

#### 3.1 Corpos de prova e equipamentos de caracterização

Para a realização do experimento, utilizaram-se dois corpos de prova cilíndricos de titânio comercialmente puro grau 4 com 22,2 mm (7/8") de diâmetro e 95 mm de comprimento. Inicialmente, uma das extremidades foi utilizada para fixação na máquina-ferramenta e a outra preparada para execução dos ensaios. Antes do início do experimento era dado um passe na extremidade a ser ensaiada para homogeneizar o diâmetro da peça ( $\varnothing$  21,5 mm), de modo a evitar que possíveis desvios dimensionais pudessem interferir nos resultados. A extremidade torneada foi dividida em três seções de 12 mm, totalizando 36 mm (Figura 3.1).

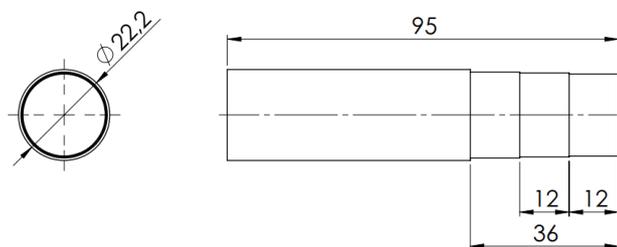


Figura 3.1 – Desenho esquemático do corpo de prova utilizado no experimento

Sobre cada seção de 12 mm foi realizado um passe com uma determinada combinação de parâmetros de corte, conforme planejamento experimental. Executavam-se três passes consecutivos, sendo um sobre cada seção de 12 mm, começando pela seção mais próxima da extremidade da peça e finalizando nas outras duas seções. Para cada “usinagem parcial” do corpo de prova (correspondente aos três passes consecutivos), foi verificado se a profundidade de corte de cada seção era maior ou igual àquela correspondente à seção imediatamente subsequente, de modo a possibilitar o torneamento como relatado. Após a execução desses passes, realizava-se a medição das rugosidades. A partir disso, novos passes eram executados sobre as superfícies anteriormente torneadas com novas combinações dos parâmetros de corte, diminuindo o diâmetro da peça e repetindo-se o processo até a finalização do número de ensaios

previstos para uma determinada condição lubrificante. Para uma segunda condição de lubrificação, os ensaios foram realizados utilizando-se a extremidade oposta da peça (anteriormente adotada para fixação na máquina-ferramenta) e, para a última condição, utilizou-se um novo corpo de prova.

A composição química do material foi verificada por espectrometria de emissão óptica através do espectrômetro Bruker Q2 ION (Figura 3.2a), tendo sido realizada pelo Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS. Quatro medições de dureza da superfície da peça foram feitas por meio do durômetro analógico Panambra modelo RASN-RB (Figura 3.2b), o qual está situado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal Sul-rio-grandense, campus Passo Fundo. Tal medição foi realizada na escala Rockwell C (HRC) sob uma pré-carga de 150 kgf (1471 N), com tempo de repouso médio de 20 s da ponteira sobre a amostra.

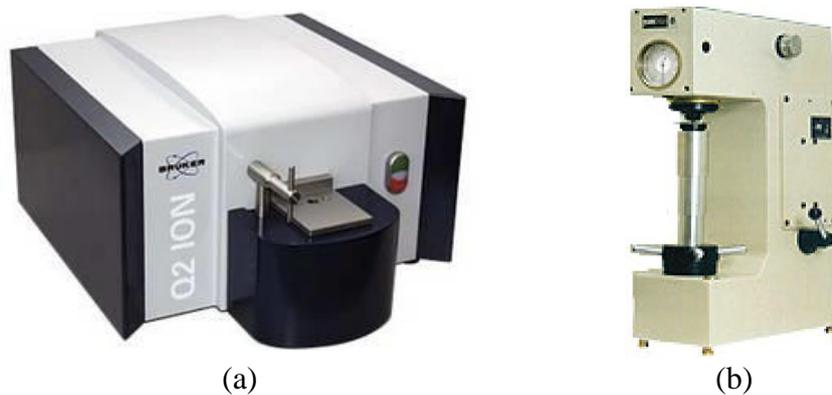


Figura 3.2 – Equipamentos utilizados para caracterização do material: (a) espectrômetro de emissão óptica Bruker Q2 ION; (b) durômetro analógico Panambra RASN-RB

Quatro corpos de prova foram confeccionados para ensaio mecânico de tração, atendendo aos requisitos da norma ISO 6892-1, 2016, sendo suas dimensões principais mostradas na Figura 3.3.

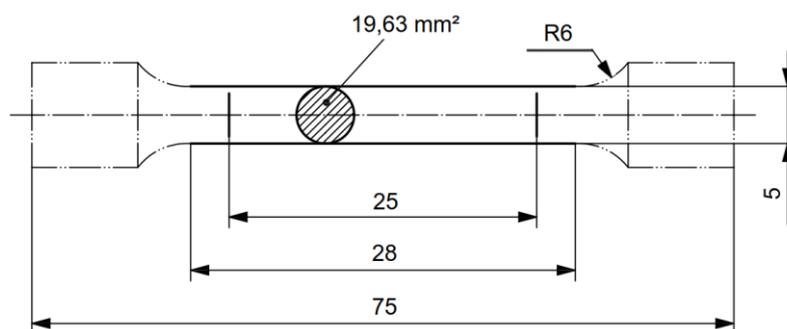


Figura 3.3 – Desenho dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração (dimensões em mm, exceto indicação contrária) [adaptado de ISO 6892-1, 2016]

Para o ensaio de tração, foi utilizada a máquina universal de bancada Emic modelo DL-3000 (Figura 3.4a), com capacidade de 30 kN. A confecção dos corpos de prova foi realizada no torno CNC Romi modelo Centur 30D (Figura 3.4b). Ambas as máquinas estão instaladas no Instituto Federal Sul-rio-grandense, campus Passo Fundo, nos Laboratórios de Ensaio Mecânicos e de CNC, respectivamente.



Figura 3.4 – Equipamentos utilizados para caracterização do material: (a) máquina universal para ensaio de tração Emic DL-3000; (b) torno CNC Romi Centur 30D

A composição química do material é mostrada na Tabela 3.1, ao passo que os valores médios obtidos das demais propriedades medidas constam na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Composição química do Ti-CP Gr. 4 (% em massa)

Ti	Fe	O	C	N	Al	Cu	Outros
99,45	0,399	< 0,05	0,014	< 0,05	0,008	0,011	< 0,056

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do Ti-CP Gr. 4

Propriedade	Resultado	Desvio padrão
Limite de resistência à tração ( $\sigma_{máx}$ )	681,63 MPa	12,16
Limite de escoamento ( $\sigma_e$ - 0,2% deformação)	616,68 MPa	26,96
Dureza	22 HRC	2,38

### 3.2 Máquina-ferramenta e ferramenta de corte

A máquina-ferramenta utilizada na execução dos experimentos foi o torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II (Figura 3.5a) disponível no Laboratório de Automação e Usinagem (LAUS) da UFRGS. Para o torneamento, adotaram-se insertos de metal-duro

Sandvik modelo TNMG 160404-SF 1105 ( $r_e = 0,4$  mm) com grãos de tamanho extrafino e revestimento de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) aplicado pelo processo PVD (Figura 3.5b). O suporte da ferramenta utilizado foi o modelo DTJNL 2020 K16, da Sandvik, com sistema de fixação do tipo cunha-grampo. Embora o inserto tenha cobertura com presença de Ti, o que poderia favorecer a reatividade química com o material da peça, a ferramenta foi escolhida pela maior disponibilidade. Além disso, a justificativa de sua utilização também é baseada em alguns estudos que evidenciaram melhor desempenho das ferramentas revestidas sobre os insertos não revestidos na usinagem de titânio [Pervaiz et al., 2014; Revuru et al., 2017].

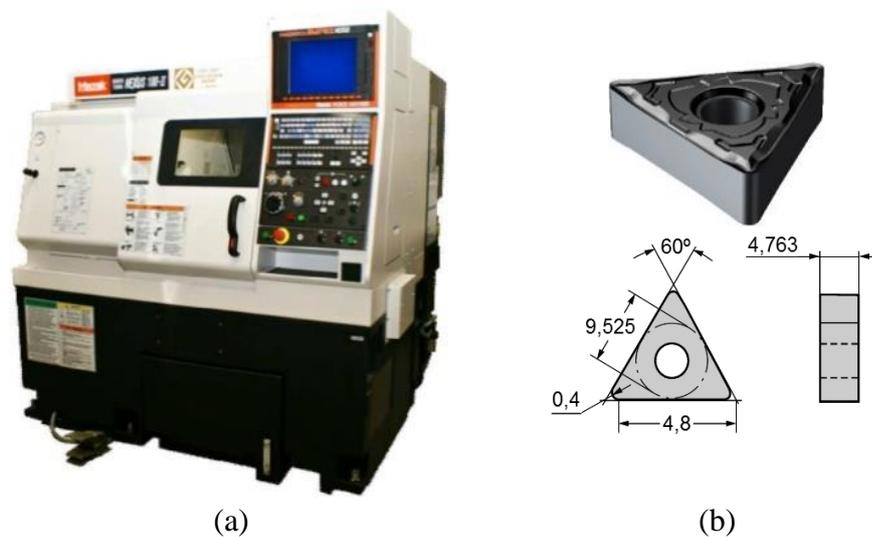


Figura 3.5 – (a) Torno CNC Mazak QTN 100-II; (b) inserto TNMG 160404-SF 1105

Os parâmetros de corte inicialmente recomendados para a ferramenta na usinagem de titânio são mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Parâmetros de corte iniciais recomendados para o inserto TNMG 160404-SF 1105 na usinagem de titânio

Parâmetros de corte	Faixa de trabalho	Valor inicial recomendado
$f$ [mm/rev.]	0,08 a 0,22	0,12
$v_c$ [m/min]	65 a 80	80
$a_p$ [mm]	0,15 a 1,50	0,40

Fonte: Sandvik, 2018.

### 3.3 Meios lubrificantes

O experimento foi realizado sob três condições de lubrificação: usinagem a seco, com MQL e com RQL. Para os ensaios com MQL e RQL, utilizou-se fluido sintético a base

d'água Quimatic Jet, do fabricante Quimatic Tapmatic, com auxílio do sistema aspersor Quimatic IV, cujo *setup* experimental é mostrado na Figura 3.6a. O bico aspersor do nebulizador foi posicionado a uma distância de 40 mm perpendicularmente à ponta do inserto (Figura 3.6b). A pressão de ar comprimido foi regulada em 400 kPa (4,0 bar) para ambas as condições de aplicação de fluido. A vazão de fluido para utilização com RQL foi fixada em 2,0 l/h. Para a usinagem com MQL, definiu-se uma vazão de 0,4 l/h com base nos estudos de torneamento de Ti realizados por Gupta et al., 2016a, que perceberam diminuição da rugosidade com o aumento da vazão de MQL até o limite de 0,3 l/h, a partir da qual o acabamento passa a ser praticamente constante.

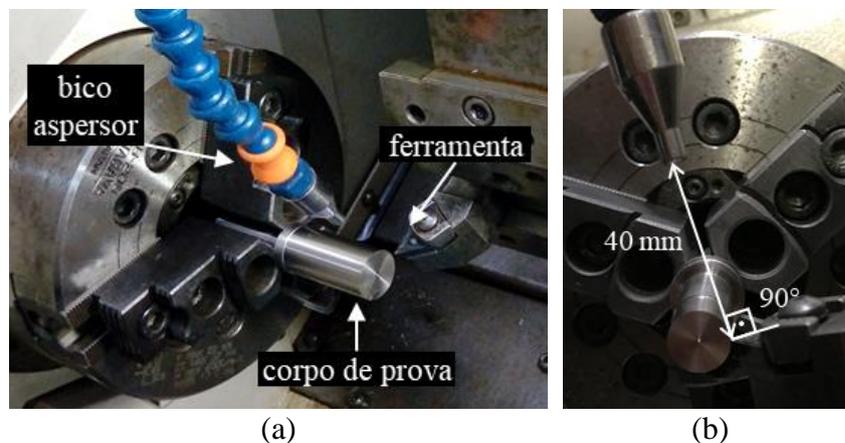


Figura 3.6 – Esquema experimental: (a) montagem do experimento para uso com MQL/RQL; (b) posição do bico aspersor

### 3.4 Projeto de experimentos

Quatro parâmetros foram escolhidos como fatores controláveis do experimento: avanço ( $f$ ), velocidade de corte ( $v_c$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ) e fluido de corte. Para cada fator, selecionaram-se três níveis para a execução dos ensaios. Os níveis relativos aos parâmetros de corte ( $f$ ,  $v_c$  e  $a_p$ ) seguiram a faixa de valores recomendada pelo fabricante do inserto. Testes preliminares foram realizados a fim de verificar a adequação dos parâmetros de corte à usinagem do material. A partir desses testes, verificou-se que a máxima velocidade de corte recomendada pelo fabricante ( $v_c = 80$  m/min) para o Ti-CP Gr. 4 produzia mínimo desgaste para um comprimento de usinagem relativamente grande. Dessa forma, optou-se por extrapolar os valores de  $v_c$  no intuito de verificar sua possível influência no acabamento da peça. A Tabela 3.4 mostra os parâmetros de entrada adotados e seus respectivos níveis experimentais.

Tabela 3.4 – Fatores controláveis do experimento e seus respectivos níveis

Fatores controláveis	Níveis		
	Baixo (-1)	Médio (0)	Alto (1)
$f$ [mm/rev.]	0,08	0,15	0,22
$v_c$ [m/min]	80	160	240
$a_p$ [mm]	0,20	0,35	0,50
Fluido de corte	seco	MQL	RQL

Os parâmetros de corte ( $f$ ,  $v_c$  e  $a_p$ ) foram combinados em um projeto de experimentos Box-Behnken (BBD), contemplando uma réplica para cada combinação experimental e três réplicas para o ponto central, totalizando 15 ensaios para cada condição lubrificante, de acordo com a Equação 2.4. Utilizou-se o *software* Minitab® 17 na geração da matriz de experimentos, o qual também definiu aleatoriamente a ordem de execução dos ensaios. Devido às dificuldades na realização do *setup* para ajustar as vazões de MQL e RQL, optou-se por realizar todos os ensaios para cada condição de lubrificação em separado, ou seja, o fator “fluido de corte” não foi aleatorizado e todos os 15 ensaios de uma condição lubrificante específica foram feitos de uma só vez, repetindo-se o processo para as outras condições. Haja vista a restrição na aleatorização, a influência do fluido de corte poderia estar confundida com a troca do dia de realização dos experimentos relativos a cada condição lubrificante. Contudo, considerou-se que é pouco provável que diferentes dias de execução tenham um efeito considerável sobre o processo, uma vez que esse não é muito afetado por condições ambientais (temperatura, pressão atmosférica, umidade do ar, etc.). Sendo assim, o fluido de corte foi incluído na ANOVA e sua influência sobre as respostas foi analisada estatisticamente. Logo, a análise de variância foi feita por meio de um BBD com três fatores cruzados ( $f$ ,  $v_c$  e  $a_p$ ) mais o fator “fluido de corte”. Esse último foi considerado como variável categórica (qualitativa), ou seja, a análise estatística concentrou-se somente nos níveis ensaiados para esse fator, não sendo extrapolada para níveis “intermediários” de fluido de corte. Cabe ressaltar que todos os passes correspondentes às combinações de cada condição específica de lubrificação (seco, MQL e RQL) foram realizados em um único turno, conforme a sequência definida pela matriz experimental, no intuito de uniformizar a variabilidade dos dados dentro de um determinado grupo, isto é, minimizar a ocorrência de possíveis fatores de ruído associados a diferentes dias de execução dos passes para uma determinada condição lubrificante.

### 3.5 Medição da rugosidade

As variáveis de resposta escolhidas foram rugosidade média ( $R_a$ ) e altura máxima média

do perfil ( $R_z$ ), as quais são do tipo menor é melhor, uma vez que um valor mínimo é desejável para ambas. As respostas foram medidas com auxílio do rugosímetro Mitutoyo SJ-201P, disponível no LAUS/UFRGS, cuja resolução é de  $0,01 \mu\text{m}$  (Figura 3.7). O instrumento de medição possui raio de ponta da agulha do apalpador de  $5 \mu\text{m}$  e força de medição de  $4 \text{ mN}$ .

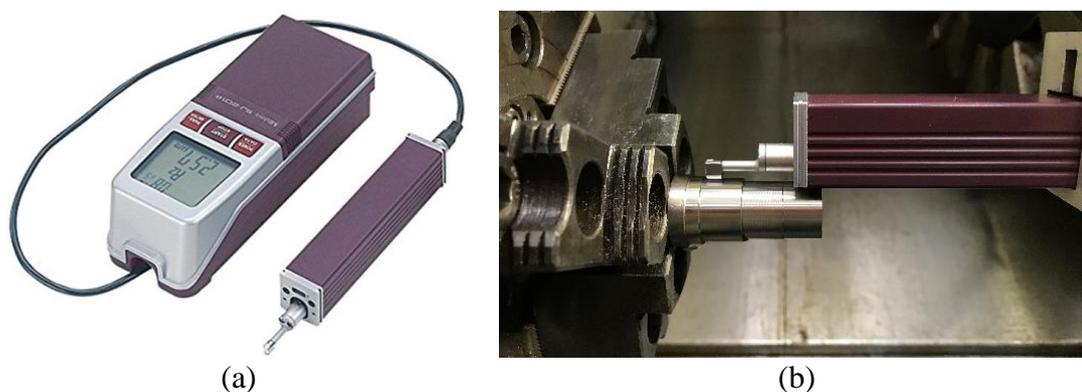


Figura 3.7 – Medição da rugosidade: (a) rugosímetro; (b) procedimento de medição

O comprimento de amostragem empregado ( $l_r$ ) foi de  $0,8 \text{ mm}$ , perfazendo um comprimento de avaliação ( $l_n$ ) de  $4 \text{ mm}$ . Em cada passe (combinação experimental), foram feitas três medições da rugosidade aproximadamente equidistantes ao redor da peça, no intuito de garantir a confiabilidade dos resultados. A média dessas medições foi tomada como resposta para cada passe realizado, sendo calculada através do *software* Microsoft® Excel 2016.

