

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

AVALIAÇÃO DA FORÇA DE USINAGEM E DO ACABAMENTO SUPERFICIAL
GERADOS NO TORNEAMENTO DE TI-6AL-4V SOB CONDIÇÕES DE
LUBRIRREFRIGERAÇÃO AMBIENTALMENTE AMIGÁVEIS

por

Luana Zanin

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

Porto Alegre, novembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Zanin, Luana

AVALIAÇÃO DA FORÇA DE USINAGEM E DO ACABAMENTO
SUPERFICIAL GERADOS NO TORNEAMENTO DE TI-6AL-4V SOB
CONDIÇÕES DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO AMBIENTALMENTE
AMIGÁVEIS / Luana Zanin. -- 2021.

25 f.

Orientador: André João de Souza.

Coorientador: Émerson dos Santos Passari.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Torneamento . 2. Ti-6Al-4V. 3. Acabamento
Superficial . 4. Força de Usinagem . I. Souza, André
João de, orient. II. Passari, Émerson dos Santos,
coorient. III. Título.

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

Luana Zanin

AVALIAÇÃO DA FORÇA DE USINAGEM E DO ACABAMENTO SUPERFICIAL
GERADOS NO TORNEAMENTO DE TI-6AL-4V SOB CONDIÇÕES DE
LUBRIRREFRIGERAÇÃO AMBIENTALMENTE AMIGÁVEIS

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

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: Eng. Émerson dos Santos Passari

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzales

Porto Alegre, 16 de novembro de 2021

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Osmar e Beatriz, suas grandes forças foram a mola propulsora que permitiram o meu avanço, mesmo durante os momentos mais difíceis. Agradeço do fundo do meu coração. Agradeço por confiarem e acreditarem em mim desde sempre e me incentivaram a acreditar que tudo é possível.

À minha família, em especial, Elida, Paulo e Marcelo, que me acolherem e me deram todo o carinho e suporte necessário para que eu pudesse me adaptar à cidade e às necessidades exigidas durante toda a graduação.

Aos meus colegas e amigos, em especial, à Alana, que sempre foi uma inspiração para mim, mostrando que podemos alcançar todos os nossos sonhos, ao Maurício, que me ajudou a superar as situações enfrentadas na casa do estudante, e ao Erick, que esteve presente em praticamente todos os momentos difíceis da graduação, me lembrando que sou capaz, e de que tenho um potencial muito maior do que imagino.

A todos que, de que alguma forma, estiveram envolvidos na minha vida.

A Deus; meus pais: Osmar e Beatriz; minhas irmãs: Tainara e Tatiana; minha família em especial: Elida, Paulo, Marcelo, Maria e Carlos Eduardo; à Alana e Erick; e a todos que de alguma forma estiveram envolvidos na minha vida. Agradeço-os mais uma vez e dedico esta conquista, por me ajudarem a superar a fase mais difícil da minha vida, quando enfrentei problemas sérios de saúde, e com a ajuda de vocês recuperei a esperança em dias melhores. Sou eternamente grata.

AGRADECIMENTOS

À UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), e a todos os professores, em especial ao Prof. André João de Souza, pelo ensino de qualidade.

Aos colegas que sempre estiveram comigo pelo companheirismo, amizade, troca de conhecimentos, conversas e momentos de descontração. Em especial, ao meu coorientador Émerson dos Santos Passari, que foi fundamental na troca de conhecimentos necessária para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Osmar e Beatriz, pelo amor incondicional, pela vida, ensinamentos, oportunidades e por mostrar o valor do trabalho e da honestidade.

À, Tainara, Tatiana, Elida, Paulo, Marcelo, Maria, Carlos, Alana e Erick pela ajuda e torcida.

Ao Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), que possibilitou a realização dos experimentos, em especial ao técnico Guilherme Vagas Schirmer pelo auxílio técnico, dicas valiosas para a experimentação, solicitude e amizade.

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

*“Somos feitos de carne,
mas temos de viver como se fossemos de ferro.”*

(Sigmund Freud)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA -CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

AVALIAÇÃO DA FORÇA DE USINAGEM E DO ACABAMENTO
SUPERFICIAL GERADOS NO TORNEAMENTO DE TI-6AL-4V SOB
CONDIÇÕES DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO AMBIENTALMENTE AMIGÁVEIS

ZANIN, Luana

luanazannin@gmail.com

Resumo. *Ti-6Al-4V é uma liga de titânio alfa-beta contendo alumínio e vanádio em sua composição, que possui uma excelente combinação de resistência e tenacidade combinada com excelente resistência à corrosão. Porém, apresenta baixa usinabilidade, principalmente devido à baixa condutividade térmica e alta afinidade química com a ferramenta de corte. Assim, o objetivo deste trabalho é investigar a força de usinagem e a rugosidade da superfície usinada e encontrar os melhores parâmetros de corte para o torneamento do Ti-6Al-4V ao utilizar técnicas de lubrirrefrigeração ambientalmente amigáveis: ar comprimido resfriado e mínima quantidade de lubrificação. Os parâmetros de corte foram combinados para cada condição lubrificador usando o projeto de experimentos Box-Behnken de três fatores em três níveis. A análise de variância apontou que a profundidade de corte é o parâmetro que mais influencia a força de usinagem e que o avanço é o parâmetro mais significativo sobre a rugosidade. As otimizações multivariadas resultaram em níveis de velocidade de corte médios combinados com baixos níveis de avanço e profundidade de corte para ambas as condições lubrificadoras.*

Palavras-chave: *Torneamento de Ti-6Al-4V, Técnicas de lubrirrefrigeração ambientalmente amigável, Otimização multivariada.*

Assessment of the machining force and surface finish generated on turning Ti-6Al-4V under environmentally-friendly lubricooling conditions

Abstract. *Ti-6Al-4V is an alpha-beta titanium alloy containing aluminum and vanadium in its composition, which has an excellent combination of strength and toughness combined with excellent corrosion resistance. However, it has low machinability mainly due to the low thermal conductivity and high chemical affinity with the cutting tool. Thus, this work aims to investigate the machining force and surface roughness and find the best cutting parameters for turning Ti-6Al-4V using environmentally friendly lubricooling techniques: cooled-compressed air and minimum quantity lubrication. The cutting parameters were combined for each lubricooling condition using the 3-factor 3-level Box-Behnken design of experiments. The variance analysis pointed that the depth of cut is the parameter that most influences the machining force and that the feed rate is the most significant parameter on the surface roughness. Multivariate optimizations resulted in a medium cutting speed level combined with low feed rate and depth-of-cut levels for both lubricooling conditions.*

Keywords: *Turning Ti-6Al-4V, Environmentally-friendly lubricooling techniques, Multivariate optimization.*

NOMENCLATURA

Símbolos

v_c	Velocidade de Corte	[m/min]
a_p	Profundidade de Corte	[mm]
f	Avanço	[mm/volta]
F_u	Força de Usinagem	[N]
R_a	Rugosidade Média	[μm]
R_z	Rugosidade Máxima Média	[μm]

Abreviaturas e Acrônimos

VCCA	Ar comprimido refrigerado por tubo de vórtice (<i>vortex cooled compressed air</i>)
MQL	Mínima quantidade de lubrificante
BBD	Box-Behnken Design

1 INTRODUÇÃO

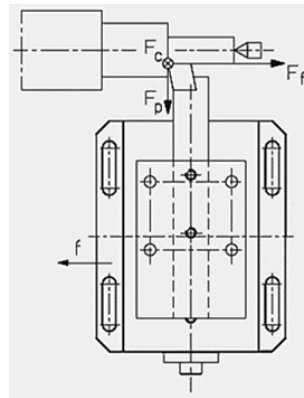
Titânio e suas ligas são materiais que possuem alta resistência mecânica, baixa densidade, alta resistência à corrosão e biocompatibilidade. A principal consumidora deste material são as indústrias aeronáutica e aeroespacial; no entanto, outros segmentos como indústria naval, de esportes, de geração de energia, biomedicina, de processamento químico e arquitetura têm passado a utilizar cada vez mais este metal (PETERS *et al.*, 2003). Contudo, características como baixa condutividade térmica e alta afinidade química são alguns fatores responsáveis por sua baixa usinabilidade (PRAMANIK, 2014).