### 3.6 Análise dos dados

A partir da obtenção de ambas as rugosidades, utilizou-se o *software* Minitab® 17 para a realização da análise de variância, de modo a verificar a influência estatística dos parâmetros de entrada sobre as variáveis de resposta. Coeficientes de determinação, equações de regressão e gráficos de probabilidade normal, de análise de resíduos, dos efeitos de interação, de superfície de resposta e de contorno também foram fornecidos pelo referido programa computacional, com vistas a promover uma melhor compreensão sobre a relação dos fatores controláveis com a resposta do sistema e verificar a adequação do modelo com os dados empíricos. Com esse mesmo intuito, os valores das respostas obtidos experimentalmente foram comparados aos valores previstos pelas equações de regressão por meio de gráficos gerados pelo *software* Microsoft® Excel 2016.

Uma análise comparativa entre os perfis de rugosidade foi feita para verificar suas diferenças e auxiliar no entendimento do efeito dos parâmetros de corte e das diferentes condições de lubrificação sobre as respostas. Realizou-se a otimização do experimento

através da função *desirability* com o auxílio do Minitab® 17, a partir da qual foram encontrados os níveis ótimos dos fatores e a condição de lubrificação específica que minimizam a rugosidade, cujos valores de  $R_a$  e  $R_z$  também foram estimados pelo *software*. Tal otimização retrata a melhor escolha do ponto de vista do modelo estatístico-matemático adotado. Porém, para efeito de comparação com o resultado previsto pelo *software*, duas novas rotinas de otimização foram rodadas para as outras duas condições lubrificantes que não foram contempladas na otimização inicial. Assim, foi feita a otimização para todas as condições de lubrificação, no intuito de que o *software* buscasse os parâmetros de corte e o valor da função *overall desirability* que otimizaria o experimento na usinagem a seco, com MQL e com RQL, visando verificar as diferenças entre os parâmetros de corte e rugosidades previstas.

Por fim, três passes de validação foram executados com os parâmetros otimizados para cada condição lubrificante. A média dos valores dos três passes foi tomada como resposta do teste de validação para cada condição e essa resposta foi comparada ao resultado previsto pelo modelo estatístico-matemático com o objetivo de verificar a adequação do mesmo ao resultado experimental alcançado. Os resultados obtidos nos testes de validação para cada condição lubrificante também foram comparados no intuito de averiguar suas diferenças.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4.1 apresenta as combinações experimentais dos parâmetros de corte com os respectivos valores médios das rugosidades  $R_a$  e  $R_z$  para as três condições lubrificantes.

Tabela 4.1 – Matriz de experimentos Box-Behnken com os valores de rugosidade medidos

Amostra	Fatores controláveis			Variáveis de resposta					
	$v_c$ [m/min]	$f$ [mm/rev.]	$a_p$ [mm]	Seco		MQL		RQL	
				$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	80	0,08	0,35	0,58	2,87	1,32	6,43	0,50	2,52
2	240	0,22	0,35	3,80	15,73	3,90	14,98	4,27	16,32
3	160	0,15	0,35	1,54	7,29	1,88	7,59	1,41	6,13
4	240	0,15	0,50	1,70	7,42	1,42	6,44	2,08	8,23
5	160	0,15	0,35	1,58	7,03	1,40	5,97	1,83	7,36
6	80	0,22	0,35	3,95	14,62	3,57	13,73	3,89	15,31
7	160	0,15	0,35	1,68	6,83	1,83	7,54	1,96	7,58
8	240	0,08	0,35	0,49	2,64	0,69	3,28	0,54	2,99
9	160	0,22	0,20	3,68	14,54	4,64	17,25	4,08	15,70
10	80	0,15	0,50	1,88	7,73	2,06	7,77	1,74	7,88
11	160	0,08	0,50	0,64	3,40	0,62	3,76	0,69	3,20
12	80	0,15	0,20	1,92	7,64	1,85	6,47	1,35	6,24
13	160	0,08	0,20	0,47	2,67	0,71	3,06	0,46	2,51
14	240	0,15	0,20	1,72	7,29	2,16	8,28	2,17	7,90
15	160	0,22	0,50	3,90	16,03	4,32	16,56	4,23	17,07

### 4.1 Relação entre parâmetros de corte e rugosidade

A contribuição de cada parâmetro de corte sobre as rugosidades  $R_a$  e  $R_z$  foi verificada por meio da análise de variância, sendo adotado intervalo de confiança de 95%. A ANOVA examina a influência dos efeitos principais, quadráticos e de interação entre os fatores. Também é verificada a significância da falta de ajuste do modelo em explicar os dados experimentais. Para cada fator são computados os graus de liberdade (GL), soma quadrática (SQ), valor da estatística  $F$  e valor  $P$ . Sob tal intervalo de confiança, um fator é considerado estatisticamente significativo se seu valor  $P$  for menor ou igual a 0,05.

A ANOVA relativa ao presente estudo é mostrada na Tabela 4.2, a qual contém ainda o desvio padrão amostral ( $s$ ), os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ) e o percentual de contribuição (%) de cada fator controlável sobre a variável de resposta correspondente. Cabe ressaltar que a estimativa do erro é calculada com base nas réplicas do ponto central do experimento.

Tabela 4.2 – ANOVA do torneamento de Ti-CP Gr. 4

Fator	$R_a$					$R_z$				
	GL	SQ	$F$	Valor $P$	%	GL	SQ	$F$	Valor $P$	%
$v_c$	1	0,0049	0,09	0,761	0,01	1	0,22	0,31	0,581	0,02
$f$	1	68,4450	1313,24	< <b>0,001</b>	91,48	1	919,01	1313,19	< <b>0,001</b>	91,23
$a_p$	1	0,0002	< 0,01	0,958	< 0,01	1	1,47	2,10	0,159	0,15
fluido	2	0,2770	2,66	0,088	0,37	2	0,98	0,70	0,506	0,10
$v_c \times v_c$	1	0,0009	0,34	0,563	< 0,01	1	0,30	0,01	0,930	0,03
$f \times f$	1	3,5359	69,64	< <b>0,001</b>	4,73	1	53,82	78,51	< <b>0,001</b>	5,34
$a_p \times a_p$	1	0,1549	2,97	0,096	0,21	1	1,62	2,32	0,139	0,16
$v_c \times f$	1	0,1295	2,48	0,127	0,17	1	3,27	4,68	<b>0,040</b>	0,32
$v_c \times a_p$	1	0,1672	3,21	0,084	0,22	1	1,63	2,32	0,139	0,16
$v_c \times fluido$	2	0,4028	3,86	<b>0,033</b>	0,54	2	1,56	1,12	0,342	0,16
$f \times a_p$	1	0,0058	0,11	0,742	0,01	1	< 0,01	< 0,01	0,984	< 0,01
$f \times fluido$	2	0,1115	1,07	0,357	0,15	2	3,24	2,31	0,118	0,32
$a_p \times fluido$	2	0,1809	1,74	0,195	0,24	2	1,34	0,96	0,397	0,13
Falta de ajuste	21	1,0925	0,99	0,554	1,46	21	15,87	1,50	0,323	1,58
Erro puro	6	0,3147			0,42	6	3,03			0,30
Total	44	74,8237			100,0	44	1007,35			100,0
	$s = 0,23 \quad R^2 = 0,9812 \quad R_{aj}^2 = 0,9694$					$s = 0,84 \quad R^2 = 0,9812 \quad R_{aj}^2 = 0,9694$				

Conforme mostrado na Tabela 4.2, o avanço possui influência estatística majoritária sobre os valores médios de  $R_a$  e  $R_z$ , respondendo com pouco mais de 96% (considerando seus efeitos linear e quadrático) sobre a magnitude das respostas. Os demais fatores detectados como estatisticamente significativos foram a interação entre  $v_c$  e  $f$ , para  $R_z$ , e a interação entre  $v_c$  e fluido (condição de lubrificação) para  $R_a$ , embora suas contribuições sejam muito menores que a contribuição do  $f$  sobre ambas as rugosidades.

A análise gráfica dos resíduos é um meio importante de verificar a validade das suposições necessárias à aplicação da ANOVA. Os resíduos são os desvios das observações em torno da média de um nível ou grupo, considerando uma distribuição normal padronizada (média = 0 e variância = 1). Um dos meios de análise consiste do gráfico de probabilidade normal, que verifica a suposição de que os dados coletados apresentam distribuição normal. Os dados são organizados e plotados seguindo sua frequência acumulada e a escala de frequência é arranjada para que os pontos plotados sigam aproximadamente uma linha reta, caso sejam adequadamente descritos pela distribuição normal. Se os pontos desviam significativamente da linha, a hipótese de normalidade não é válida. Porém, a definição se os dados seguem adequadamente ou não a linha é subjetiva e a ênfase maior deve ser dada aos valores centrais em vez dos pontos nos extremos [Montgomery, 2013]. A Figura 4.1 mostra os gráficos de

probabilidade normal para  $R_a$  e  $R_z$ , respectivamente. Embora haja um indicativo da presença de dado atípico para  $R_z$ , o mesmo não foi descartado por tratar-se de um dado isolado e também em virtude do baixo número de experimentos efetuados. Ainda assim, os gráficos sugerem que os dados são satisfatoriamente explicados pela distribuição normal.

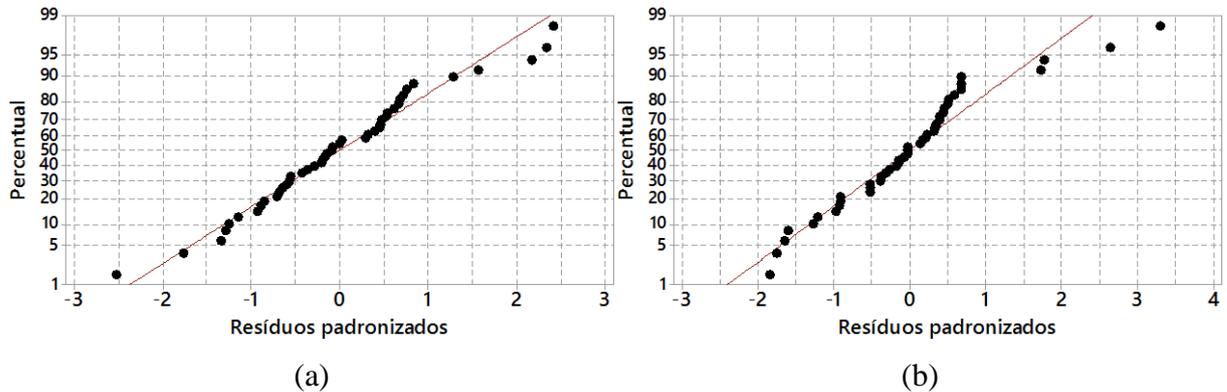


Figura 4.1 – Gráficos de probabilidade normal para: (a)  $R_a$ ; (b)  $R_z$

A análise gráfica também pode auxiliar na verificação da suposição de homogeneidade das variâncias (outro requisito para aplicação da ANOVA). A Figura 4.2 mostra os gráficos de resíduos *versus* ordem de coleta dos dados experimentais. Os dados são apresentados para as três condições lubrificantes, na sequência de realização dos experimentos mostradas na Tabela 4.1. Esses gráficos auxiliam na detecção de correlação entre os resíduos, o que violaria a suposição de independência dos erros. Idealmente, os resíduos devem estar distribuídos aleatoriamente e alternadamente na proporção positiva e negativa em torno da média. Aparentemente, não há indicativo de correlação entre as respostas, uma vez que os dados estão uniformemente distribuídos, validando a ANOVA.

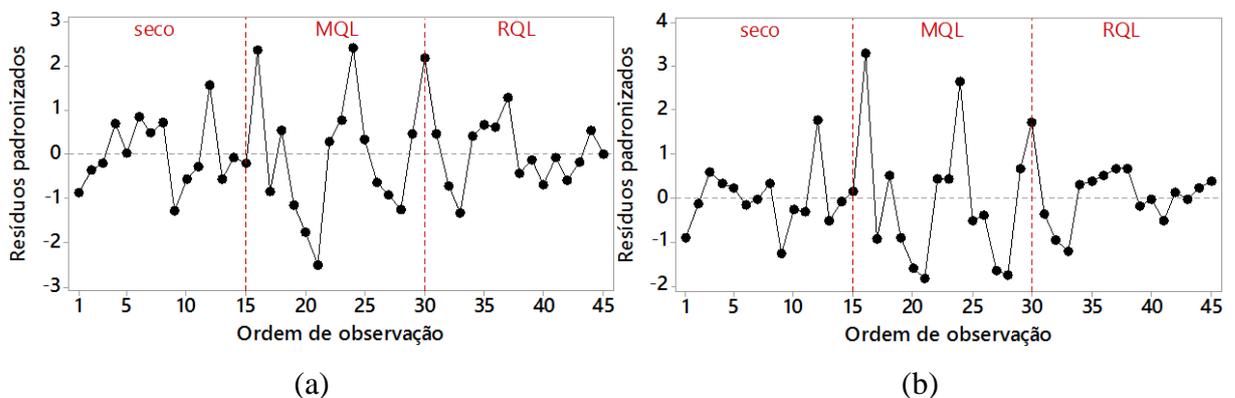


Figura 4.2 – Gráficos de resíduos *versus* ordem de observação dos dados para: (a)  $R_a$ ; (b)  $R_z$

Corroborando à análise, a Figura 4.3 apresenta os gráficos de resíduos *versus* parâmetros

de rugosidade, a partir dos quais observa-se que a variância dos dados é constante e homogênea, não havendo indicativo de tendência ou relação de dependência entre os erros, o que torna o estudo válido.

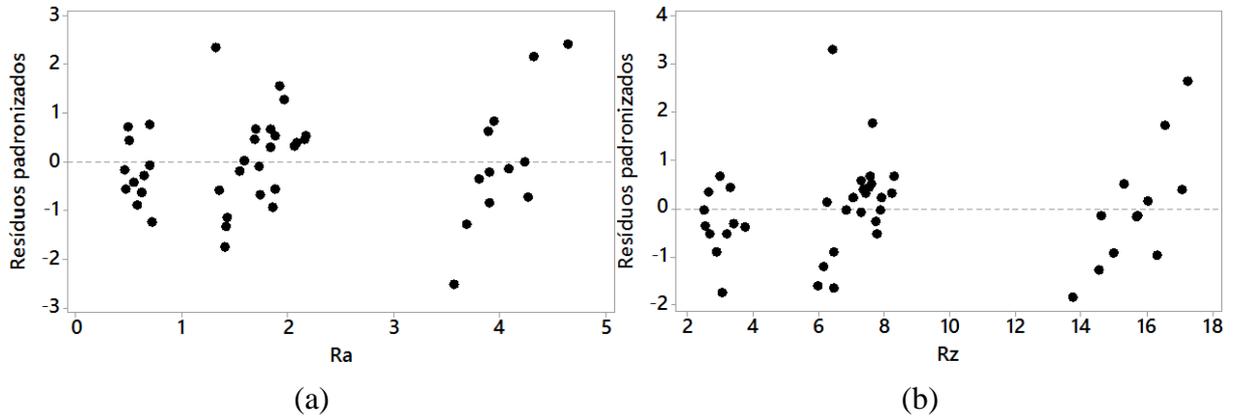


Figura 4.3 – Gráficos de resíduos *versus* rugosidade para: (a)  $R_a$ ; (b)  $R_z$

Os valores de  $R^2$  e  $R_{aj}^2$  constantes na Tabela 4.2 mostram que o modelo está bem ajustado aos dados, uma vez que ambos ficaram próximos de 1. A relação matemática entre os parâmetros de entrada e rugosidade média, para cada condição lubrificante, é apresentada nas Equações 4.1, 4.2 e 4.3. Os coeficientes mostrados nas respectivas equações devem ser utilizados com os níveis reais para qualquer uma das variáveis de controle experimentais.

$$R_{a_{seco}} = 1,328 - 0,00230 v_c - 13,78 f - 1,52 a_p + 0,000006 v_c^2 + 116,8 f^2 + 5,26 a_p^2 + 0,0186 v_c \times f - 0,00984 v_c \times a_p - 2,09 f \times a_p \quad (4.1)$$

$$R_{a_{MQL}} = 1,911 - 0,00233 v_c - 13,91 f - 2,57 a_p + 0,000006 v_c^2 + 116,8 f^2 + 5,26 a_p^2 + 0,0186 v_c \times f - 0,00984 v_c \times a_p - 2,09 f \times a_p \quad (4.2)$$

$$R_{a_{RQL}} = 0,489 + 0,00112 v_c - 11,78 f - 1,22 a_p + 0,000006 v_c^2 + 116,8 f^2 + 5,26 a_p^2 + 0,0186 v_c \times f - 0,00984 v_c \times a_p - 2,09 f \times a_p \quad (4.3)$$

Para a altura máxima do perfil, a relação entre  $R_z$  e os parâmetros de corte é expressa pelas Equações 4.4, 4.5 e 4.6 na usinagem a seco, com MQL e com RQL, respectivamente. Os coeficientes das equações novamente devem ser utilizados com os níveis reais dos fatores controláveis do experimento.

$$R_{z_{seco}} = 5,81 - 0,0040 v_c - 63,3 f - 5,05 a_p + 0,000003 v_c^2 + 454,5 f^2 + 17,0 a_p^2 + 0,0933 v_c \times f - 0,0307 v_c \times a_p + 0,5 f \times a_p \quad (4.4)$$

$$R_{z_{MQL}} = 8,34 - 0,0066 v_c - 69,3 f - 7,52 a_p + 0,000003 v_c^2 + 454,5 f^2 + 17,0 a_p^2 + 0,0933 v_c \times f - 0,0307 v_c \times a_p + 0,5 f \times a_p \quad (4.5)$$

$$R_{z_{RQL}} = 3,71 + 0,0011 v_c - 56,5 f - 3,72 a_p + 0,000003 v_c^2 + 454,5 f^2 + 17,0 a_p^2 + 0,0933 v_c \times f - 0,0307 v_c \times a_p + 0,5 f \times a_p \quad (4.6)$$

As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 comparam os dados experimentais com os dados previstos pelo modelo estatístico-matemático na usinagem a seco, com MQL e com RQL, respectivamente. Tais gráficos confirmam a validade e o excelente ajuste do modelo aos dados empíricos, já que ambos estão muito próximos entre si, apresentando-se praticamente sobrepostos uns aos outros, sobretudo na condição a seco e com RQL.