Tendo em vista que a usinagem do titânio necessita de material e geometria da ferramenta específicos, bem como de uma máquina-ferramenta com características diferenciadas, isso exige parâmetros de corte particulares para a execução do processo. Devido ao fato de o material possuir um custo elevado provocado pelas dificuldades em sua extração, beneficiamento e usinagem (ZLATIN e FIELD, 1973), a otimização de processos de usinagem destas ligas é desenvolvida para reduzir perdas e erros durante o processo. No caso, os parâmetros de corte tornam-se as variáveis independentes de entrada de maior flexibilidade e adaptação, pois controlam diretamente as variáveis dependentes de saída (variáveis de resposta) do processo tais como força de usinagem e rugosidade da superfície usinada (SOUZA, 2004).

A determinação da força de usinagem e das suas componentes sempre foi uma área muito importante, tanto na prática quanto na pesquisa, relativa às operações de torneamento. A usinagem de um material, gera força, energia e potência de usinagem. Além das condições de corte, da geometria e do material da ferramenta, o material da peça também influencia a grandeza da força de usinagem – geralmente materiais de baixa usinabilidade apresentam pressões específicas de corte maiores. A força de usinagem é a força atuante sobre a aresta da ferramenta durante a operação de corte. Ela pode ser decomposta nas suas componentes ortogonais, de acordo com as considerações tecnológicas e físicas do cavaco. Em torneamento (Fig. 1), a componente “ F_z ”, projetada sobre a direção de corte, é a Força de Corte (F_c); a componente “ F_x ”, normal à direção de corte, projetada sobre a direção de avanço, é a Força de Avanço (F_f); a componente radial (F_y), projetada perpendicularmente ao plano de trabalho, é a força passiva ou de profundidade (F_p) (KLOCKE, 2011; MACHADO *et al.*, 2009). Consequentemente, a força resultante é representada pela Eq. (1).

$$F_u = \sqrt{F_f^2 + F_c^2 + F_p^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

Figura 1 – Componentes da força de usinagem no processo de torneamento.



Fonte: Kistler (2009)

O acabamento da superfície usinada, resultante do torneamento, é uma variável de saída que fornece dados significativos para a análise da usinabilidade do material. Uma forma de medir essa qualidade é utilizando o parâmetro da rugosidade média (R_a). R_a é definida como a média aritmética dos valores absolutos de afastamento em relação à linha média, avaliados em um determinado percurso de medição. É o parâmetro mais comumente utilizado presente na maioria dos instrumentos de medição (TAVARES, 2012). Apesar de R_a ser 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), este parâmetro representa um valor médio que não recebe a influência de efeitos ocasionais; portanto, R_a não é suficiente para identificar certas 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 caracterizar uma superfície com picos elevados e/ou vales profundos, a rugosidade média parcial (R_z) passa a ser empregada, já que é um parâmetro mais sensível à presença de defeitos ou irregularidades na superfície, sendo possível obter uma melhor noção dos desvios da média (MACHADO *et al.*, 2009). Para o torneamento, estudos preliminares mostram que o parâmetro mais influente sobre a rugosidade da superfície usinada é o avanço (f) seguido pela velocidade de corte (v_c) e pela profundidade de corte (a_p). Sendo assim, diferentes combinações destes parâmetros também podem apresentar mudanças significativas no processo (KLOCKE, 2011). O parâmetro R_a [μm] pode ser calculado a partir da Eq. (2) nos casos em que f [mm/volta] é menor que o raio de ponta da ferramenta r_ϵ [mm]. Esse é apenas um indicativo teórico, visto que os valores reais estarão acrescidos de diversos outros fatores como por exemplo vibrações, cavaco enrolando da peça, desgaste da aresta de corte etc. (MACHADO *et al.*, 2009). Analogamente, o parâmetro R_z [μm] pode ser estimado pela Eq. (3) (ISO 4288, 1996).

$$R_a = \frac{1000 \cdot f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_\epsilon} = 32,08 \left(\frac{f^2}{r_\epsilon} \right) \quad (2)$$

$$R_z = 5 \cdot R_a = 160,4 \left(\frac{f^2}{r_\epsilon} \right) \quad (3)$$

O uso de fluidos de corte em usinagem, quando escolhidos e aplicados de maneira apropriada, traz benefícios ao processo. A seleção correta deve levar em conta a sua composição química e propriedades corretas para lidar com as adversidades da operação de corte. O fluido deve ser aplicado usando um método que permita a sua chegada o mais próximo possível da aresta de corte

dentro da interface cavaco/ferramenta, a fim de assegurar que suas funções de lubrificação e refrigeração sejam exercidas adequadamente (MACHADO *et al.*, 2009). Porém, a utilização de fluidos de corte aumenta os custos operacionais, exige o cumprimento de legislação ambiental, e, por muitas vezes, é prejudicial à saúde dos operadores e ao meio ambiente (ASTAKHOV, 2008). Essa questão justifica o estudo dos métodos alternativos de lubrificação-refrigeração como a utilização do ar comprimido refrigerado (VCCA – *Vortex Cooling Compressed Air*) e da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL).

Os tubos de vórtice foram descobertos pelo metalúrgico e físico George Joseph Ranque em 1931 e desenvolvidos por Rudolph Hilsch. A geometria pequena, leve e simples dos tubos de vórtice facilitou sua fabricação, manutenção, instalação e utilização em comparação a outros métodos de resfriamento. Como os tubos de vórtice não têm elementos móveis, o desgaste e a erosão são mínimos, possibilitando trabalhar por muito tempo sem problemas. Outras vantagens são: não requer energia elétrica ou química extra, os custos de investimento inicial são baixos e são ecologicamente inofensivos (GÜRKAN *et al.*, 2020). A aplicação da técnica VCCA é comumente comparada ao torneamento a seco, visto que os dois métodos não utilizam lubrificantes; entretanto, a não utilização de lubrificante acaba mantendo os níveis de atrito entre a peça e a ferramenta de corte elevados, de tal forma que se faz necessário o uso de ferramentas de corte com revestimentos com baixos coeficientes de atrito proporcionando, além de melhores acabamentos, uma maior vida da ferramenta (GINTING *et al.*, 2016; LEMES e DINIZ, 2021).

A técnica MQL consiste em direcionar pequenas quantidades de lubrificante atomizado à zona de corte através de uma mistura de ar e óleo na forma de aerossol (ASTAKHOV, 2008). Por ter capacidade de refrigeração muito baixa, esta técnica pode ser considerada somente um método lubrificante (SARTORI *et al.*, 2018). Os principais benefícios do MQL são: redução do consumo de fluido de corte, redução dos custos, minimização do impacto ambiental e melhoria do desempenho geral das operações de usinagem e da qualidade da superfície usinada (DEBNATH *et al.*, 2014). Assim, o MQL melhora aspectos relativos a desgastes de ferramenta, rugosidades, temperaturas e forças de corte (BOSWELL *et al.*, 2017). Tais melhorias também foram verificadas na usinagem de ligas de titânio (GUPTA e LAUBSCHER, 2016; REVURU *et al.*, 2017). Entretanto, a geração de névoa pela aplicação de MQL pode ser perigosa à saúde do operador. Assim, a aplicação de óleos vegetais é melhor que a de óleos minerais em termos de custo, saúde, segurança e meio ambiente (ASTAKHOV, 2008).