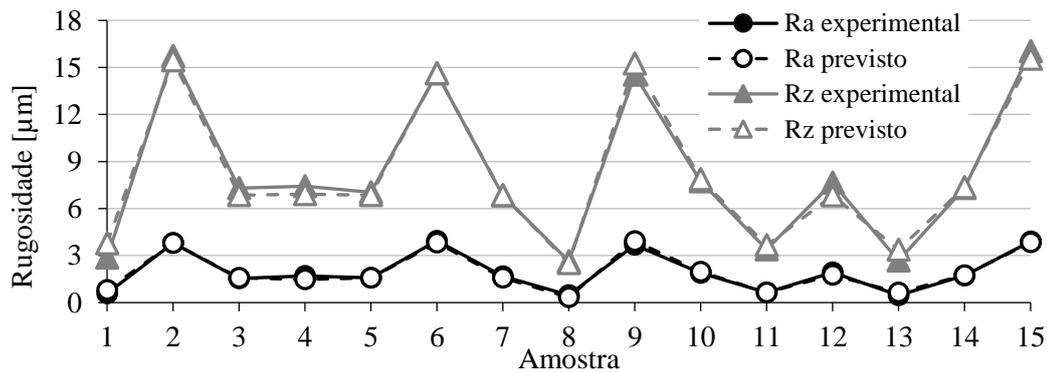


Figura 4.4 – Comparação entre valores experimentais e previstos de rugosidade na usinagem a seco

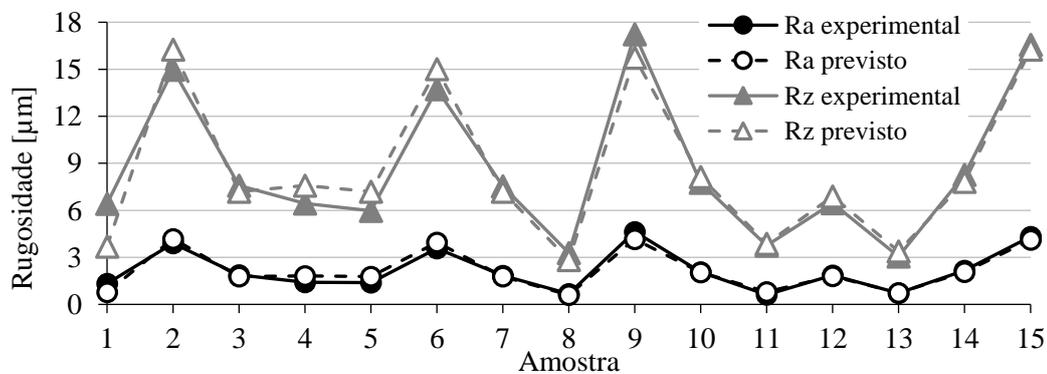


Figura 4.5 – Comparação entre valores experimentais e previstos de rugosidade na usinagem com MQL

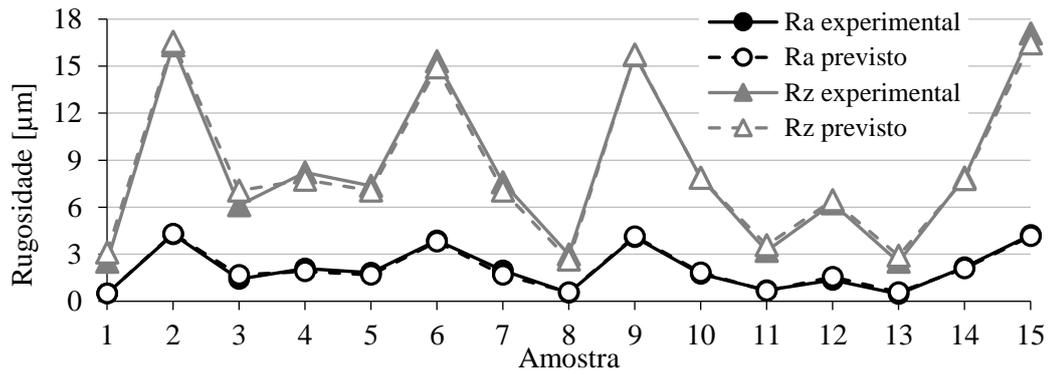


Figura 4.6 – Comparação entre valores experimentais e previstos de rugosidade na usinagem com RQL

Corroborando à ANOVA, as Figuras 4.7 e 4.8 mostram os gráficos de interação dos parâmetros de entrada para  $R_a$  e  $R_z$ , respectivamente. Tais gráficos permitem averiguar o efeito que a mudança dos níveis das variáveis de controle gera na resposta, bem como o efeito de interação entre os fatores controláveis. A interação ocorre quando o efeito da mudança de nível de um ou mais fatores controláveis é diretamente influenciado pela mudança de nível de outra variável de entrada. Esse fenômeno é detectado quando as curvas que relacionam os diferentes níveis dos fatores não são paralelas (podendo elas cruzarem-se ou não). Quanto maior a interação, mais divergente é a tendência de uma curva em relação à(s) outra(s).

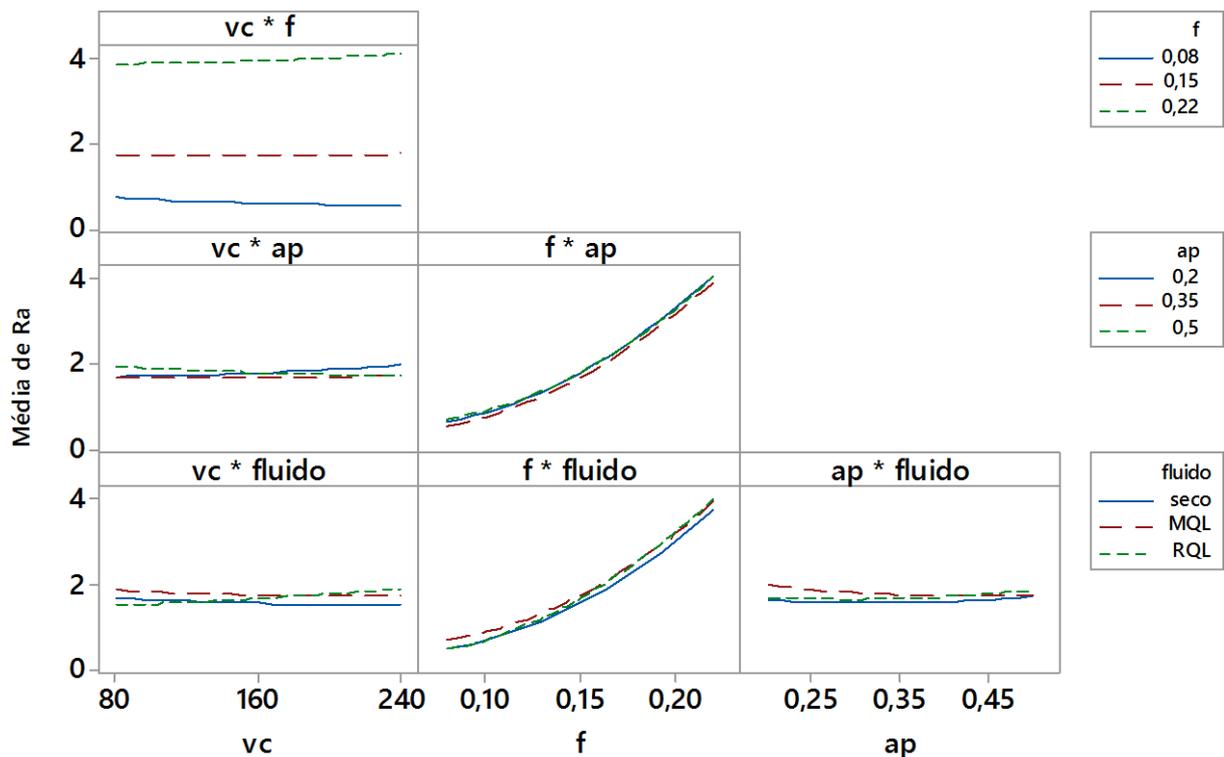


Figura 4.7 – Gráficos de interação para  $R_a$

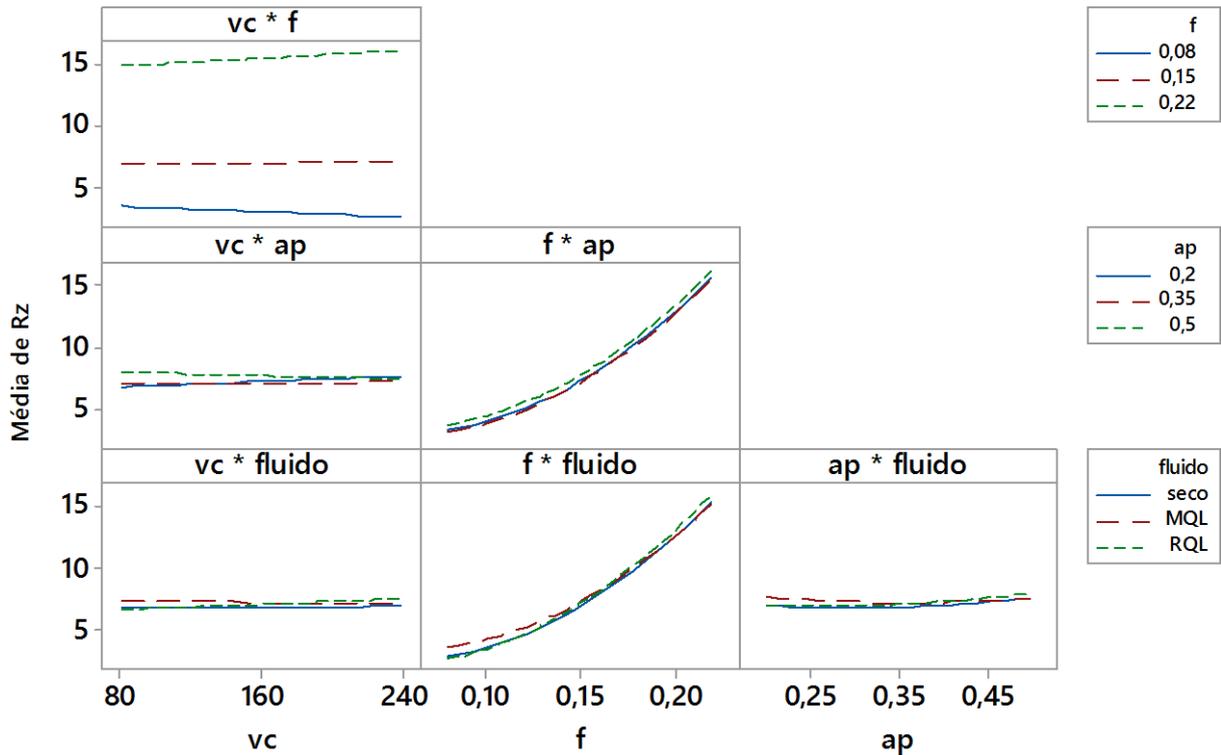


Figura 4.8 – Gráficos de interação para  $R_z$

A análise das Figuras 4.7 e 4.8 mostra a grande influência do avanço sobre o acabamento da peça de Ti torneada. Percebe-se nos gráficos que analisam esse parâmetro que, dentro da faixa de valores pesquisada,  $f$  tem uma influência muito maior que as demais variáveis de entrada sobre a resposta do sistema, haja vista que o aumento desse parâmetro tem efeito muito acentuado no aumento da rugosidade, enquanto a influência das outras variáveis de controle é mais visível em uma estreita faixa de valores de rugosidade. Nesse sentido, nível baixo de  $f$  é um requisito fundamental para um melhor acabamento. A influência desse fator é confirmada pela teoria de usinagem e comprovada pela análise da Tabela 4.1, já que os menores valores das rugosidades foram obtidos nas amostras 1, 8, 11 e 13 (exceto pelo ensaio 1 para MQL), cujo valor de avanço está em nível baixo ( $f = 0,08$  mm/rev.). A recíproca também é verdadeira, uma vez que as maiores rugosidades foram obtidas quando o avanço estava em nível alto ( $f = 0,22$  mm/rev.), o que corresponde às amostras 2, 6, 9 e 15.

Como identificado na ANOVA, os efeitos das interações  $v_c \times fluido$  e  $v_c \times f$  são estatisticamente significativos em relação à  $R_a$  e  $R_z$ , respectivamente. Acerca da primeira interação mencionada, as Figuras 4.7 e 4.8 mostram que há uma tendência de melhoria do acabamento com o aumento da  $v_c$  na usinagem a seco e acontece o oposto na usinagem com RQL, sendo tal tendência mais pronunciada para  $R_a$ . Parece haver uma maior interação

$v_c \times \text{fluido}$  no torneamento a seco e com RQL, o que é percebido pela maior inclinação das retas correspondentes. Pelas figuras apresentadas, não está bem clara a influência da mudança da  $v_c$  ou das interações envolvidas com esse parâmetro sobre a resposta na usinagem com MQL.

Na interação  $v_c \times f$ , o aumento da  $v_c$  tende a diminuir a rugosidade para menor  $f$ , ao passo que, para  $f$  em nível alto, maior rugosidade é obtida com o incremento da  $v_c$ , o que mostra o efeito de interação de uma variável de controle sobre a outra. Embora a influência de  $a_p$  ou de suas interações não tenha sido detectada do ponto de vista estatístico, nota-se pelos gráficos de interação  $v_c \times a_p$  das Figuras 4.7 e 4.8 que, para baixa  $v_c$ , níveis baixos ou médios de  $a_p$  proporcionam melhor acabamento. Por outro lado, à medida que a  $v_c$  aumenta, há uma certa tendência de que valores mais altos de  $a_p$  proporcionem melhor qualidade da superfície, sobretudo para  $R_a$ . A seguir, cada condição lubrificante é analisada separadamente.

#### 4.1.1 Usinagem a seco

Para auxiliar na avaliação dos efeitos dos fatores controláveis sobre o acabamento da peça, foram gerados gráficos de superfície de resposta com auxílio do *software* Minitab® 17. Nesses gráficos, a resposta do sistema é retratada por meio de uma superfície tridimensional que modela o comportamento da rugosidade diante da variação de dois parâmetros de entrada, enquanto os demais fatores controláveis são fixados a um nível determinado, geralmente o nível médio experimental. As Figuras 4.9 e 4.10 mostram gráficos de superfície de resposta para  $R_a$  e  $R_z$ , respectivamente, na usinagem a seco.

Conforme verificado pelas Figuras 4.9a, 4.9b, 4.10a e 4.10b e de acordo com a análise anterior, o avanço tem grande influência sobre a qualidade da superfície usinada e deve ser mantido em nível baixo para a obtenção de menores valores de rugosidade. A Figura 4.9a sugere que maior nível de  $v_c$  diminui ligeiramente  $R_a$  no nível baixo de  $f$ .

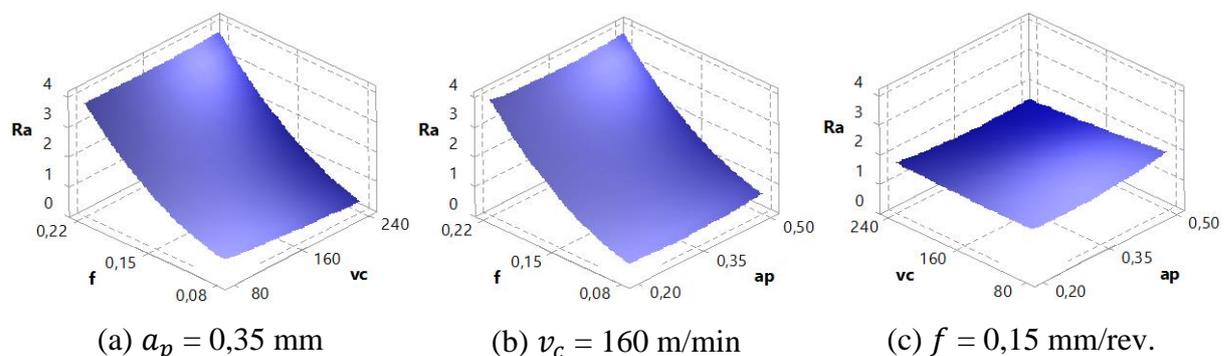


Figura 4.9 – Gráficos de superfície de resposta para  $R_a$  na usinagem a seco

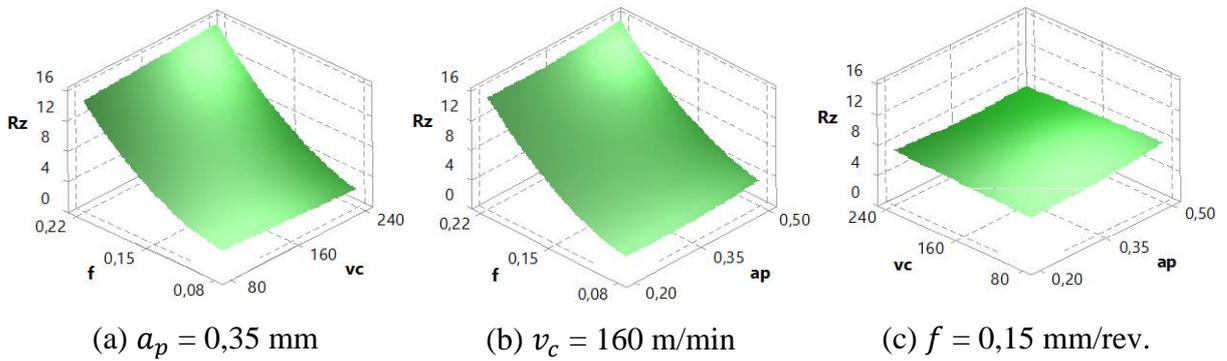


Figura 4.10 – Gráficos de superfície de resposta para  $R_z$  na usinagem a seco

Devido à grande influência do  $f$  para a faixa de rugosidades obtida, a influência dos demais parâmetros sobre a resposta não é muito perceptível. Contudo, para cada nível de avanço, há uma estreita faixa de rugosidade afetada pelos demais parâmetros de corte, como atestam os gráficos de contorno da Figura 4.11 relativos à usinagem a seco. Neles, a resposta do sistema é modelada em forma de uma superfície bidimensional (área), na qual são delimitadas faixas específicas de valores da resposta através de contornos com cores diferentes. Para os gráficos da Figura 4.11,  $f$  foi fixado em nível baixo ( $f = 0,08$  mm/rev.), uma vez que o menor nível desse parâmetro de corte possibilita o melhor acabamento, conforme mencionado na literatura e atestado em análise prévia.