Para realizar a avaliação da influência das variáveis de controle sobre as variáveis de resposta, pode-se fazer uso de análise estatística. O projeto de experimentos de Box-Behnken baseia-se na Metodologia de Superfície de Resposta. O BBD busca determinar os parâmetros de entrada que permitam a otimização das variáveis de saída a partir de um modelo de estimação de segunda ordem (MINITAB, 2019). Este método realiza o planejamento e a análise de três fatores controláveis em três níveis cada (inferior, central e superior). Assim, o BBD possui vantagens, visto que necessita de um número pequeno de execuções, justamente porque a atribuição dos níveis permite um cruzamento de dados a serem avaliados em cada ensaio (FERREIRA *et al.*, 2007).

Com base no que foi introduzido, o objetivo deste trabalho é investigar experimentalmente e analisar estatisticamente através do BBD a influência do VCCA e do MQL na força de usinagem (F_u) e nas rugosidades R_a e R_z geradas durante o processo de torneamento da liga Ti-6Al-4V.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no torno CNC a partir do torneamento longitudinal externo em um corpo de prova cilíndrico com 22 mm de diâmetro e 155 mm de comprimento. Um comprimento superior a 60 mm foi reservado em uma das extremidades do corpo de prova a fim de garantir espaço suficiente para a fixação rígida nas castanhas do torno. Na outra extremidade foram realizados os passes do experimento com 15 mm de comprimento para que a medição da rugosidade fosse registrada.

Visando contemplar os objetivos do trabalho, duas diferentes condições lubrificantes (VCCA e MQL) foram aplicadas de modo que os seus efeitos pudessem ser comparados entre si. Em ambos os experimentos (com VCCA e com MQL) foram realizados 15 passes com as combinações aleatorizadas dos parâmetros de corte, medindo as componentes ortogonais da força de usinagem e a rugosidade da superfície usinada, monitorando periodicamente a temperatura na saída do bico injetor e acompanhando o desgaste da ferramenta de corte.

2.1 Materiais e Equipamentos

Ti-6Al-4V é uma liga $\alpha+\beta$ que contém alumínio e vanádio em sua composição (Tab. 1). A Ti-6Al-4V possui excelente combinação de resistência e tenacidade aliada a excelente resistência à corrosão (ASM HANDBOOK, 1996). A Tabela 2 apresenta as propriedades dessa liga.

Tabela 1 – Composição química do Ti-6Al-4V (% massa em valores máximos).

N	H	O	C	Fe	Al	V	Ti
0,015	0,006	0,180	0,040	0,130	6,000	4,000	Bal.

Fonte: Donachie Jr. (2000).

Tabela 2 – Propriedades da liga Ti-6Al-4V.

Limite elástico [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Dureza [HV]	Densidade [g/cm ³]	Condutividade Térmica [W/m·K]	Calor Específico [J/kg·K]
970	900	110	340	4,43	7,3	580

Fonte: Machado e Wallbank (1990); Donachie (2000).

O Ti-6Al-4V é uma liga com baixa condutividade térmica que, quando submetida a uma operação de usinagem, concentra boa parte do calor na zona de corte, aumentando a temperatura e provocando maiores taxas de desgastes na ferramenta (LEYENS e PETERS, 2003). A alta resistência ao cisalhamento durante o corte resulta em tensões de cisalhamento localizadas e cavacos segmentados, gerando forças cíclicas devido à variação do cavaco, o que provoca baixa qualidade da superfície usinada e avarias na ponta da ferramenta. O baixo módulo de elasticidade implica em deformações importantes na peça durante a usinagem, aumentando as vibrações. Altas tensões na ponta da ferramenta podem surgir devido ao encruamento, que produz cavacos mais finos, e por consequência menor área de contato com o inserto. Além disso, o titânio e suas ligas apresentam afinidade química com a maioria das ferramentas de corte (PRAMANIK, 2014).

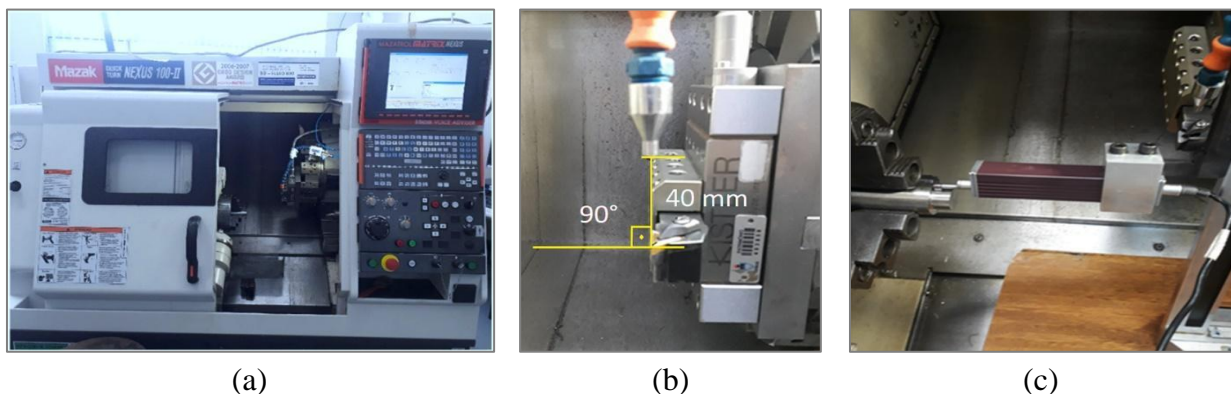
O torno CNC Mazak Quick Turn Nexus 100-II (Fig. 2a), com potência máxima de 23,5 kVA e rotação máxima de 6000 rpm, foi utilizado na experimentação. A ferramenta utilizada foi um inserto de metal-duro Walter Tools tipo TNMG160404-NMS WSM01, com grãos ultrafinos ($< 0,5 \mu\text{m}$), raio de ponta $r_\epsilon = 0,4 \text{ mm}$ e revestimento PVD-TiAlN (HiPIMS). O porta-ferramentas DTJNL 2020 K16 usado tem ângulo de posição $\chi_r = 93^\circ$ e ângulos de saída (γ_o) e inclinação (λ_s) negativos (-6°). Escolheu-se este porta-ferramenta devido à alta segurança na fixação do inserto. Os detalhes do inserto e o porta-ferramenta são apresentados na Fig. 3 (WALTER TOOLS, 2018).

Para o ar comprimido refrigerado (VCCA) utilizou-se o Vortex Turbo Air FTA-12-MC (Eurotools) que consiste em um tubo com uma entrada e duas saídas: o ar pressurizado entra no tubo, que converte o ar comprimido em dois fluxos de ar a baixa pressão, retirando assim o calor do local onde o tubo é acoplado. Foi utilizado ar comprimido a uma pressão de entrada de 6 bar, que proporcionou uma temperatura média de $7,7^\circ \text{C}$ na saída do bico de injeção.