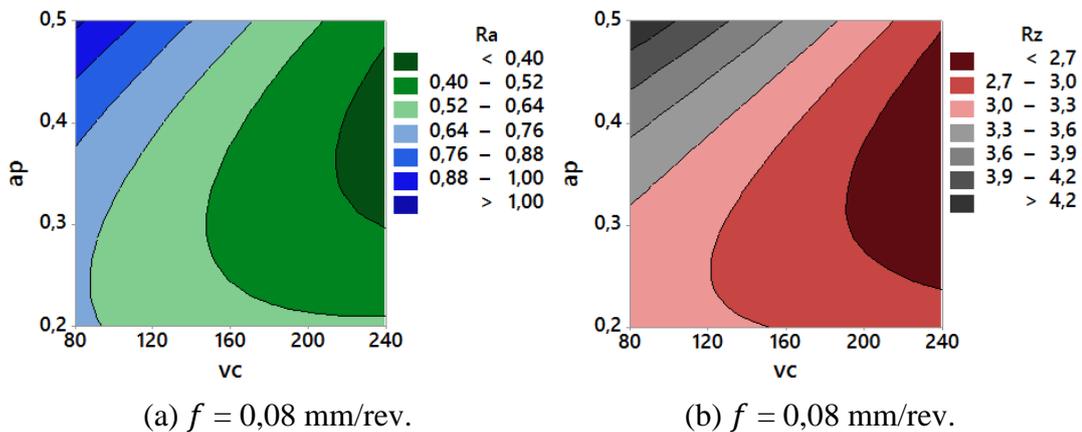


Figura 4.11 – Gráficos de contorno de  $v_c \times a_p$  na usinagem a seco para: (a)  $R_a$ ; (b)  $R_z$

Na usinagem a seco, de acordo com a Figura 4.11, as menores  $R_a$  e  $R_z$  são obtidas com uma combinação de  $v_c$  em nível alto e  $a_p$  em um nível entre médio e alto. Tal comportamento de melhoria do acabamento com o aumento da  $v_c$  foi observado por Khan e Maity, 2018, Liu et al., 2013, Muthukrishnan e Davim, 2011, Niharika et al., 2016, e Revankar et al., 2014, os quais atribuíram esse fato ao amolecimento do material devido às altas temperaturas geradas, o

que suplantaria o efeito do encruamento promovido pela usinagem e provocaria para a redução da força de corte e da deformação do cavaco na ponta da ferramenta. Dessa forma, o emprego de maior  $v_c$  aumenta a temperatura, o que pode provocar o amolecimento térmico no torneamento a seco de Ti-CP Gr. 4, com efeito na diminuição de  $R_a$  e  $R_z$ .

Embora não tenha sido detectada influência estatística significativa da profundidade de corte sobre as variáveis de saída, a Figura 4.11 sugere que um nível entre médio e alto desse parâmetro pode contribuir na diminuição de uma faixa de rugosidade. A melhoria do acabamento com o incremento de  $a_p$  também foi observado nos trabalhos de Kumar et al., 2013, e Sangwan et al., 2015. Os primeiros não explicaram a causa desse fenômeno, enquanto os últimos atribuíram a diminuição da rugosidade ao amolecimento do material da peça devido ao aumento de temperatura gerado pelo acréscimo do volume de material sendo removido na operação de corte. Sob tal perspectiva, tanto  $a_p$  quanto  $v_c$  mais altas atuariam de forma similar, gerando calor suficiente para superar o encruamento do material, provocar seu amolecimento térmico e diminuir a resistência mecânica da peça, o que facilitaria a remoção do cavaco e preservaria a superfície torneada da peça. Entretanto, tal situação não tem respaldo na literatura tradicional de usinagem, uma vez que maior  $a_p$  tende a incrementar a força de usinagem pela maior quantidade de material removida e isso aumenta a possibilidade de flexões, com prejuízo ao acabamento [Machado et al., 2015]. Por outro lado, a abordagem tradicional da usinagem de Ti recomenda que a  $a_p$  de cada passe sucessivo seja maior do que a profundidade da camada encruada do passe anterior. Sob esse aspecto, a camada interna do material (não endurecida por deformação) possui dureza menor que a camada da superfície da peça, o que pode auxiliar na diminuição das forças sobre a ferramenta durante o torneamento. Essa situação, no entanto, não pôde ser atestada, tendo em vista o fato de que o efeito de encruamento do Ti-CP Gr. 4 durante a usinagem não foi avaliado nesse trabalho. Um benefício adicional do aumento de  $a_p$  é que, estando em nível alto (0,5 mm), a profundidade de corte torna-se maior que o raio de ponta da ferramenta (0,4 mm). Nesse caso, parte do contato da ferramenta com a peça passa a ser feito na porção reta da aresta de corte, o que aumenta o ângulo de posição efetivo ( $\chi_r$ ) da ferramenta, com conseqüente diminuição da força de profundidade. Isso torna a força passiva de usinagem mais estável, com menor suscetibilidade a vibração, o que também auxilia na obtenção de melhor qualidade da superfície usinada [Diniz et al., 2014; Sandvik, 2017].

#### 4.1.2 Usinagem com MQL

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram os gráficos de superfície correspondentes ao efeito da

variação dos parâmetros de corte sobre as rugosidades no torneamento com MQL. As Figuras 4.12a, 4.12b, 4.13a e 4.13b reiteram a grande influência do avanço sobre a rugosidade, o qual deve ser mantido em nível baixo com vistas a um melhor acabamento. A influência dos outros fatores não é tão perceptível através dos gráficos. Por isso, a fim de entender a relação entre rugosidade e os demais parâmetros de corte, a Figura 4.14 apresenta gráficos de contorno de  $v_c \times a_p$  para  $R_a$  e  $R_z$  na usinagem com MQL, fixando  $f$  em nível baixo (0,08 mm/rev.).

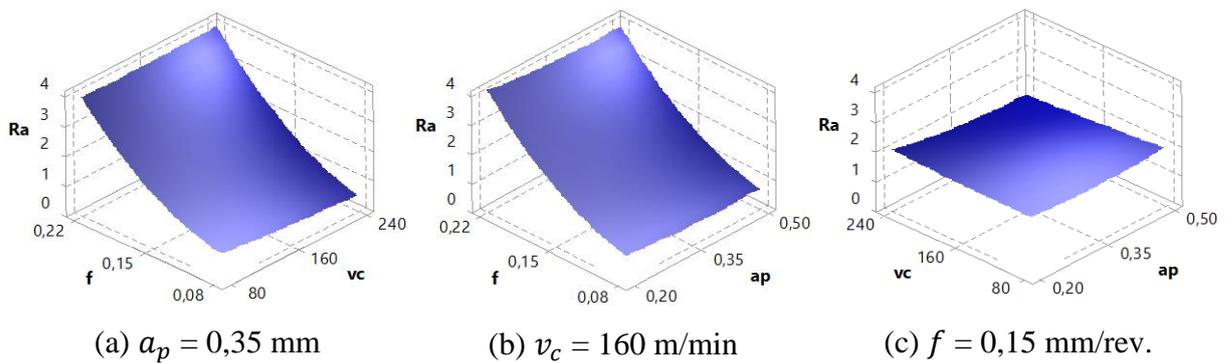


Figura 4.12 – Gráficos de superfície de resposta para  $R_a$  na usinagem com MQL

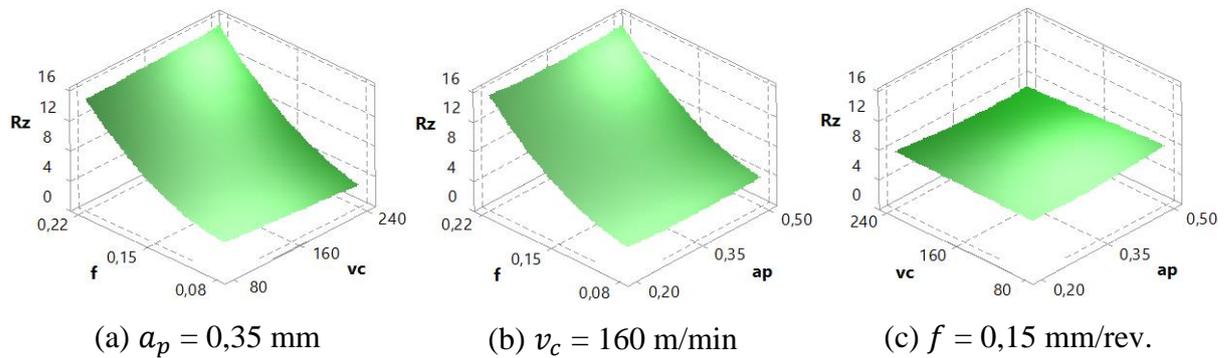


Figura 4.13 – Gráficos de superfície de resposta para  $R_z$  na usinagem com MQL

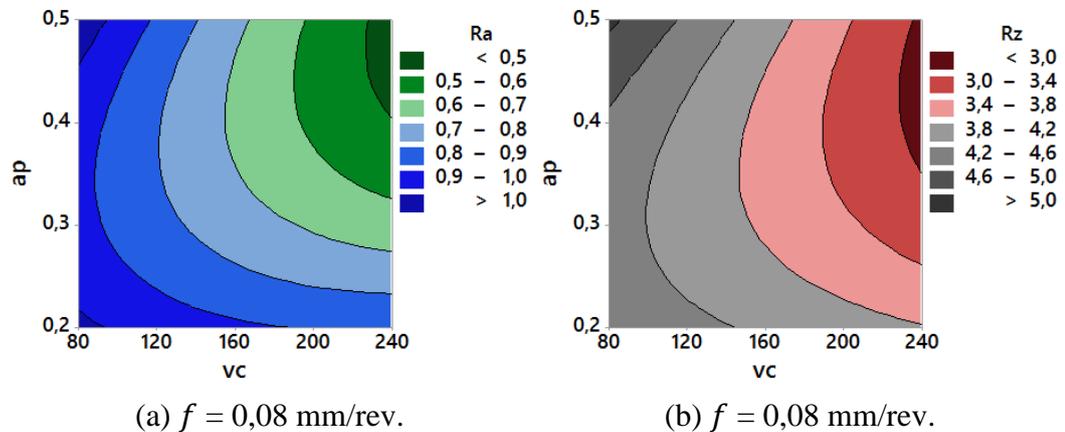


Figura 4.14 – Gráficos de contorno de  $v_c \times a_p$  na usinagem com MQL para: (a)  $R_a$ ; (b)  $R_z$

Conforme a Figura 4.14, a minimização da rugosidade no torneamento com MQL passa pela adoção de  $v_c$  e  $a_p$  em nível alto. Dessa forma, o efeito da  $v_c$  e  $a_p$  sobre o acabamento na usinagem com MQL é semelhante ao efeito produzido no torneamento a seco, de modo que a explicação para o fenômeno também é similar. Logo, alta  $v_c$  gera temperaturas elevadas que tendem a promover o amolecimento térmico do material, o que diminui a resistência mecânica da peça com consequente redução das forças de corte e da deformação do cavaco sobre a ferramenta, preservando a qualidade da superfície usinada [Khan e Maity, 2018, Liu et al., 2013, Muthukrishnan e Davim, 2011, Niharika et al., 2016, e Revankar et al., 2014]. Em relação à profundidade de corte, maior nível de  $a_p$  pode ultrapassar a profundidade da camada encruada durante o torneamento, de forma que a usinagem seja feita em uma porção de material com resistência mecânica menor que a da superfície da peça, o que diminui os esforços de corte. Além disso, um aumento da profundidade de corte tende a diminuir a força de profundidade, tornando-a mais estável e com menor suscetibilidade a vibração, o que também auxilia na obtenção de melhor qualidade da superfície usinada [Diniz et al., 2014; Sandvik, 2017].

Comparando-se as respectivas regiões de otimização do acabamento das Figuras 4.11 e 4.14 e os valores constantes na Tabela 4.1, verifica-se que a diferença entre a menor rugosidade alcançada tanto na usinagem a seco quanto com MQL não é tão grande do ponto de vista prático, embora os resultados sejam um pouco menores no torneamento a seco. Mesmo com a adoção de lubrificante, que tende a reduzir o atrito e melhorar as características tribológicas da interface cavaco-ferramenta, não se obteve uma qualidade da superfície melhor do que na condição sem fluido. Provavelmente o efeito de amolecimento térmico seja preponderante para a obtenção de um melhor acabamento nas duas condições (seco e MQL) e, nesse caso, a usinagem a seco tende a gerar maior temperatura. Uma das hipóteses para isso pode estar relacionada à possível diminuição da temperatura com a aplicação de MQL. De acordo com Shokrani et al., 2012, a névoa de MQL lubrifica a interface cavaco-ferramenta, reduzindo o atrito e, consequentemente, minimizando a temperatura de usinagem. Sob esse ponto de vista, tal redução de temperatura poderia facilitar o encruamento do material em detrimento do amolecimento térmico. Assim, para um mesmo nível de  $v_c$ , a usinagem a seco tende a potencializar o efeito do amolecimento térmico, uma vez que não há fluido de corte envolvido. Também é possível que a aplicação em MQL tenha refrigerado a zona de corte em alguma proporção e auxiliado na diminuição do calor gerado, o que contribuiria ainda mais na necessidade de maior  $v_c$  no processo com vistas à melhoria da qualidade da superfície da peça. Porém, como destacado por Boswell et al., 2017, não há consenso na literatura sobre a capacidade refrigerante do sistema MQL.

### 4.1.3 Usinagem com RQL

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram os gráficos de superfície para a usinagem com RQL. Assim como atestado nas demais condições de lubrificação, é notória a influência do avanço sobre o acabamento, o qual deve ser mantido em nível baixo para produzir melhor acabamento. Gráficos de contorno para o torneamento com RQL são mostrados na Figura 4.17, relacionando o efeito da  $v_c$  e  $a_p$  sobre a qualidade da superfície da peça para  $f = 0,08$  mm/rev.

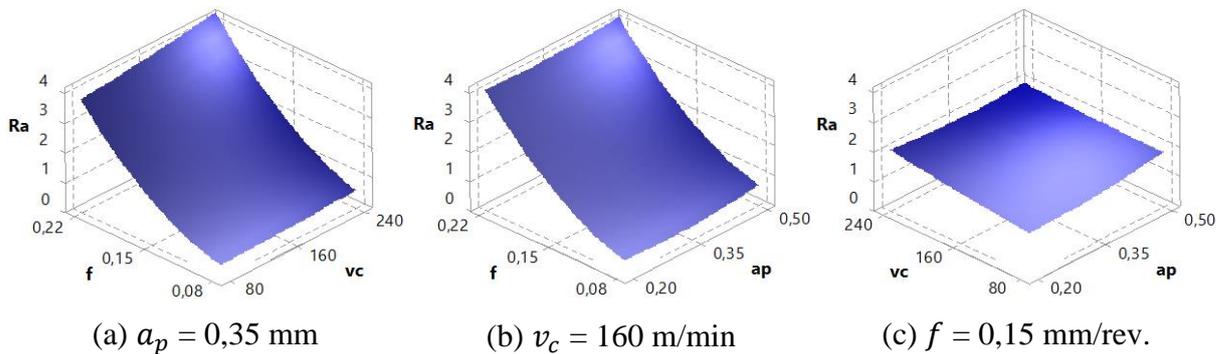
(a)  $a_p = 0,35$  mm(b)  $v_c = 160$  m/min(c)  $f = 0,15$  mm/rev.

Figura 4.15 – Gráficos de superfície de resposta para  $R_a$  na usinagem com RQL

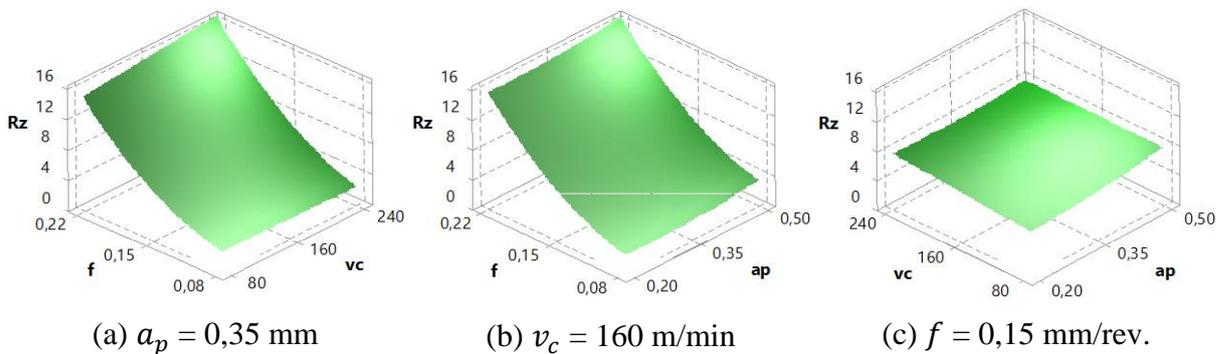
(a)  $a_p = 0,35$  mm(b)  $v_c = 160$  m/min(c)  $f = 0,15$  mm/rev.