Na configuração com mínima quantidade de lubrificante (MQL) aplicou-se o fluido de corte BD-Fluid B90 (Bondmann Química) diluído em água na proporção de 20:1. Segundo o fabricante, este é um biolubrificante isento de óleos de qualquer natureza, com capacidade de lubrificar e refrigerar de maneira similar aos óleos integrais (DINO, 2014). O fluido foi aplicado pelo Nebulizador Quimatic IV a uma vazão de 100 ml/h e uma pressão de 6 bar. O bico do nebulizador foi posicionado perpendicularmente a 40 mm da aresta de corte (Fig. 2b). A medição da temperatura foi realizada periodicamente na saída do bico, e permaneceu em torno de 15,6 °C.

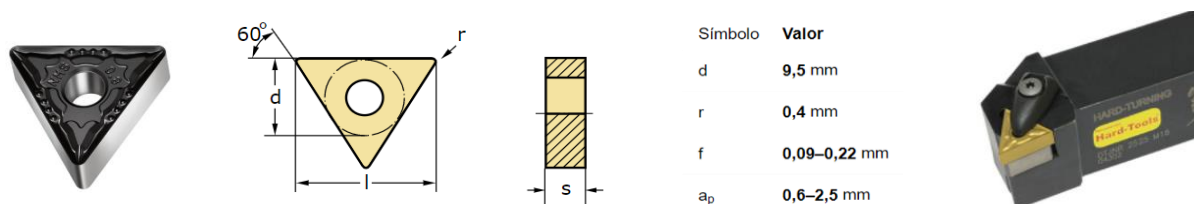
As rugosidades geradas nas superfícies usinadas foram medidas sem retirar a peça do torno utilizando o rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201P com resolução de 0,01 μm (Fig. 2c). A agulha do apalpador possui raio de ponta de 5 μm e aplica uma força de 4 mN durante a medição. As rugosidades foram registradas em todos os 30 passes e em três posições diferentes da peça, girando-a em 120°. As medidas dos parâmetros de rugosidade R_a e R_z foram tomadas utilizando um comprimento de amostragem $l_e = 0,8$ mm e um comprimento de medição $l_m = 5 \cdot l_e = 4$ mm, com velocidade de varredura de 0,25 mm/s., esta configuração é recomendada para valores entre $0,1 < R_a < 2,0$ μm e/ou $0,5$ $\mu\text{m} < R_z < 10$ μm de acordo com a norma ISO 4288 (1996). Os dados foram coletados com auxílio de um software dedicado (SJ Tools) que permite a análise gráfica da distribuição de picos e vales presentes na superfície gerada pelo processo de torneamento.

Figura 2 – Máquinas e equipamentos: (a) Torno CNC Mazak QTN 100-II; (b) posicionamento do bico na aplicação MQL; (c) Medição in-loco com o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201P.



Fonte: Oschelski *et al.* (2021)

Figura 3 – Características da ferramenta utilizada.



Fonte: Walter Tools (2018)

A coleta dos sinais de força durante todos os passes foi realizada através de um sistema monitor disponível no LAUS-UFRGS. Este sistema é constituído de um dinamômetro piezelétrico estacionário Kistler 9129A que capta simultaneamente as três componentes ortogonais de força: força passiva (F_x); força de corte (F_y) e força de avanço (F_z). Um condicionador de sinais Kistler 5070A10100 foi utilizado para amplificar e filtrar os sinais de força. Após o condicionamento, os sinais são processados através de uma placa DAQ conectada ao computador que, com o auxílio do LabVIEW 9.0, proporciona a interface com o usuário. As magnitudes das forças F_x , F_y e F_z foram

registradas a cada passe, adquiridas em 25 segundos, a fim de monitorar cada passe por completo, a uma taxa de aquisição de 10000 pontos por segundo (10 kHz).

Com o intuito de observar qualitativamente o desgaste de flanco, imagens da superfície de folga da ferramenta foram coletadas periodicamente durante a experimentação utilizando um microscópio digital USB Dino-Lite AM-413ZT, acoplado a um computador e controlado por software dedicado. Os insertos foram observados com ampliações de 50 vezes.

2.2 Procedimento Experimental

Para a realização dos experimentos de Box-Behnken (BBD), os parâmetros controláveis de entrada escolhidos foram velocidade de corte (v_c), profundidade de corte (a_p) e avanço (f). A definição dos níveis dos parâmetros é apresentada na Tab. 3. Os valores máximos e mínimos de velocidade de corte seguiram as especificações do fabricante do inserto. Como profundidade de corte, o valor mínimo escolhido para a_p corresponde a aproximadamente $2/3 r_e$, enquanto que no ponto central $a_p = r_e$ (assim, o valor máximo é de aproximadamente $4/3 r_e$).

Tabela 3 – Níveis dos parâmetros de corte.

Fatores Controláveis	Níveis		
	Inferior (-1)	Central (0)	Superior (+1)
Velocidade de Corte (v_c) [m/min]	50	75	100
Profundidade de Corte (a_p) [mm]	0,5	0,8	1,1
Avanço (f) [mm/volta]	0,065	0,085	0,105

As forças de usinagem ocorridas durante o corte, as rugosidades resultantes do processo e o desgaste do inserto foram analisados através de métodos específicos. O pós-processamento dos dados de força e rugosidade foi realizado com o software MS Excel. Para o cálculo da força de usinagem (F_u) foi utilizada a Eq. (1) a partir dos dados obtidos no experimento. O valor de R_a teórico foi calculado com o auxílio da Eq. (2), enquanto que para o cálculo de R_z teórico utilizou-se a Eq. (3). Utilizou-se também o software Minitab 19 para avaliar a influência estatística de cada variável de entrada nas variáveis de saída, e realizar a otimização dos parâmetros visando obter o melhor acabamento superficial.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4 apresenta as combinações experimentais dos parâmetros de corte (v_c, f, a_p), com os respectivos valores médios de força de usinagem (F_u) e rugosidades média (R_a) e média parcial (R_z) obtidos para as duas condições lubrificantes (VCCA e MQL). As seções subsequentes apresentarão as discussões dos resultados.

3.1 Análise da Força de Usinagem

A Figura 4 mostra as forças de usinagem (F_u) para cada passe nas condições VCCA e MQL calculadas a partir da Eq. (1). Nota-se que os menores valores de F_u para ambas as condições correspondem ao passe 12 em que se tem os menores níveis de profundidade de corte ($a_p = 0,2$ mm) e avanço ($f = 0,065$ mm/volta). As forças foram menores porque esta combinação proporciona a menor área de seção de corte (KLOCKE, 2011; MACHADO *et al.*, 2009). O mesmo raciocínio se aplica aos maiores valores de F_u para os maiores níveis de a_p (0,6 mm) e f (0,105 mm/volta) no passe 14. Apesar de os resultados não apresentarem diferenças expressivas, nota-se que os valores de força resultante utilizando VCCA foram em média 3,2% menores que

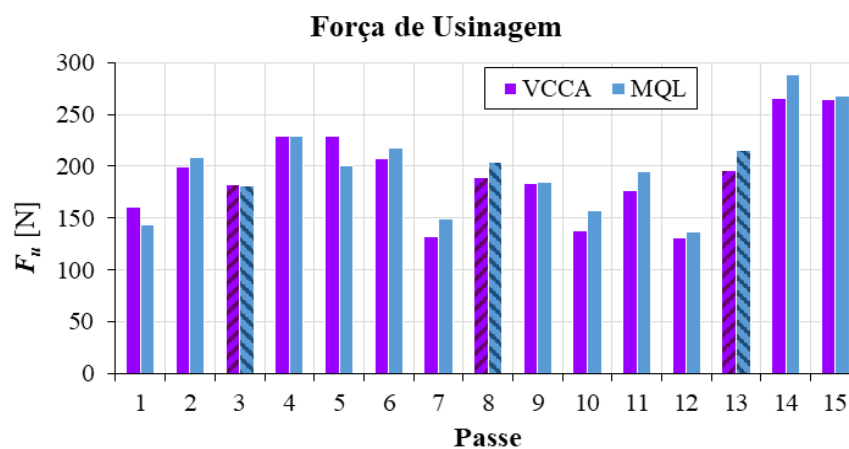
os gerados por MQL. Isso está relacionado com a diminuição da pressão específica de corte (k_s). Segundo Machado *et al.* (2009), o calor gerado no plano de cisalhamento tende a diminuir a resistência mecânica do material da peça (efeito de amolecimento). Assim, ao utilizar o VCCA a uma temperatura relativamente menor (7,7 °C) que com MQL (15,6 °C), isso provavelmente deve ter fragilizado mais o cavaco, diminuindo a tensão de ruptura ao cisalhamento do Ti-6Al-4V e, por conseguinte, causando a redução de k_s .