Figura 4.16 – Gráficos de superfície de resposta para  $R_z$  na usinagem com RQL

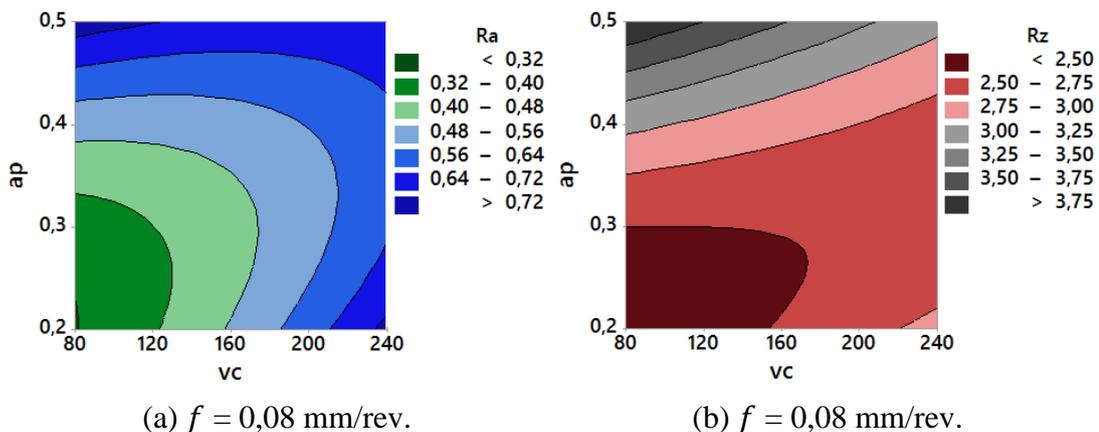
(a)  $f = 0,08$  mm/rev.(b)  $f = 0,08$  mm/rev.

Figura 4.17 – Gráficos de contorno de  $v_c \times a_p$  na usinagem com RQL para: (a)  $R_a$ ; (b)  $R_z$

A minimização da rugosidade para RQL, conforme mostrado na Figura 4.17, depende da adoção de  $v_c$  e  $a_p$  em nível baixo. Embora não seja muito perceptível, há uma faixa muito estreita no encontro dos níveis baixos de  $v_c$  e  $a_p$  da Figura 4.17a que proporciona, teoricamente, menor nível de rugosidade média ( $R_a < 0,32 \mu\text{m}$ ). Dessa forma, ambos os fatores controláveis ( $a_p$  e  $v_c$ ) devem ser fixados em nível baixo para o torneamento com RQL, o que é contrário ao resultado obtido com as outras condições lubrificantes.

No que tange à velocidade de corte, alguns estudos relacionados ao torneamento de ligas de titânio demonstraram que as altas temperaturas geradas por  $v_c$  mais altas podem influenciar negativamente a rugosidade da peça [Çelik et al., 2017; Chauan e Dass, 2012; Gupta et al., 2016a; Gupta et al., 2016b; Kosaraju e Anne, 2013; Kumar et al., 2013; Patil et al., 2016; Ramesh et al., 2012; Ulutan e Ozel, 2011]. Os autores desses trabalhos atribuíram esse fato ao incremento do atrito, à formação de uma camada de material aderido à superfície da ferramenta (em consequência da alta reatividade química do titânio, com efeito de desviar a trajetória original da ferramenta e comprometer o acabamento) e/ou ao desgaste da ferramenta. Sob tal ponto de vista, a diminuição da taxa de remoção de material pelo decréscimo da  $v_c$ , do  $f$  ou de ambos tenderia a diminuir os valores de rugosidade, pois amenizaria os problemas relatados. Porém, tendo em vista o cuidado tomado no presente trabalho no sentido de que o desgaste da ferramenta não tivesse grande efeito sobre o acabamento, uma vez que cada aresta foi utilizada em apenas três passes, estima-se que o mesmo não tenha tido papel relevante na deterioração da qualidade da superfície, o que poderia estar vinculado ao torneamento com  $v_c$  maior, embora o desgaste da ferramenta não tenha sido verificado no presente trabalho.

Diferentemente do que se supunha, a maior quantidade de fluido aplicada por RQL (cinco vezes maior que a vazão de MQL) não possibilitou que maior  $v_c$  proporcionasse melhor acabamento. Uma hipótese para isso pode estar relacionada a um possível efeito refrigerante de RQL: a diminuição da temperatura provocada pela aplicação de fluido em quantidade reduzida pode ter sido tal que o efeito do encruamento do material superou o efeito do amolecimento térmico, mesmo para  $v_c$  em nível alto. Supondo que a hipótese seja verdadeira, a  $v_c$  empregada não foi suficiente para elevar a temperatura a ponto de ocorrer o amolecimento térmico. Nesse caso, o encruamento do material da peça seria o fenômeno dominante e o aumento da  $v_c$  intensificaria o atrito na interface cavaco-ferramenta, com prejuízo ao acabamento da peça. Assim, estima-se que a menor  $v_c$  contribuiu para a diminuição do atrito, uma vez que reduz a carga de material sobre a ferramenta, com efeito benéfico na melhoria do acabamento. Outrossim, presume-se que a lubrificidade proporcionada pela RQL no torneamento de Ti-CP

Gr. 4 tenha sido efetiva no nível baixo desse parâmetro de corte, auxiliando na diminuição do atrito, facilitando o escoamento do cavaco e incrementando a qualidade da superfície nessa condição em específico.

No torneamento com RQL (Figura 4.17), nível mais baixo de  $a_p$  tende a minimizar  $R_a$  e  $R_z$ . Conforme a literatura, tal fato pode estar relacionado à maior carga térmica e vibração gerada na máquina-ferramenta devido ao incremento de material sobre a ferramenta com o aumento de  $a_p$ . Isso também promove um aumento do atrito devido à maior área de contato na interface cavaco-ferramenta, o que poderia incrementar o desgaste da ferramenta e prejudicar o acabamento [Chauhan e Dass, 2012; Niharika et al., 2016; Ramesh et al., 2008; Revankar et al., 2014]. Entretanto, considera-se que o desgaste da ferramenta não tenha atuado de forma proeminente na deterioração da qualidade da superfície usinada pelo fato de que cada aresta foi utilizada em apenas três passes, embora a possível ocorrência do desgaste na ferramenta não tenha sido investigada. Ainda assim, acredita-se que a vibração gerada na máquina-ferramenta tenha sido o fator preponderante para o aumento da rugosidade com o incremento de  $a_p$  na usinagem com RQL. Corroborando a isso, supondo que o encruamento tenha ocorrido em toda a faixa de  $v_c$  ensaiada, um aumento de  $a_p$  intensificaria a vibração, de modo que a redução da profundidade de corte tende a melhorar o acabamento, ainda que a influência de  $a_p$  não tenha sido detectada sobre ambas as variáveis de resposta do ponto de vista estatístico.

Na comparação com as outras condições de lubrificação (Tabela 4.1 e Figuras 4.11, 4.14 e 4.17), os menores valores absolutos de rugosidade obtidos na usinagem com RQL não são muito diferentes dos demais. Porém, os parâmetros de corte que otimizam a rugosidade são diferentes para RQL em relação às outras condições, o que mostra claramente o efeito de interação  $v_c \times fluido$  e sua influência na produtividade do processo. Parece haver uma relação entre a necessidade de  $v_c$  e  $a_p$  maiores em aplicações com mínima ou nenhuma lubrificação. Altas  $v_c$  geram temperaturas mais elevadas, as quais tendem a favorecer o amolecimento térmico do material em detrimento do encruamento decorrente da usinagem, reduzindo a força de corte e a deformação do cavaco na ponta da ferramenta, com consequente melhoria do acabamento. Por outro lado, observou-se que um nível maior de  $a_p$  pode tanto prejudicar o acabamento (por conta da maior vibração gerada devido ao incremento do volume de material removido) quanto promover menor rugosidade (por tornar a força de profundidade mais estável com menor suscetibilidade à vibração), dependendo da condição lubrificante empregada. Dessa forma, cada condição de lubrificação atua de maneira específica em relação aos parâmetros de corte ótimos com vistas à diminuição da rugosidade da peça.

## 4.2 Análise comparativa dos perfis de rugosidade

Nesta seção, os perfis de rugosidade são comparados nas mesmas condições de corte para verificar sua relação com esses parâmetros e com os diferentes meios lubrificantes. As Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 mostram os perfis de rugosidade para a amostra 1 na usinagem a seco, com MQL e com RQL, respectivamente, cuja combinação de parâmetros tem  $v_c$  e  $f$  em nível baixo e  $a_p$  em nível médio. Tais perfis retratam a grande influência do avanço sobre a rugosidade, como identificado pela análise estatística e corroborado pela teoria de usinagem. Observa-se que a distância entre um pico e outro (ou entre dois vales), ao longo do comprimento de amostragem, corresponde ao valor aproximado de  $f$ . Além disso, para torneamento estável com ferramenta não desgastada e avanço menor que o raio de ponta da ferramenta ( $f < r_\epsilon$ ), a rugosidade média da superfície segue aproximadamente a Equação 2.3, aumentando ou diminuindo na proporção quadrática do avanço [Machado et al., 2015].

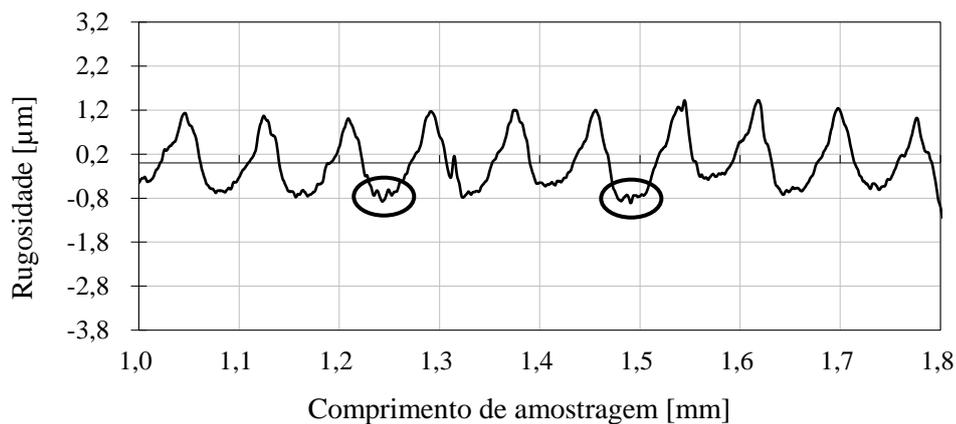


Figura 4.18 – Perfil de rugosidade da amostra 1 na usinagem a seco ( $v_c = 80$  m/min;  $f = 0,08$  mm/rev.;  $a_p = 0,35$  mm)

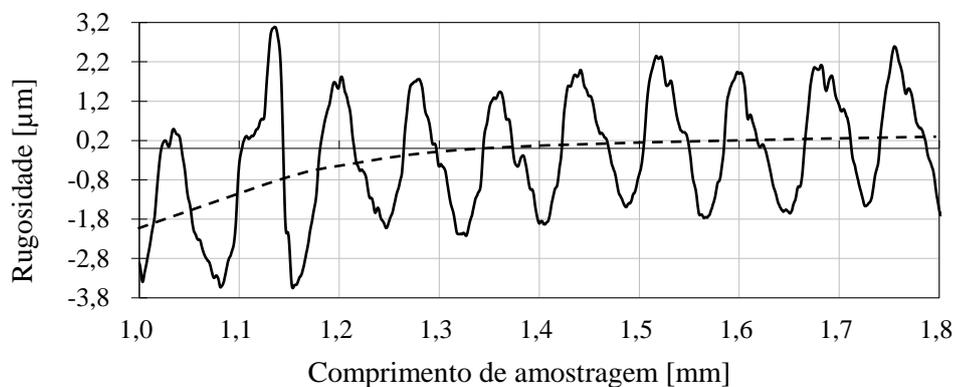


Figura 4.19 – Perfil de rugosidade da amostra 1 na usinagem com MQL ( $v_c = 80$  m/min;  $f = 0,08$  mm/rev.;  $a_p = 0,35$  mm)

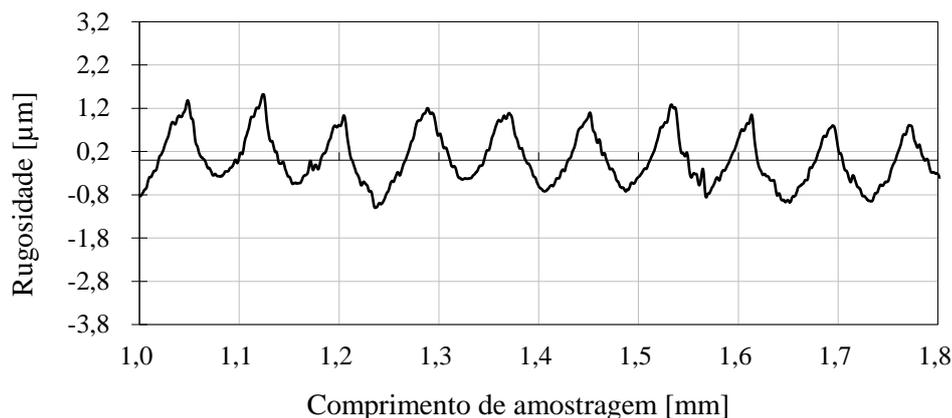


Figura 4.20 – Perfil de rugosidade da amostra 1 na usinagem com RQL ( $v_c = 80$  m/min;  $f = 0,08$  mm/rev.;  $a_p = 0,35$  mm)

Na condição do teste 1, com  $f$  e  $v_c$  mínimos, os perfis de rugosidade das peças torneadas a seco (Figura 4.18) e com RQL (Figura 4.20) foram semelhantes, embora a análise prévia tenha apontado que a  $v_c$  relativa a essas amostras fosse mais favorável à RQL. Ambos os perfis apresentaram amplitude similar e picos bem definidos. Percebe-se alguma perturbação nos vales, especialmente na condição a seco (realçado na Figura 4.18), o que pode decorrer do encruamento causado pela usinagem devido à baixa  $v_c$ , que provoca variação da força de corte. Outrossim, tais perturbações também podem estar relacionadas às tensões de cisalhamento localizadas resultantes da alta resistência ao cisalhamento dinâmico do Ti durante a usinagem, as quais geram cavacos segmentados que promovem forças dinâmicas cíclicas, tendendo a causar baixa qualidade da superfície usinada. Além disso, o baixo módulo de elasticidade do Ti implica deflexões na peça durante a usinagem e provoca o aumento da vibração e do atrito, podendo influenciar negativamente na rugosidade. O próprio sistema de medição utilizado pode ter influência nas perturbações verificadas, já que é um equipamento de contato mecânico, cuja ponta do apalpador do rugosímetro tem um raio considerável ( $5 \mu\text{m}$ ) para essa medição, considerando o baixo avanço empregado na amostra sob análise.

Para o torneamento com MQL, há maior variação na amplitude do perfil de rugosidade, traduzindo-se no maior valor de  $R_a$  e, sobretudo, de  $R_z$ , já que essa última é mais suscetível a oscilações (Figura 4.19). Isso corrobora a análise anterior, na qual menor  $v_c$  não é adequada para o torneamento de Ti nessa condição. Também há uma pequena ondulação no perfil da superfície (identificada pela linha tracejada da Figura 4.19). Segundo Petropoulos et al, 2010, e Stephenson e Agapiou, 2016, as ondulações derivam de erros de fixação, erros da ferramenta ou na sua geometria (incluindo desgaste), vibrações no sistema ou heterogeneidade do material. Uma vez que a fixação é adequada (comprimento curto da peça em balanço) e presumindo que

o desgaste não tenha sido relevante, acredita-se que a ondulação vista na Figura 4.19 possa ter sido causada por alguma vibração atípica ocorrida no processo ou pela falta de homogeneidade do material em um ponto específico do corpo de prova. Outra hipótese pode estar relacionada ao encruamento do material nessa condição. Conforme visto anteriormente, alta  $v_c$  é necessária para reduzir a rugosidade no torneamento com MQL. Sob a condição da amostra 1, com nível baixo de  $v_c$ , o encruamento possivelmente seria facilitado pela menor temperatura do processo, com consequente aumento da força de usinagem. Esse aumento, aliado ao baixo módulo de elasticidade do titânio, poderia acarretar em deflexão da peça durante o torneamento, com desvio de forma que promoveria a ondulação vista no perfil de rugosidade.

Nota-se também um ressalto adicional em um dos picos na usinagem com MQL (Figura 4.19), o que pode estar associado ao enrolamento do cavaco na peça durante o torneamento (Figura 4.21a), que ocorreu em todos os ensaios, em maior ou menor proporção, nas diferentes condições lubrificantes. O atrito do cavaco contra a superfície torneada pode provocar defeitos superficiais como marcas, sulcos, rebarbas e deposição de detritos (Figura 4.21b).

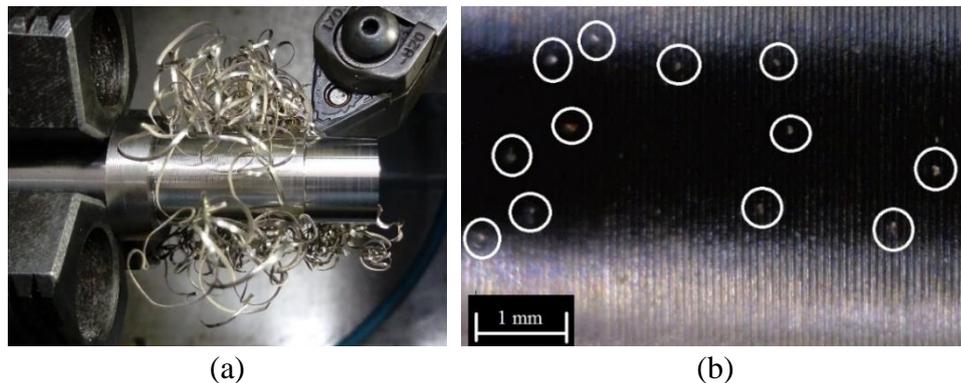


Figura 4.21 – Possíveis causas de perturbações nos perfis de rugosidade: (a) cavaco enrolado na peça; (b) marcas na superfície

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 retratam os perfis de rugosidade da amostra 7 na usinagem a seco, com MQL e com RQL, respectivamente, os quais foram testados com os parâmetros de corte no nível médio do experimento. De modo geral, os perfis de rugosidade são bem definidos para as diferentes condições de lubrificação. A amplitude do perfil na usinagem a seco é um pouco menor que as demais (Figura 4.22 e Tabela 4.1), o que reflete na menor rugosidade para essa condição. O aumento do  $f$  em relação às amostras do teste 1 (retratadas nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20) claramente aumentou a amplitude dos perfis, sobretudo na usinagem a seco e com RQL. Para essas condições de lubrificação, esse aumento de amplitude fez com que as discontinuidades fossem menos perceptíveis para as amostras do ensaio 7 na

comparação com as amostras do teste 1.

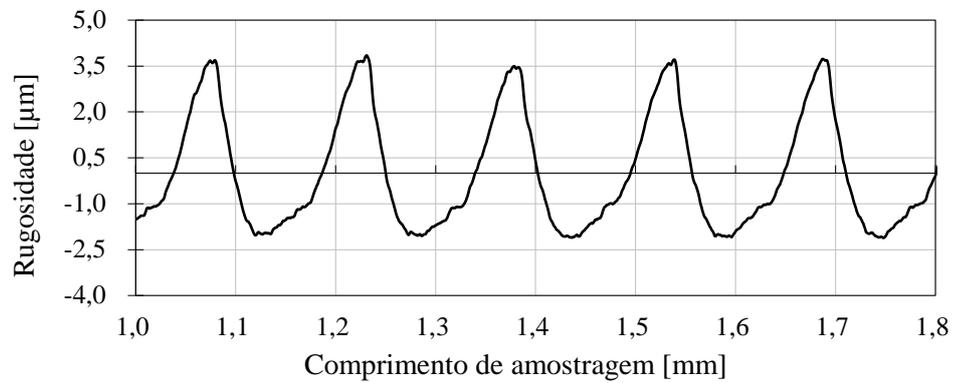


Figura 4.22 – Perfil de rugosidade da amostra 7 na usinagem a seco ( $v_c = 160$  m/min;  $f = 0,15$  mm/rev.;  $a_p = 0,35$  mm)

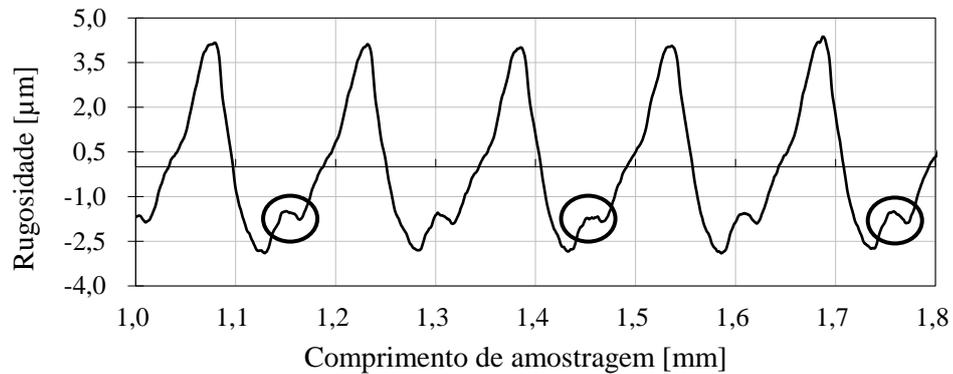


Figura 4.23 – Perfil de rugosidade da amostra 7 na usinagem com MQL ( $v_c = 160$  m/min;  $f = 0,15$  mm/rev.;  $a_p = 0,35$  mm)

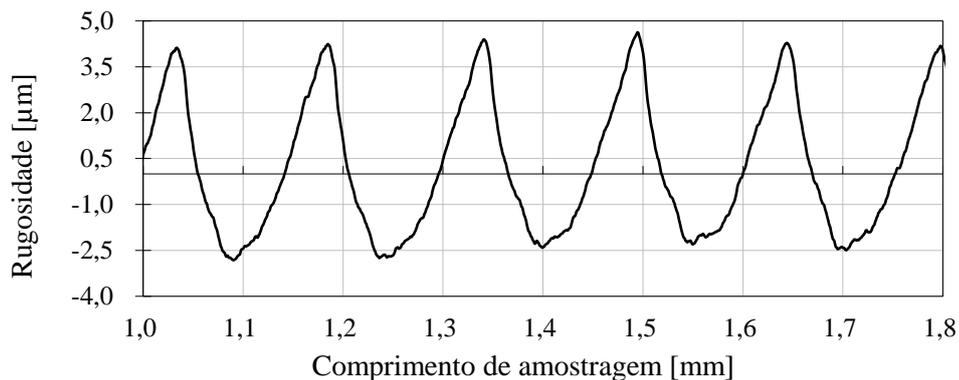


Figura 4.24 – Perfil de rugosidade da amostra 7 na usinagem com RQL ( $v_c = 160$  m/min;  $f = 0,15$  mm/rev.;  $a_p = 0,35$  mm)

Na usinagem com MQL, a Tabela 4.1 mostra que os valores de rugosidade da amostra 7 ficaram pouco acima dos valores da amostra 1, mesmo com avanço menor no primeiro ensaio. Isso denota que o aumento de temperatura provocado pela maior  $v_c$  foi benéfico nesse sentido,

permitindo aumentar a produtividade com uma rugosidade próxima à medida na amostra 1. Além disso, com o aumento da  $v_c$ , o perfil é melhor definido e não apresenta ondulação como anteriormente. Contudo, observam-se algumas saliências nos vales do perfil, sendo algumas delas destacadas na Figura 4.23. Uma vez que tais saliências apresentam periodicidade, supõe-se que sua ocorrência esteja principalmente vinculada a um fenômeno contínuo do processo. Sob esse aspecto, estima-se que tenha ocorrido o fenômeno do fluxo lateral, em que uma porção do material da peça sofre deformação sem ser removida sob a forma de cavaco, ficando na peça na forma de rebarbas dos sulcos formados, podendo comprometer o acabamento [Machado et al., 2015]. Ocorrendo continuamente devido ao avanço da ferramenta, o fluxo lateral poderia gerar as perturbações vistas no perfil. Também há possibilidade de que tais perturbações sejam devidas a alguma marca da ferramenta deixada durante o processo.

As Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 mostram, respectivamente, os perfis de rugosidade da amostra 2 para a usinagem a seco, com MQL e com RQL, os quais foram usinados com  $v_c$  e  $f$  em nível alto e  $a_p$  em nível médio.

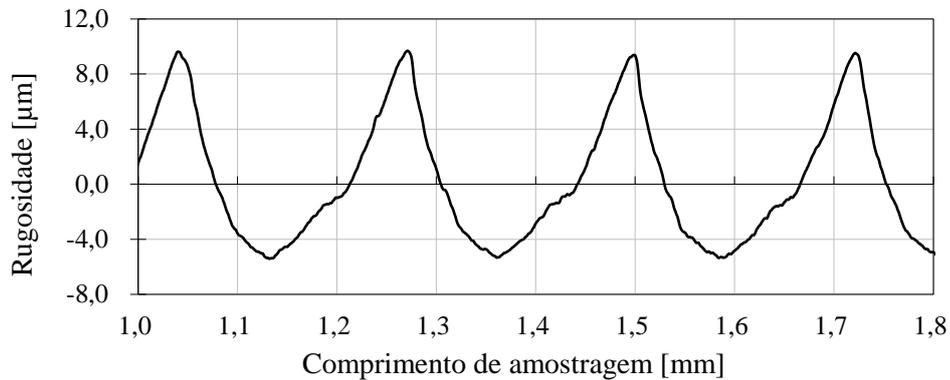


Figura 4.25 – Perfil de rugosidade da amostra 2 na usinagem a seco ( $v_c = 240$  m/min;  $f = 0,22$  mm/rev.;  $a_p = 0,35$  mm)

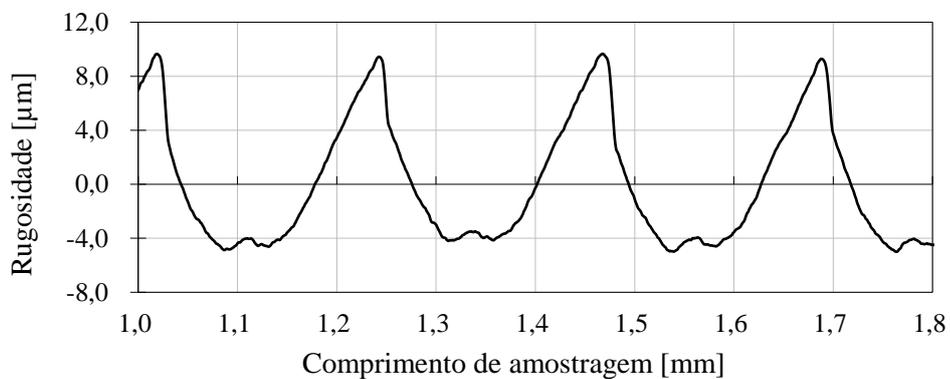


Figura 4.26 – Perfil de rugosidade da amostra 2 na usinagem com MQL ( $v_c = 240$  m/min;  $f = 0,22$  mm/rev.;  $a_p = 0,35$  mm)

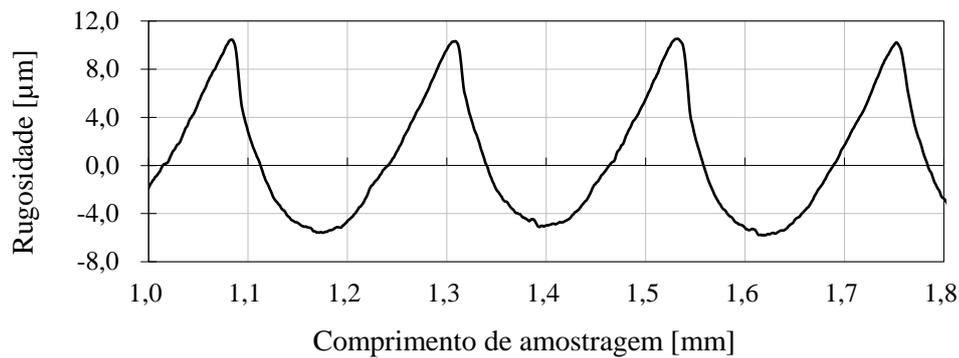


Figura 4.27 – Perfil de rugosidade da amostra 2 na usinagem com RQL ( $v_c = 240$  m/min;  $f = 0,22$  mm/rev.;  $a_p = 0,35$  mm)

Como observado nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27, os perfis de rugosidade para a condição ensaiada são bem definidos. Eles não apresentam protuberâncias consideráveis, especialmente para as condições a seco e com RQL. No torneamento com MQL (Figura 4.26), pequenas saliências são notadas nos vales do perfil, podendo ter relação com o fluxo lateral, como anteriormente mencionado. A amplitude dos perfis de rugosidade da amostra 2 é maior do que nos testes anteriores devido ao maior avanço, que tem a principal influência sobre a altura dos picos e profundidade dos vales. Sobre isso, observa-se no torneamento com RQL que a magnitude do perfil é um pouco maior que as demais, como atestado pelas figuras supracitadas e pela Tabela 4.1, o que indica que  $v_c$  maiores são mais adequadas à usinagem com menor quantidade ou ausência de fluido com vistas ao melhor acabamento. Porém, essa diferença não é tão expressiva na prática, como atestado pelos resultados mostrados na Tabela 4.1, de modo que não há grande diferença na rugosidade entre as três condições lubrificantes avaliadas.

### 4.3 Otimização do experimento

A otimização experimental busca um conjunto de condições que satisfaçam determinados requisitos de qualidade. O presente trabalho visa encontrar os parâmetros de corte que minimizem  $R_a$  e  $R_z$  simultaneamente, proporcionando o melhor acabamento possível da peça. Sob essa perspectiva, cada fator controlável é otimizado através da função *desirability* ( $d$ ) e é combinado em uma função *overall desirability* ( $D$ ). Com isso, são investigados os níveis dos parâmetros de entrada que maximizam o valor de  $D$ .

A otimização experimental foi feita com auxílio do *software* Minitab® 17. A partir dos resultados obtidos na execução da experimentação inicial e do modelo estatístico-matemático envolvido, a rotina de otimização do Minitab® faz uma varredura dos dados buscando atingir um determinado objetivo, que no caso desse estudo é a minimização da rugosidade. A Tabela

4.3 mostra os parâmetros de otimização, bem como as respostas previstas com base nas equações de regressão, os valores buscados como alvo e o valor da função *overall desirability* alcançado. Tendo em vista que as variáveis de resposta são do tipo menor é melhor, estipulou-se como meta obter valores de  $R_a$  e  $R_z$  um pouco menores que os conseguidos nos experimentos iniciais. O gráfico de otimização gerado pelo *software* é mostrado na Figura 4.28.

Tabela 4.3 – Resultados da otimização experimental

Parâmetros de entrada otimizados				Alvo		Valor previsto		Overall desirability
$v_c$	$f$	$a_p$	Fluido	$R_a$	$R_z$	$R_a$	$R_z$	
[m/min]	[mm/rev.]	[mm]		[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[D]
80	0,08	0,20	RQL	0,40	2,50	0,32	2,26	1,000

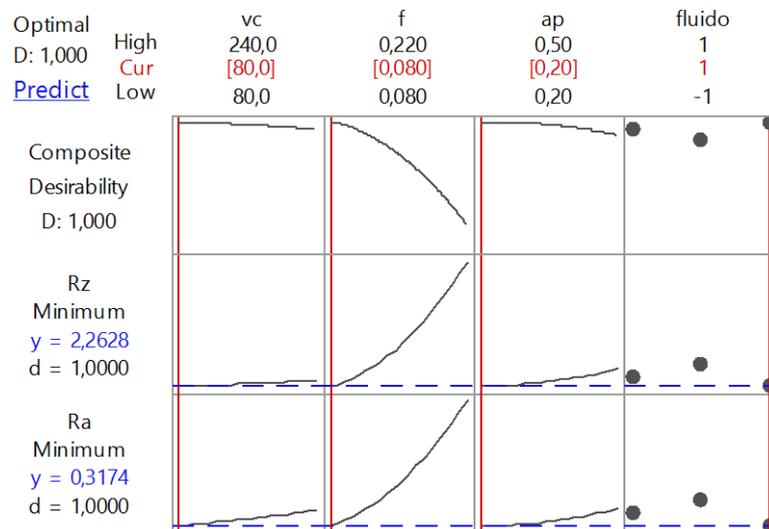


Figura 4.28 – Gráfico de otimização do experimento

Com base nos dados e no modelo adotado, foi atestado pela rotina de otimização do Minitab® que, dentro das condições testadas, o melhor acabamento é alcançado no torneamento com RQL. Para essa condição lubrificante-refrigerante, os valores obtidos na otimização atestam a análise prévia da influência dos parâmetros de corte sobre a qualidade da superfície da peça. Para minimizar a rugosidade, conforme Tabela 4.3 e Figura 4.28,  $f$  deve ser mantido em nível baixo, uma vez que esse é o principal fator de influência sobre o acabamento e sua redução está diretamente relacionada à redução do valor das variáveis de resposta. Baixo nível de  $v_c$  é requerido, o que pode estar relacionado ao encruamento do material dado em função do efeito refrigerante do fluido em quantidade reduzida. Nesse sentido, a diminuição da  $v_c$  contribuiria para a redução do atrito, uma vez que reduziria a carga de material da peça sobre a ferramenta, com efeito benéfico na melhoria da qualidade da superfície da peça. A necessidade de baixa  $a_p$

provavelmente se deve à menor carga térmica e vibração gerada na máquina-ferramenta por conta do menor volume de material removido na usinagem com a diminuição do nível desse parâmetro de corte, o que tende a diminuir o atrito pela menor área de contato na interface cavaco-ferramenta, preservando o acabamento [Chauhan e Dass, 2012; Niharika et al., 2016; Ramesh et al.; 2008; Revankar et al., 2014].

Para efeito de comparação, duas novas otimizações foram feitas. Em cada uma delas, fixou-se um dos níveis de fluido não obtidos na otimização inicial (seco e MQL), de modo que a encontrar os parâmetros de corte ótimos dessas condições que melhoram o acabamento, além de estimar os valores de rugosidade com base no modelo adotado. As Figuras 4.29 e 4.30 mostram os gráficos de otimização para a usinagem a seco e com MQL, respectivamente.