Tabela 4 – Variáveis de resposta em função dos fatores controláveis para cada amostra medida.

Passe	Fatores Controláveis			Variáveis de Resposta					
				VCCA			MQL		
	v_c [m/min]	a_p [mm]	f [mm/volta]	F_u [N]	R_a [μ m]	R_z [μ m]	F_u [N]	R_a [μ m]	R_z [μ m]
1	75	0,2	0,105	161	1,10	4,87	144	1,10	5,14
2	50	0,4	0,105	199	1,39	6,42	209	1,18	4,80
3*	75	0,4	0,085	182	0,67	3,82	181	0,71	4,00
4	50	0,6	0,085	229	0,90	5,25	229	1,04	5,10
5	100	0,4	0,105	229	1,31	5,46	200	1,06	4,88
6	75	0,6	0,065	207	0,48	3,11	218	0,55	3,36
7	100	0,2	0,085	132	0,69	3,70	149	0,55	3,49
8*	75	0,4	0,085	189	0,64	3,39	204	0,78	3,61
9	100	0,4	0,065	183	0,46	2,98	185	0,69	4,58
10	50	0,2	0,085	138	0,76	4,50	157	0,72	4,01
11	50	0,4	0,065	177	0,55	3,67	195	0,60	3,70
12	75	0,2	0,065	131	0,57	3,74	137	0,36	2,40
13*	75	0,4	0,085	196	0,77	4,01	215	1,07	5,04
14	75	0,6	0,105	266	1,14	5,55	288	1,34	6,44
15	100	0,6	0,085	265	0,70	3,81	268	0,71	4,72

*Passes de nível central (pontos médios) determinados via BBD.

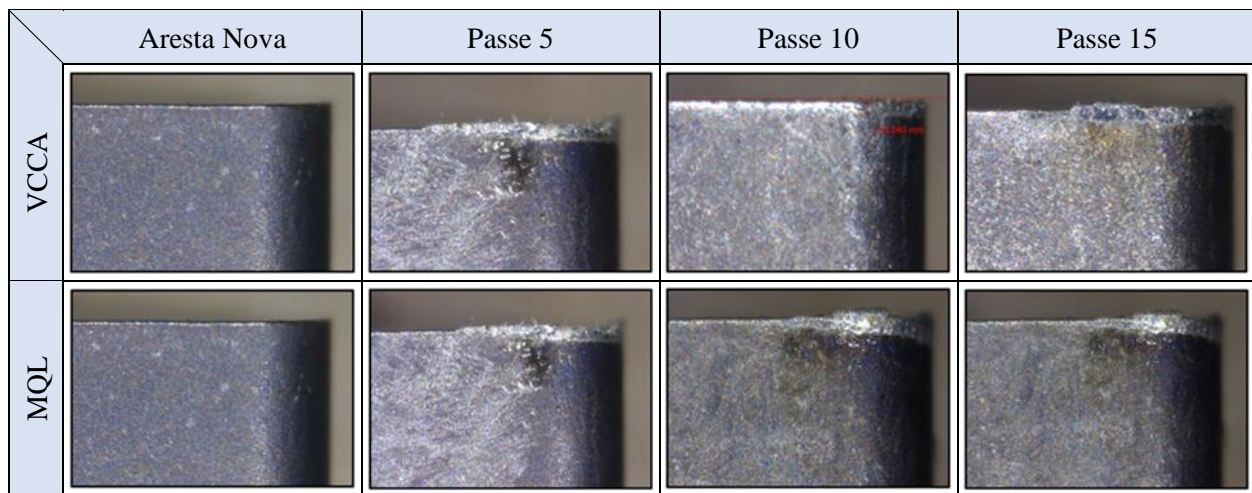
Figura 4 – Força de usinagem para cada passe nas duas condições lubrificadoras. Em destaque os passes de nível central.



Ao comparar as forças geradas nos passes 3, 8 e 13 (Fig. 4), observa-se um crescimento dos valores de F_u , embora utilizem os mesmos níveis de a_p , f e v_c . Comparando os passes 3 e 13, o aumento de F_u foi de 7,7% na condição VCCA, enquanto que na condição MQL o aumento foi de 18,8%. Esta variação pode ser justificada através do desgaste prematuro da ferramenta de corte

observado durante o experimento. A Figura 5 mostra a superfície de folga do inserto em alguns passes. Observa-se que o flanco da ferramenta para os dois meios lubrificantes (VCCA e MQL) tende a apresentar características semelhantes de desgastes. A partir do quinto passe nota-se o surgimento de aresta postiça de corte e adesão de material no flanco da ferramenta, depositado sobre as marcas de desgaste por abrasão, que provavelmente surgiram devido às baixas velocidades de corte. Apesar de não ter sido realizada uma análise detalhada dos desgastes, pode-se supor que a usinagem do Ti-6Al-4V conduz um desgaste considerável na ferramenta de corte.

Figura 5 – Desgaste de flanco na ferramenta de corte durante os ensaios (ampliação de 50x).



A Tabela 5 mostra a Análise de Variância (ANOVA) dos efeitos dos fatores controláveis sobre a força resultante para os dois meios lubrificantes considerando um intervalo de confiança de 95%. Assim, o fator é significativo quando $\text{valor-P} \leq 0,05$ (valores em negrito). Para efeito de análise, considera-se também o efeito “parcialmente significativo” para um intervalo de confiança entre 90% e 95%, ou seja, quando $0,05 < \text{valor-P} \leq 0,10$ (valores grafados em cinza).

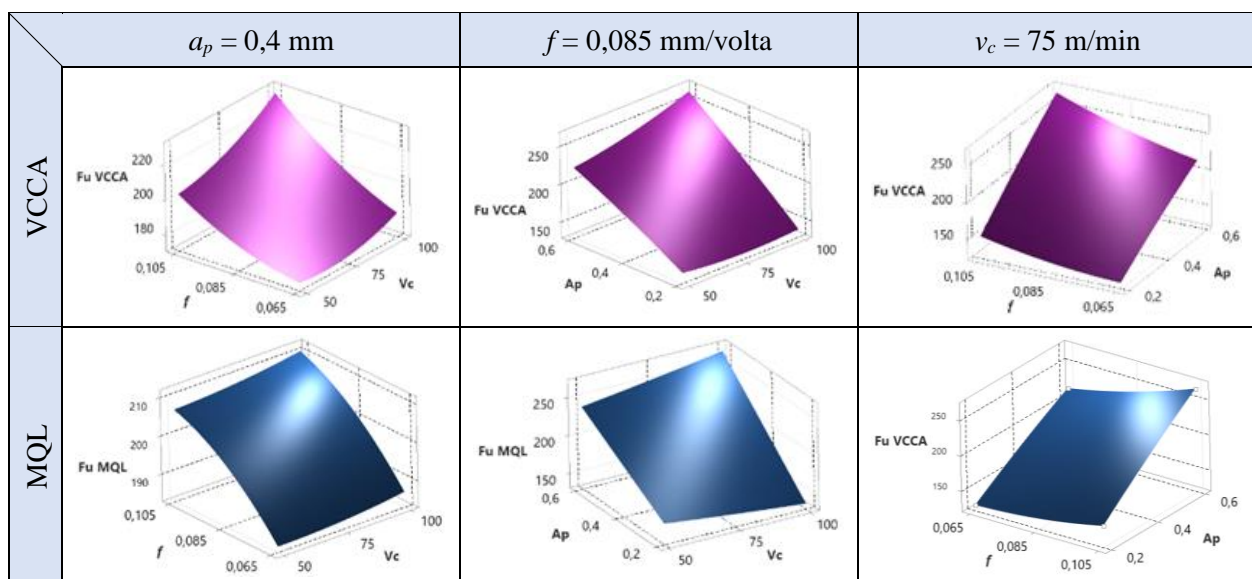
Tabela 5 – Resultados da ANOVA dos fatores controláveis sobre a força resultante para os dois meios lubrificantes (fatores mais significativos estão em destaque).

Meio	VCCA		MQL	
	Valor-P	Contribuição	Valor-P	Contribuição
a_p	0,001	80,82%	<0,0001	83,23%
f	0,003	10,99%	0,090	4,07%
v_c	0,043	2,64%	0,795	0,07%
$a_p \times a_p$	0,636	0,15%	0,988	<0,01%
$f \times f$	0,383	0,28%	0,693	0,16%
$v_c \times v_c$	0,383	0,33%	0,941	0,01%
$a_p \times f$	0,189	0,83%	0,056	5,70%
$a_p \times v_c$	0,074	1,83%	0,190	2,12%
$f \times v_c$	0,389	0,32%	0,976	<0,01%
R^2	98,19%		95,37%	

Observa-se que o efeito linear da profundidade de corte (a_p) é o fator mais significativo sobre a força de usinagem para ambos os meios lubrificantes, apresentando contribuição superior a 80%. Os efeitos lineares do avanço (f) e da velocidade de corte (v_c) também são significativos para VCCA considerando um intervalo de confiança de 95%. No caso do MQL, o efeito linear de

f e da sua combinação com a_p ($a_p \times f$) são parcialmente significativos sobre F_u . Observa-se que v_c não é significativa em MQL, mas em VCCA sim; isto provavelmente ocorreu pelo fato, de que o efeito lubrificante de MQL não influencia significativamente a redução do coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta; além disso, o seu efeito refrigerante não afeta as diminuições da dureza do cavaco e do coeficiente de atrito causadas pelo aumento de v_c (MACHADO *et al.*, 2009, SHOKRANI *et al.*, 2012). Por outro lado, o efeito refrigerante de VCCA é significativo e depende da velocidade de corte empregada. Conseqüentemente, o efeito combinado $a_p \times v_c$ também é parcialmente significativo com VCCA. Além do mais, os valores de coeficiente de determinação (R^2) acima de 95% indicam que os dados se ajustam muito bem ao modelo (MONTGOMERY, 2013). Adicionalmente, os gráficos de superfície de resposta (Fig. 6) apresentam a interação entre os parâmetros de corte e força de usinagem para ambas as condições lubrificantes.

Figura 6 – Gráficos de superfície de resposta para F_u na usinagem com VCCA e MQL (parâmetros fixos no ponto central).

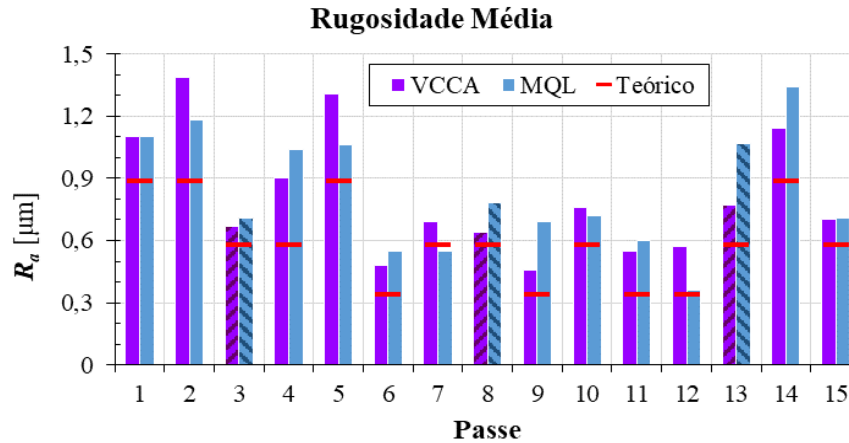


3.2 Análise dos Parâmetros de Rugosidade

A Figura 7 apresenta a média das três medições de rugosidade média (R_a) nas 15 amostras geradas. Observa-se que os valores se mostraram semelhantes na comparação visual direta entre os meios de lubrificação. No entanto, para os passes 6, 9, 11 e 12 (com $f = 0,065 \text{ mm/volta}$), nota-se que os valores de R_a com VCCA foram em média 6,4% menores que com MQL. Isso também ocorreu nos passes 3, 4, 7, 8, 10, 13 e 15 ($f = 0,085 \text{ mm/volta}$), onde os valores foram 8,1% menores para VCCA em comparação aos com MQL. Por outro lado, para $f = 0,105 \text{ mm/volta}$ (passes 1, 2, 5 e 14), os valores com VCCA foram 5,6% maiores. Uma hipótese para isso é que o efeito lubrificante do MQL só foi constatado para $f > 0,1 \text{ mm/volta}$; neste caso, a maior espessura de corte favorece o cisalhamento do cavaco e a redução do atrito beneficia o acabamento. Antes disso, o efeito refrigerante do VCCA predomina, facilitando a quebra de cavacos menos espessos e minimizando a ocorrência de rebarbas na superfície. Consta-se ainda que os valores teóricos gerados pela Eq. (2) são menores que os valores efetivos obtidos pela medição com o rugosímetro, pois existem diversos outros fatores que atuam diretamente na qualidade da superfície usinada como vibrações, instabilidade ou calibração do aparelho de medição da rugosidade, a impossibilidade de controle total do desgaste da ferramenta, a formação do cavaco, que por vezes enrola na peça, prejudicando ao acabamento, a qualidade e a estabilidade do porta ferramenta, entre outros (MACHADO *et al.*, 2009). A Eq. (2) leva em conta apenas o efeito do avanço (f) e do raio de ponta da ferramenta de corte (r_z) sobre o parâmetro R_a . Embora f seja o fator mais

significativo, a velocidade de corte (v_c), a profundidade de corte (a_p) e os meios de lubrificação também atuam diretamente na qualidade da superfície.

Figura 7 – Rugosidade média para cada passe nas duas condições lubrificantes. Em destaque os passes de nível central.