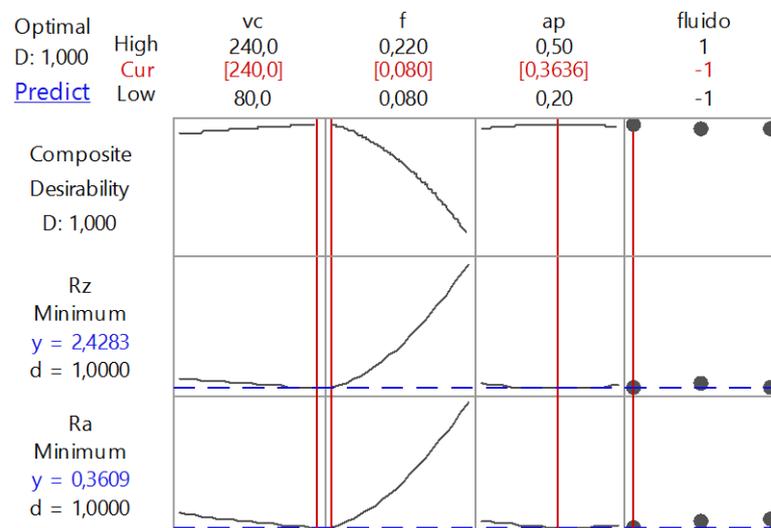


Figura 4.29 – Gráfico de otimização para a usinagem a seco

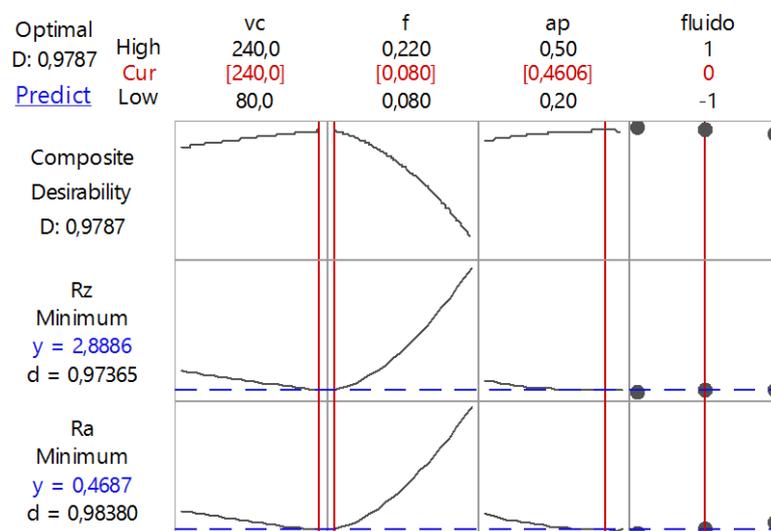


Figura 4.30 – Gráfico de otimização para a usinagem com MQL

Os gráficos das Figuras 4.29 e 4.30 corroboram a análise anterior acerca dos níveis ótimos que minimizam a rugosidade para ambas as condições:  $f$  em nível baixo,  $v_c$  em nível alto e  $a_p$  em nível entre intermediário e alto. Os valores de *overall desirability* obtidos foram de  $D = 1,000$  para a usinagem a seco e  $D = 0,979$  para o torneamento com MQL.

No intuito de verificar a adequação das respostas previstas pelo modelo de regressão com os valores experimentais, os parâmetros de corte otimizados foram testados com a realização de três passes de validação. A partir desses passes, a média dos valores medidos foi tomada como resposta e a Tabela 4.4 apresenta os resultados dos testes, com destaque para RQL, que foi a condição apontada como a melhor escolha pelo *software*.

Tabela 4.4 – Resultados dos testes de validação da otimização

	Resposta	Previsto	Experimental
Seco	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,36	0,66
	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,43	3,57
MQL	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,47	0,51
	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,89	2,60
RQL	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,32	0,46
	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,26	2,63

Conforme a Tabela 4.4, os menores valores de rugosidade teóricos previstos pelo modelo de regressão seriam alcançados na usinagem com RQL, seguido pela usinagem a seco e com MQL. De maneira geral, os resultados dos testes de validação (experimentais) foram maiores que os valores previstos pelo modelo estatístico, exceto por  $R_z$  na usinagem com MQL. A maior diferença entre valores previstos e experimentais deu-se na usinagem a seco, sendo a condição com os piores resultados experimentais do ponto de vista da minimização da rugosidade. Logo, o modelo para essa condição não foi eficaz em extrapolar os valores para além dos obtidos inicialmente, assim como também não foi possível obter acabamento semelhante aos melhores resultados alcançado nos ensaios iniciais. Cabe ressaltar que os dados estimados pela equação de regressão não foram obtidos na experimentação inicial para nenhuma das condições de lubrificação. De forma análoga, a combinação de parâmetros de corte dada na otimização também não foi testada inicialmente para nenhuma condição.

A usinagem com MQL foi a que melhor se aproximou dos resultados previstos, tendo, inclusive, valor de  $R_z$  menor que o estimado pelo modelo. Para RQL, os valores experimentais ficaram muito próximos ou iguais aos melhores resultados alcançados na experimentação inicial, o que sugere que o modelo estatístico-matemático empregado foi efetivo em prever os níveis dos fatores controláveis que otimizam o experimento com vistas a uma melhor

qualidade da superfície usinada. Ainda que os resultados da validação tenham ficado aquém dos previstos, a usinagem com RQL consegue proporcionar o menor valor absoluto de rugosidade média e um dos menores valores de altura máxima média de perfil, provando ser a melhor alternativa na obtenção de bom acabamento da superfície torneada de Ti-CP Gr. 4, conforme a otimização inicialmente gerada pelo Minitab®.

Sob a ótica da produtividade, os baixos níveis de  $v_c$  e  $a_p$  empregados na otimização do experimento com vistas a uma melhor qualidade da superfície torneada de Ti-CP Gr. 4 fazem com que a usinagem com RQL tenha uma taxa de remoção de material menor em comparação às outras condições lubrificantes, o que configuraria uma desvantagem nesse aspecto. Por outro lado, o alto nível de  $v_c$  exigido na usinagem a seco e com MQL para um melhor acabamento tende a incrementar o desgaste do inserto, já que esse é o parâmetro de corte de maior influência sobre a vida da ferramenta [Diniz et al., 2014; Machado et al., 2015]. Levando isso em consideração, o uso de RQL tende a ser mais benéfico nesse sentido. Entretanto, como o desgaste da ferramenta não foi avaliado nesse trabalho, necessitar-se-ia um estudo para investigar se torneamento de Ti-CP Gr. 4 com RQL é realmente capaz de conjugar maior vida de ferramenta com boa qualidade da superfície torneada.

Do ponto de vista da usinagem ambientalmente amigável, o torneamento a seco é a melhor condição, haja vista a eliminação dos problemas econômicos, ambientais e ocupacionais associados ao uso de fluido de corte, o que confere uma vantagem sobre as demais condições de lubrificação testadas nesse trabalho. Porém, assim como os maiores parâmetros de corte podem afetar drasticamente a vida da ferramenta, também a ausência de fluido de corte pode atuar no mesmo sentido, pois ambos tendem a favorecer o aumento de temperatura e os problemas associados a isso, sobretudo em relação ao desgaste. Estudos têm demonstrado que o uso de fluido de corte na usinagem de Ti em quantidade mínima (MQL) ou reduzida (RQL) proporciona vantagens em comparação à usinagem a seco. Dentre essas vantagens, destacam-se o aumento da vida de ferramenta devido a alta capacidade de lubrificação na zona de corte, além da redução do atrito, das temperaturas geradas na usinagem e do desgaste da ferramenta [Chetan et al., 2015; Deiab et al., 2014; Ezugwu et al., 2003; Liu et al., 2015; Park et al., 2014; Revuru et al., 2017]. Logo, a usinagem com RQL pode ser mais vantajosa nesse ponto. Entretanto, a comprovação objetiva desse aspecto também passa pela realização de estudos que comprovem a eficácia do emprego de RQL na combinação de vida de ferramenta aceitável com um bom acabamento da peça, como já mencionado.

Complementando a análise, as Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 ilustram os perfis de rugosidade dos testes de validação para a usinagem a seco, com MQL e com RQL, respectivamente.

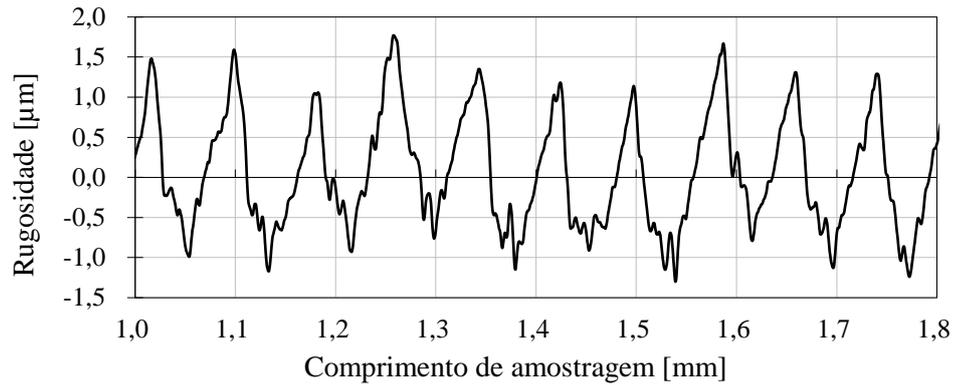


Figura 4.31 – Perfil de rugosidade do teste de validação para a usinagem a seco ( $v_c = 240$  m/min;  $f = 0,08$  mm/rev.;  $a_p = 0,36$  mm)

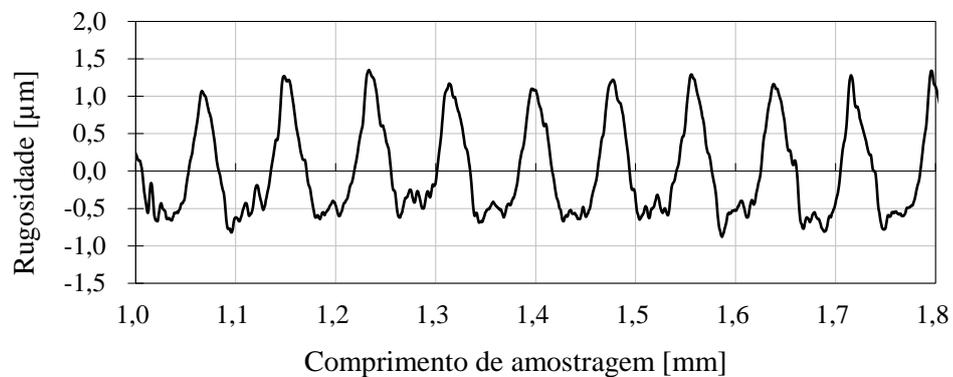


Figura 4.32 – Perfil de rugosidade do teste de validação para a usinagem com MQL ( $v_c = 240$  m/min;  $f = 0,08$  mm/rev.;  $a_p = 0,46$  mm)

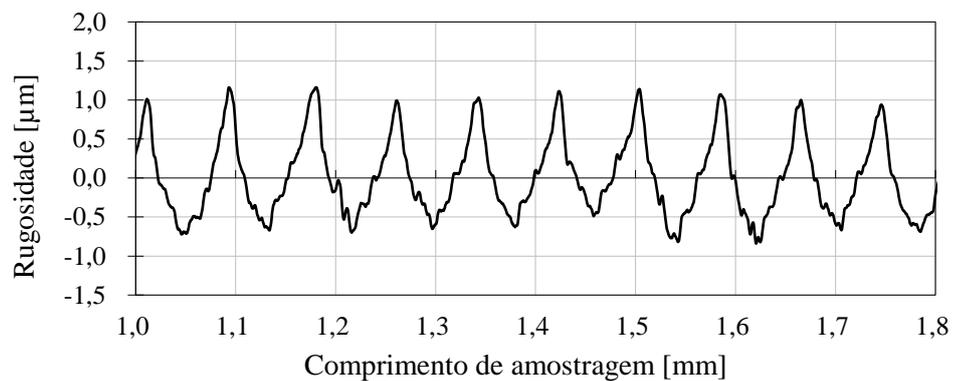


Figura 4.33 – Perfil de rugosidade do teste de validação para a usinagem com RQL ( $v_c = 80$  m/min;  $f = 0,08$  mm/rev.;  $a_p = 0,20$  mm)

A visualização das Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 sugere que o perfil de rugosidade para o torneamento com RQL é um pouco melhor definido em relação aos demais. Maiores irregularidades são notadas nos vales no torneamento com MQL e, sobretudo, na usinagem a seco, o que pode ser decorrente da variação da força de usinagem gerada em função da segmentação do cavaco durante o torneamento, embora esse fato não possa ser comprovado por

não ter sido investigado. Além disso, esse fato pode estar associado a alguma vibração gerada em virtude da maior  $a_p$  empregada na otimização experimental para essas condições em específico (seco e MQL), embora, como anteriormente mencionado, também haja possibilidade de que  $a_p$  maior que  $r_\epsilon$  possa diminuir a força passiva, tornando o corte mais estável. Também é possível que as saliências decorram da medição mecânica de contato, que pode apresentar alguma dificuldade em copiar o perfil real da rugosidade devido ao raio da ponta do apalpador do rugosímetro possuir tamanho relevante em relação ao perfil da superfície.

A usinagem de Ti sem fluido de corte mostrou maior instabilidade do perfil em comparação às demais condições, com maior diferença de altura entre picos e vales, o que certamente influenciou nos maiores valores de rugosidade obtidos na validação da otimização. Sob esse aspecto, pressupõe-se que a utilização de fluido de corte em quantidade mínima ou reduzida melhore as características tribológicas da interface cavaco-ferramenta, especialmente devido à lubrificação proporcionada, diminuindo o atrito, as forças de usinagem e facilitando o escoamento do cavaco, com benefício ao acabamento da superfície torneada de Ti-CP Gr. 4.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a rugosidade no torneamento de acabamento em titânio comercialmente puro grau 4 (Ti-CP Gr. 4) sob uma perspectiva de usinagem ambientalmente amigável. Dentro desse contexto e baseado nos resultados alcançados, observou-se que o avanço ( $f$ ) é o parâmetro com a maior influência sobre a rugosidade média ( $R_a$ ) e altura máxima média do perfil ( $R_z$ ), de forma que, quanto maior o seu valor, maior é a rugosidade. Logo,  $f$  deve ser mantido em nível baixo para proporcionar melhor qualidade da superfície usinada.

Também foi verificado que a velocidade de corte ( $v_c$ ) e a profundidade de corte ( $a_p$ ) necessárias para minimizar a rugosidade dependem da condição de lubrificação. A análise estatística mostrou influência significativa das interações  $v_c \times$  fluido de corte, para  $R_a$ , e  $v_c \times f$ , para  $R_z$ . Sob esse aspecto, os gráficos de superfície de resposta e de contorno atestaram que a usinagem com quantidade reduzida de lubrificante (RQL) requer baixa  $v_c$  para melhorar o acabamento, ao passo que  $v_c$  mais alta é necessária para uma melhor qualidade da superfície no torneamento a seco e com mínima quantidade de lubrificante (MQL), comprovando a interação envolvendo  $v_c$  e fluido.

A resposta da rugosidade em relação à profundidade de corte é similar ao comportamento percebido em relação à velocidade de corte para as diferentes condições de lubrificação testadas: baixo nível de  $a_p$  é necessário na usinagem com RQL, enquanto que nível mais alto desse parâmetro de corte é requerido no torneamento a seco e com MQL. Assim, a usinagem com RQL requer que todos os parâmetros de corte estejam em nível baixo para proporcionar os menores valores de rugosidade. Portanto, tendo em vista a combinação dos parâmetros de corte envolvidos na melhoria do acabamento, o torneamento com RQL é o que promove a menor taxa de remoção de material dentre as condições testadas.

A otimização do experimento através da função *desirability* estimou, a partir do modelo estatístico-matemático adotado, que a usinagem com RQL é a melhor escolha do ponto de vista da qualidade da superfície da peça torneada de Ti-CP Gr. 4 por proporcionar os menores valores de  $R_a$  e  $R_z$  dentre as condições lubrificantes testadas. A validação dos parâmetros de corte da otimização foi realizada experimentalmente e, na comparação com os resultados dos testes das outras condições de lubrificação, o torneamento com RQL proporcionou o menor valor de  $R_a$  e um dos menores de  $R_z$ , atestando sua eficácia na obtenção de bom acabamento. Embora os resultados da validação não tenham atingido os dados previstos para a condição de corte com quantidade reduzida de fluido, a diferença entre os valores não foi muito elevada.

Outrossim, para essa condição, os valores dos testes de validação foram iguais ou muito similares aos melhores resultados experimentais, mostrando boa previsibilidade do modelo na predição dos parâmetros de corte ótimos que proporcionam a melhor qualidade da superfície.

A usinagem a seco apresentou os resultados mais discrepantes em relação aos previstos pela equação de regressão, além dos maiores valores de rugosidade nos testes de validação, o que a torna a pior condição do ponto de vista do acabamento. Em contrapartida, o torneamento com MQL apresentou os valores experimentais mais próximos dos valores estimados na otimização, tendo, inclusive, resultado melhor que o previsto pelo modelo para  $R_z$ .

Por fim, dentro do escopo do trabalho, a usinagem com RQL mostrou bons resultados em termos de acabamento da superfície torneada de Ti-CP Gr. 4. Sob essa ótica, essa condição pode ser considerada a melhor escolha, conforme atestado pela otimização do experimento. Ainda que essa seja a condição de lubrificação que aplica maior quantidade de fluido dentre as testadas nesse estudo, o aspecto ambientalmente amigável não é totalmente negligenciado. Comparado ao sistema de refrigeração tradicional normalmente empregado na usinagem (fluido em abundância), o torneamento com RQL apresenta a vantagem de usar menor quantidade de fluido de corte no processo, sendo mais amigável do ponto de vista ambiental e uma alternativa viável no torneamento de acabamento de Ti-CP Gr. 4.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A partir do desenvolvimento do presente trabalho, identificaram-se oportunidades de estudo que visam complementar ou dar continuidade ao tema abordado na pesquisa, as quais são listadas abaixo:

- verificar o encruamento do material provocado pela usinagem através da medição da microdureza da superfície e da parte interna da peça, visando analisar sua influência sobre a rugosidade;
- analisar o desgaste da ferramenta concomitantemente à rugosidade tanto para averiguar sua influência sobre o acabamento, como também para verificar a adequação dos parâmetros de corte otimizados do ponto de vista da melhoria da qualidade da superfície com vida de ferramenta aceitável;
- examinar a superfície da peça através de microscópio eletrônico de varredura para verificar a presença de imperfeições ou defeitos decorrentes da usinagem nas diferentes condições de lubrificação e sua relação com os perfis de rugosidade;

- averiguar a morfologia do cavaco durante o processo de torneamento para atestar sua influência sobre a rugosidade;
- testar a adoção de nanopartículas ao fluido de corte em quantidade mínima e/ou reduzida com o objetivo de analisar sua influência sobre o acabamento da peça de titânio torneada;
- replicar o experimento adotando fluido em abundância, no intuito de comparar os resultados com as condições testadas nesse trabalho;
- replicar o experimento com ferramenta de metal-duro não revestida para comparar o desempenho dessa com a ferramenta de metal-duro revestida utilizada nesse estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ali, M. A. M., Azmi, A. I., Khalil, A. N. M. e Leong, K. W. Experimental study on minimal nanolubrication with surfactant in the turning of titanium alloys, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 92, p. 117-127, 2017.

Astakhov, V. P. Ecological Machining: Near-dry Machining, **Machining – Fundamentals and Recent Advances**. Springer, London, p. 195-223, 2008.

Astakhov, V. P. Screening (Sieve) Design of Experiments in Metal Cutting, **Design of Experiments in Production Engineering**. Springer, Cham, Switzerland, p. 1-37, 2016.

Astakhov, V. P. e Davim, J. P. Tools (Geometry and Material) and Tool Wear, **Machining – Fundamentals and Recent Advances**. Springer, London, p. 29-57, 2008.

Balazic, M., Kopac, J., Jackson, M. J. e Ahmed, W. Review: titanium and titanium alloy applications in medicine, **International Journal of Nano and Biomaterials**, vol. 1(1), p. 3-34, 2007.

Baumgaertner Filho, A. J. **Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem por revestimento**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

Boswell, B., Islam, M. N., Davies, I. J., Ginting, Y. R. e Ong, A. K. A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 92, p. 321-340, 2017.

Box, G. E. P., Hunter, J. S. e Hunter, W. G. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery**. John Wiley & Sons, Hoboken, 2nd edition, 2005.

Boyer, R., Welsch, G. e Collings, E. W. **Materials Properties Handbook: Titanium Alloys**. ASM International, Materials Park, 4th printing, 2007.

Çelik, Y. H., Kilickap, E. e Güney, M. Investigation of cutting parameters on tool wear and surface roughness in dry turning of Ti-6Al-4V using CVD and PVD coated tools, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, vol. 39, p. 2085-2093, 2017.

Chauhan, S. R. e Dass, K. Optimization of Machining Parameters in Turning of Titanium (Grade-5) Alloy Using Response Surface Methodology, **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 27, p. 531-537, 2012.

Chetan, Ghosh, S. e Rao, P. V. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review, **Journal of Cleaner Production**, vol. 100, p. 17-34, 2015.

Costa, N. R., Lourenço, J. e Pereira, Z. L. Desirability function approach: A review and performance evaluation in adverse conditions, **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, vol. 107, p. 234-244, 2011.

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

Deiab, I., Raza, S. W. e Pervaiz, S. Analysis of Lubrication Strategies for Sustainable Machining during Turning of Titanium Ti-6Al-4V alloy, **Procedia CIRP**, vol. 17, p. 766-771, 2014.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV). **BGI/GUV-I 718 E**, Minimum quantity lubrication for machining operations. <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/i-718e.pdf>, 2010, Acesso em: 03-08-2018.

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

Deutsches Institut für Normung. **DIN EN ISO 4288**: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture, Berlin, 1998.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artliber, São Paulo, 9 edição, 2014.

Dixit, U. S., Sarma, D. K. e Davim, J. P. **Environmentally Friendly Machining**. Springer, New York, 2012.

Donachie Jr., M. J. **Titanium: A Technical Guide**. ASM International, Materials Park, 2nd edition, 2000.

Dornfeld, D., Yuan, C., Diaz, N., Zhang, T. e Vijayaraghavan, A. Introduction to Green Manufacturing, **Green Manufacturing – Fundamentals and Applications**. Springer, New York, p. 1-23, 2013.

Ezugwu, E. O., Bonney, J. e Yamane, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 134, p. 233-253, 2003.

Ezugwu, E. O. e Wang, Z. M. Titanium alloys and their machinability – a review, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 68, p. 262-274, 1997.

Fatichi, A. Z. **Caracterização de ligas Ti-35Nb-xZr com superfícies nanotubulares para aplicações biomédicas**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2017.

Ferraresi, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo, Blücher, 1970.

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

Fratila, D. Sustainable Manufacturing Through Environmentally-Friendly Machining, **Green Manufacturing Processes and Systems**. Springer, Berlin, p. 1-21, 2013.

Freitas, M. A., Faleiro, R. M. R. e Borges, M. F. Projeto robusto de parâmetros em sistemas sinal-resposta: comparação de métodos de modelagem e análise, **Production**, vol. 17(3), p. 547-565, 2007.

Gu, L. Critical condition prediction of adiabatic shear fracture in high-speed cutting TA2 alloy, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technologies**, vol. 94, p. 2981-2991, 2018.

Gupta, K. e Laubscher, R. F. Sustainable machining of titanium alloys: A critical review, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, vol. 231, p. 2543-2560, 2016.

Gupta, M. K. e Sood, P. K. Surface roughness measurements in NFMQL assisted turning of titanium alloys: An optimization approach, **Friction**, vol. 5, p. 155-170, 2017.

Gupta, M. K., Sood, P. K. e Sharma, V. S. Investigations on Surface Roughness Measurement in Minimum Quantity Lubrication Turning of Titanium Alloys Using Response Surface Methodology and Box-Cox Transformation, **Journal for Manufacturing Science and Production**, vol. 16, p. 75-88, 2016a.

Gupta, M. K., Sood, P. K. e Sharma, V. S. Optimization of machining parameters and cutting fluids during nano-fluid based minimum quantity lubrication turning of titanium alloy by using evolutionary techniques, **Journal of Cleaner Production**, vol. 135, p. 1276-1288, 2016b.

Hosseini, A. e Kishawy, H. A. Cutting Tool Materials and Tool Wear, **Machining of Titanium Alloys**. Springer, Berlin, p. 31-56, 2014.

International Organization for Standardization. **ISO 6892-1**: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature, Switzerland, 2016.

Islam, M. N., Anggono, J. M., Pramanik, A. e Boswell, B. Effect of cooling methods on dimensional accuracy and surface finish of a turned titanium part, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technologies**, vol. 69, p. 2711-2722, 2013.

Jackson, M. J. e Ahmed, W. (Ed.). Surface Engineering Artificial Heart Valves to Improve Quality of Life and Lifetime using Modified Diamond-like Coatings, **Surface Engineered Surgical Tools and Medical Devices**. Springer, New York, p. 99-139, 2007.

Khan, A. e Maity, K. Influence of cutting speed and cooling method on the machinability of commercially pure titanium (CP-Ti) grade II, **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 31, p. 650-661, 2018.

Kosaraju, S. e Anne, V. G. Optimal machining conditions for turning Ti-6Al-4V using response surface methodology, **Advances in Manufacturing**, vol. 1, p. 329-339, 2013.

Kumar, V. S. S., Ezilarasan, C. e Kumaran, S. S. Experimental Investigation and Optimization of Cutting Parameters in Machining of Ti6Al4V Alloy by an MT-CVD Insert, **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, vol. 94, p. 155-163, 2013.

Kuram, E., Ozcelik, B. e Demirbas, E. Environmentally Friendly Machining: Vegetable Based Cutting Fluids, **Green Manufacturing Processes and Systems**. Springer, Berlin, p. 23-48, 2013.

Lauro, C. H., Brandão, L. C., Ribeiro Filho, S. L. M. e Davim, J. P. Behaviour of a biocompatible titanium alloy during orthogonal micro-cutting employing green machining techniques, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technologies**, vol. 98, p. 1-17, 2018.

Lawal, S. A., Choudhury, I. A. e Nukman, Y. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant, **Journal of Cleaner Production**, vol. 41, p. 210-221, 2013.

Li, J. e Xu, B. Study on adiabatic shearing sensitivity of titanium alloy in the process of different cutting speeds, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 93, p. 1859-1865, 2017.

Liu, Z., Xu, J., Han, S. e Chen, M. A Coupling Method of Response Surfaces (CRSM) for Cutting Parameters Optimization in Machining Titanium Alloy under Minimum Quantity Lubrication (MQL) Condition, **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, vol. 14(5), p. 693-702, 2013.

Liu, Z., Chen, M. e An, Q. Investigation of friction in end-milling of Ti-6Al-4V under different green cutting conditions, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 78, p. 1181-1192, 2015.

Lütjering, G. e Williams, J. C. **Titanium**. Springer, Berlin, 2nd edition, 2007.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. e da Silva, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Blücher, São Paulo, 3 edição, 2015.

Markopoulos, A. P., Habrat, W., Galanis, N. I. e Karkalos, N. E. Modelling and Optimization of Machining with the Use of Statistical Methods and Soft Computing, **Design of Experiments in Production Engineering**. Springer, Cham, Switzerland, p. 39-88, 2016.

Melo, C. C. S. B., Santana, A. C. P. e Magalhães, N. T. **Adesão e proliferação de células osteoblásticas e fibroblásticas sobre diferentes superfícies de implantes: análise em MEV**. <http://www.sbpnet.org.br/livro/68ra/resumos/areas/lista4.02.05.htm>, 2016, Acesso em: 06-08-2018.

Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, Hoboken, 8th edition, 2013.

Muthukrishnan, N. e Davim, P. Influence of Coolant in Machinability of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V), **Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology**, vol. 1(1), p. 9-14, 2011.

Myers, R. H., Montgomery, D. C. e Anderson-Cook, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. John Wiley & Sons, Hoboken, 3rd edition, 2009.

Neto, B. B., Scarminio, I. S. e Bruns, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Editora da UNICAMP, Campinas, 2 edição, 2003.

Niharika, Agrawal, B. P., Khan, I. A. e Khan, Z. A. Effects of Cutting Parameters on Quality of Surface Produced by Machining of Titanium Alloy and their Optimization, **The Journal of Committee on Machining Building of Polish Academy of Sciences, Archive of Mechanical Engineering**, vol. 63(4), p. 531-548, 2016.

Niknam, S. A., Khettabi, R. e Songmene, V. Machinability and Machining of Titanium Alloys: A Review, **Machining of Titanium Alloys**. Springer, Berlin, p. 1-30, 2014.

Nouari, M. e Makich, H. Analysis of Physical Cutting Mechanisms and Their Effects on the Tool Wear and Chip Formation Process When Machining Aeronautical Titanium Alloys: Ti-6Al-4V and Ti-55531, **Machining of Titanium Alloys**. Springer, Berlin, p. 79-111, 2014.

Park, K., Yang, G., Lee, M., Jeong, H., Lee, S. e Lee, D. Y. Eco-Friendly Face Milling of Titanium Alloy, **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, vol. 15(6), p. 1159-1164, 2014.

Patil, S., Jadhav, S., Kekade, S., Supare, A., Powar, A. e Singh, RKP. The Influence of Cutting Heat on the Surface Integrity during Machining of Titanium Alloy Ti6Al4V, **Procedia Manufacturing**, vol. 5, p. 859-869, 2016.

Pervaiz, S., Rashid, A., Deiab, I. e Nicolescu, C. M. An experimental investigation on effect of minimum quantity cooling lubrication (MQCL) in machining titanium alloy (Ti6Al4V), **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 87, p. 1371-1386, 2016.

Pervaiz, S., Rashid, A., Deiab, I. e Nicolescu, C. M. Influence of Tool Materials on Machinability of Titanium- and Nickel-Based Alloys: A Review, **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 29, p. 219-252, 2014.

Peters, M., Hemptenmacher, J., Kumpfert, J. e Leyens, C. Structure and Properties of Titanium and Titanium Alloys, **Titanium and Titanium Alloys – Fundamentals and Applications**. Wiley-VCH, Weinheim, p. 1-36, 2003a.

Peters, M., Kumpfert, J., Ward, C. H. e Leyens, C. Titanium Alloys for Aerospace Applications, **Titanium and Titanium Alloys – Fundamentals and Applications**. Wiley-VCH, Weinheim, p. 333-350, 2003b.

Peters, M. e Leyens, C. Fabrication of Titanium Alloys, **Titanium and Titanium Alloys – Fundamentals and Applications**. Wiley-VCH, Weinheim, p. 245-261, 2003a.

Peters, M. e Leyens, C. Non-Aerospace Applications of Titanium and Titanium Alloys, **Titanium and Titanium Alloys – Fundamentals and Applications**. Wiley-VCH, Weinheim, p. 393-422, 2003b.

Petropoulos, G. P., Pandazaras, C. N. e Davim, J. P. Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining, **Surface Integrity in Machining**. Springer, London, p. 37-66, 2010.

Pramanik, A. Problems and solutions in machining of titanium alloys, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 70, p. 919-928, 2013.

Pramanik, A. e Littlefair, G. Machining of Titanium Alloy (*Ti-6Al-4V*) – Theory to Application, **Machining Science and Technology**, vol. 19, p. 1-49, 2015.

Ramana, M. V. e Aditya, Y. S. Optimization and influence of process parameters on surface roughness in turning of titanium alloy, **Materials Today: Proceedings**, vol. 4, p. 1843-1851, 2017.

Ramesh, S., Karunamoorthy, L., Senthilkumar, V. S. e Palanikumar, K. Experimental study on machining of titanium alloy (Ti64) by CVD and PVD coated carbide inserts, **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, vol. 17(4), p. 373-385, 2009.

Ramesh, S., Karunamoorthy, L. e Palanikumar, K. Measurement and analysis of surface roughness in turning of aerospace titanium alloy (gr5), **Measurement**, vol. 45, p. 1266-1276, 2012.

Ramesh, S., Karunamoorthy, L. e Palanikumar, K. Surface Roughness Analysis in Machining of Titanium Alloy, **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 23, p. 174-181, 2008.

Revankar, G. D., Shetty, R., Rao, S. S. e Gaitonde, V. N. Analysis of Surface Roughness and Hardness in Titanium Alloy Machining with Polycrystalline Diamond Tool under Different Lubricating Modes, **Materials Research**, vol. 17(4), p. 1010-1022, 2014.

Revuru, R. S., Posinasetti, N. R., Ramana, V. e Amrita, M. Application of cutting fluids in machining of titanium alloys – a review, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 91, p. 2477-2498, 2017.

Revuru, R. S., Zhang, J. Z., Posinasetti, N. R. e Kidd, T. Optimization of titanium alloys turning operation in varied cutting fluid conditions with multiple machining performance characteristics, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 95, p. 1451-1463, 2018.

Rosa, G. C. **Estudo da usinabilidade no torneamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 420 C endurecido com ferramenta de metal-duro**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

Sahoo, P. e Barman, T. Kr. Response Surface Modelling of Fractal Dimension in WEDM, **Design of Experiments in Production Engineering**. Springer, Cham, Switzerland, p. 135-149, 2016.

Sahu, N. K. e Andhare, A. B. Optimization of surface roughness in turning of Ti-6Al-4V using Response Surface Methodology and TLBO, **Proceedings of the ASME**

**International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Volume 4: 20th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 9th International Conference on Micro- and Nanosystems.** <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2483498>, 2015, Acesso em: 03-07-2018.

Sandvik Coromant AB. **Manual de Treinamento – Tecnologia em Usinagem.** <https://bit.ly/2AFFtMP>, 2017, Acesso em: 03-08-2018.

Sandvik Coromant AB. **TNMG 160404-SF 1105.** <https://bit.ly/2xIypKw>, 2018, Acesso em: 21-09-2018.

Sangwan, K. S., Saxena, S. e Kant, G. Optimization of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness using Integrated ANN-GA Approach, **Procedia CIRP**, vol. 29, p. 305-310, 2015.

Sartori, S., Ghiotti, A. e Bruschi, S. Solid Lubricant-assisted Minimum Quantity Lubrication and Cooling strategies to improve Ti6Al4V machinability in finishing turning, **Tribology International**, vol. 118, p. 287-294, 2018.

Sharif, M. N., Pervaiz, S. e Deiab, I. Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 89, p. 2447-2479, 2017.

Sharma, A. K., Tiwari, A. K. e Dixit, A. R. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review, **Journal of Cleaner Production**, vol. 127, p. 1-18, 2016.

Shokrani, A., Dhokia, V. e Newman, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 57, p. 83-101, 2012.

Singh, G. R. e Sharma, V. S. Analyzing machining parameters for commercially pure titanium (Grade 2), cooled using minimum quantity lubrication assisted by a Ranque-Hilsch vortex tube, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 88, p. 2921-2928, 2017.

Souza, A. J., Rodrigues, R. I. e Rosa, G. C. Verificação das forças geradas no torneamento a seco, com fluido em abundância e em quantidade reduzida do aço AISI 420C utilizando ferramenta wiper, **Anais... IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Fortaleza, 2016.

Stephenson, D. A. e Agapiou, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice.** CRC Press, Boca Raton, 3rd edition, 2016.

Trent, E. M. Metal cutting and the tribology of seizure: II movement of work material over the tool in metal cutting, **Wear**, vol. 128, p. 47-64, 1988.

Tschätsch, H. e Reichelt, A. Cutting fluids (coolants and lubricants), **Applied Machining Technology.** Springer, Berlin, p. 349-352, 2009.

Ulutan, D. e Ozel, T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 51, p. 250-280, 2011.

Veiga, C., Davim, J. P. e Loureiro, A. J. R. Review on Machinability of Titanium Alloys: The Process Perspective, **Reviews on Advanced Materials Science**, vol. 34, p. 148-164, 2013.

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. e Ye, K. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 8 edição, 2009.

Wang, Z. G., Rahman, M., Wong, Y. S., Neo, K. S., Sun, J., Tan, C. H. e Onozuka, H. Study on orthogonal turning of titanium alloys with different coolant supply strategies, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 42, p. 621-632, 2009.

Zhiqiang, L. Green Machining of Ti-6Al-4V Under Minimum Quantity Lubrication (MQL) Condition, **Machining of Titanium Alloys**. Springer, Berlin, p. 113-129, 2014.