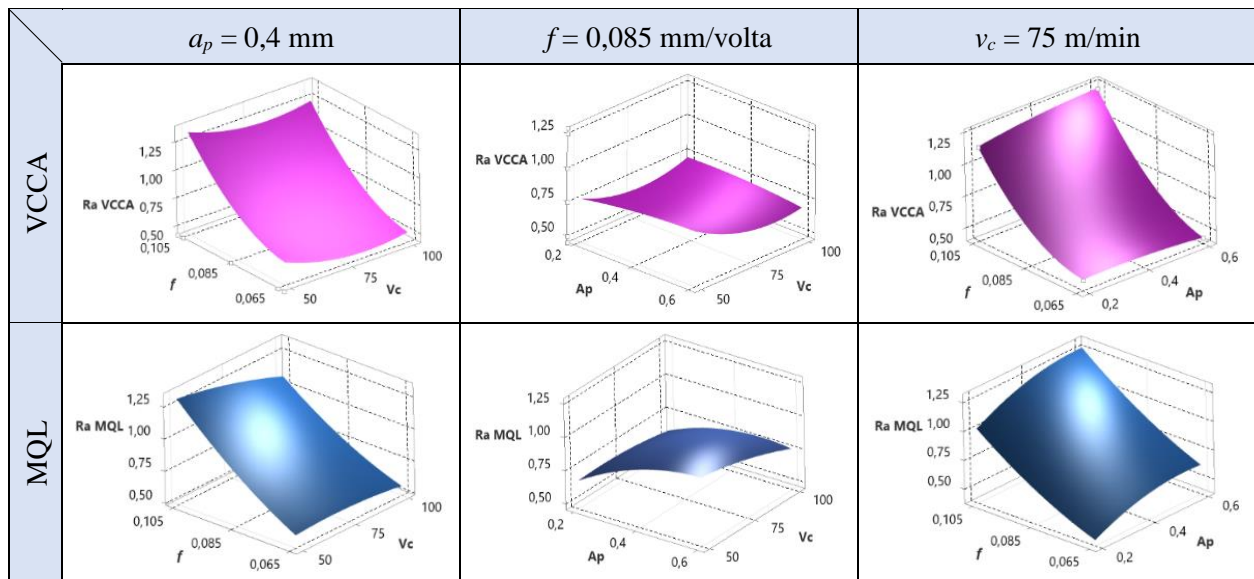
A Tabela 6 apresenta a ANOVA dos efeitos dos fatores controláveis sobre a rugosidade média (R_a) para VCCA e MQL considerando $\alpha \leq 0,05$. Para efeito de análise, adota-se também o efeito “parcialmente significativo” quando $0,05 < \alpha \leq 0,10$. Os resultados mostram que somente o efeito linear do avanço (f) é significativo sobre R_a quando o MQL é aplicado, enquanto que os efeitos linear e quadrático de f são significativos com a utilização de VCCA. Os demais fatores não foram significativos para um intervalo de confiança igual ou superior a 90%. No caso dos coeficientes de determinação (R^2), ambos se encontram acima de 85%, o que indica um bom ajuste dos dados ao modelo de estimação (MONTGOMERY, 2013).

Tabela 6 – Resultados da ANOVA dos fatores controláveis sobre a rugosidade média para os dois meios lubrificantes (fatores mais significativos estão em destaque).

Meio	VCCA		MQL	
	Valor-P	Contribuição	Valor-P	Contribuição
a_p	0,730	0,10%	0,115	9,38%
f	< 0,0001	84,76%	0,004	69,66%
v_c	0,169	1,98%	0,180	3,18%
$a_p \times a_p$	0,736	0,37%	0,452	1,72%
$f \times f$	0,033	5,98%	0,553	1,27%
$v_c \times v_c$	0,144	2,29%	0,774	0,22%
$a_p \times f$	0,531	0,35%	0,888	0,06%
$a_p \times v_c$	0,531	0,35%	0,656	0,58%
$f \times v_c$	0,961	< 0,001%	0,562	1,00%
R^2	96,18%		87,06%	

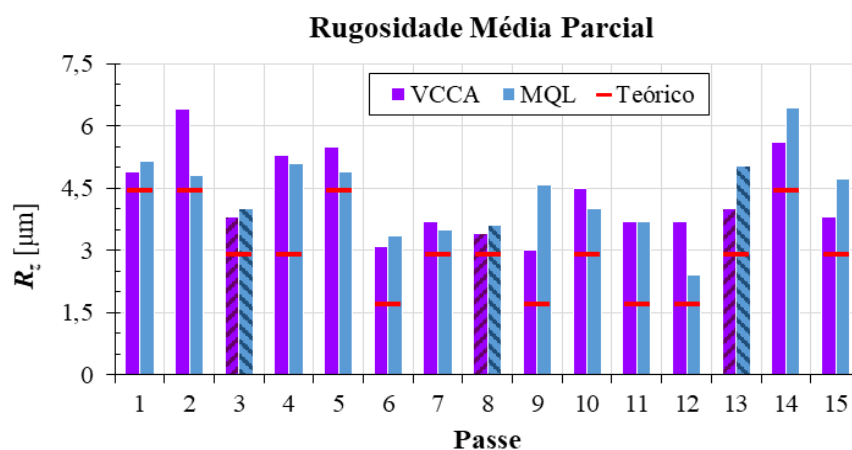
Para complementar a análise, a Figura 8 ilustra os gráficos de superfície que representam a interação entre os parâmetros de corte e R_a para ambas as condições lubrificantes. Nota-se que para MQL a influência de f é linear, enquanto que para VCCA essa influência é quadrática. Esta diferença provavelmente está ligada ao efeito do atrito e do cisalhamento do cavaco anteriormente mencionados. Observa-se também que as superfícies para f médio apresentam aspecto plano com a variação de a_p e v_c indicando a menor influência destes parâmetros em R_a .

Figura 8 – Gráficos de superfície de resposta para R_a na usinagem com VCCA e MQL (parâmetros fixos no ponto central).



A Figura 9 ilustra graficamente a média das três medições de rugosidade média parcial (R_z) nas 15 amostras usinadas. Assim como em R_a (Fig. 7), os valores de R_z foram semelhantes na comparação visual direta entre VCCA e MQL. Contudo, os valores de R_z com VCCA foram em média 3,8% e 4,9% menores que com MQL para os passes com $f=0,065$ e $0,085$ mm/volta, respectivamente. Novamente, os valores com VCCA foram 5,4% maiores que com MQL para $f=0,105$ mm/volta. Como citado anteriormente, provavelmente a maior espessura de corte pelo maior f favorece o cisalhamento do cavaco, e a redução do atrito pelo MQL beneficia o acabamento. Para baixos e médios valores de f , o efeito refrigerante do VCCA prevalece, favorecendo a quebra de cavacos com menor espessura e reduzindo a ocorrência de rebarbas.

Figura 9 – Rugosidade média parcial para cada passe nas duas condições lubrificadoras. Em destaque os passes de nível central.



A Tabela 7 mostra a ANOVA dos efeitos dos fatores controláveis sobre R_z para os dois meios lubrificadoras (VCCA e MQL) considerando $\alpha \leq 0,05$. Para efeito de análise, analisa-se também o efeito “parcialmente significativo” para $0,05 < \alpha \leq 0,10$. Os resultados indicam novamente que apenas o efeito linear do avanço (f) é significativo sobre R_z quando o MQL é aplicado. Na utilização de VCCA, os efeitos linear e quadrático de f e v_c são significativos. Os demais fatores não foram significativos para um intervalo de confiança igual ou superior a 90%.

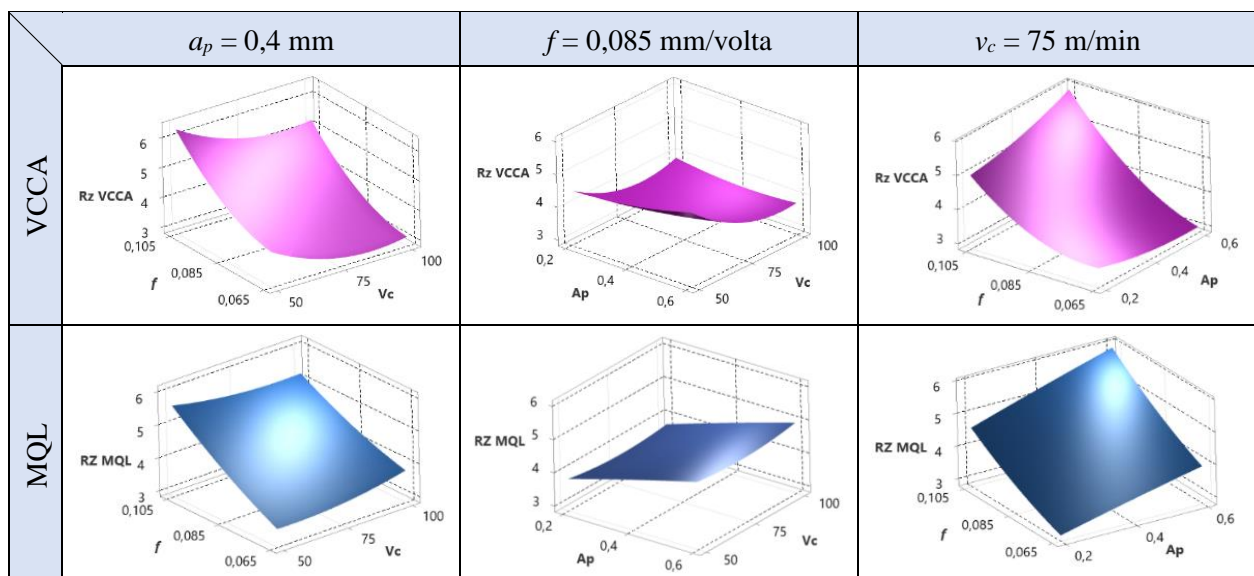
Tabela 7 – Resultados da ANOVA dos fatores controláveis sobre a rugosidade média parcial para os dois meios lubrificadorantes (fatores mais significativos estão em destaque).

Meio	VCCA		MQL	
	Valor-P	Contribuição	Valor-P	Contribuição
a_p	0,358	0,86%	0,129	19,52%
f	< 0,0001	68,05%	0,035	48,50%
v_c	0,011	13,07%	0,982	< 0,001%
$a_p \times a_p$	0,496	0,45%	0,966	0,01%
$f \times f$	0,053	5,13%	0,776	0,55%
$v_c \times v_c$	0,053	4,44%	0,784	0,44%
$a_p \times f$	0,122	2,90%	0,856	0,22%
$a_p \times v_c$	0,362	0,84%	0,940	0,04%
$f \times v_c$	0,961	< 0,001%	0,562	1,00%
R^2	95,81%		70,47%	

Ao utilizar MQL, a profundidade de corte (a_p) apresenta cerca de 20% de contribuição sobre R_z , mas a sua influência tem menor significância (Valor-P \cong 0,13); consequentemente, o coeficiente de determinação foi relativamente baixo, porém aceitável. Segundo Montgomery (2013), os dados se ajustam razoavelmente ao modelo quando $R^2 \geq 70\%$. No caso do VCCA, o ajuste dos dados ao modelo de estimação é excelente, pois $R^2 > 95\%$.

De maneira complementar, a Figura 10 ilustra os gráficos de superfície de resposta que apresentam a interação entre os parâmetros de corte e R_z para VCCA e MQL. Observam-se nas superfícies os efeitos lineares de f e a_p sobre R_z na usinagem com MQL e os efeitos quadráticos de f e v_c sobre esse parâmetro no torneamento com VCCA.

Figura 10 – Gráficos de superfície de resposta para R_z na usinagem com VCCA e MQL (parâmetros fixos no ponto central).



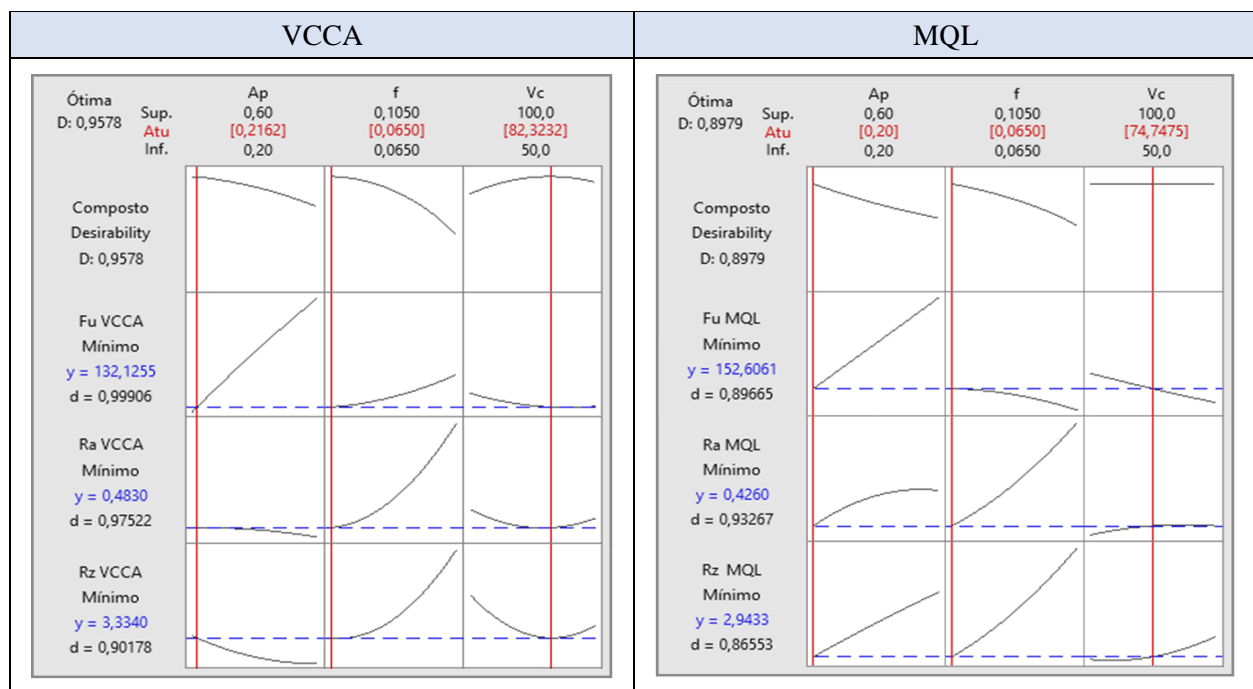
3.3 Otimização dos Parâmetros de Corte

Realizada a análise de influência de cada fator sobre a força de usinagem (F_u) e os parâmetros de rugosidade média (R_a) e média parcial (R_z), o projeto de experimentos de Box-Behnken permite

que se combine tais fatores para determinar os parâmetros ótimos de usinagem que alieem baixa força de usinagem e baixa rugosidade. Através da otimização multivariada, obtêm-se uma solução de parâmetros e predição de valores. A otimização faz uso da função *Desirability* (d). A escala desta 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 resposta depende do objetivo do experimento e pode ser de três 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. Uma vez especificadas as funções *desirability* para todas as respostas, elas são 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 (D), transformando o problema em descobrir os níveis dos fatores que maximizem esse valor (COSTA *et al.*, 2011).

A Figura 11 apresenta as curvas características de cada variável de resposta (F_u , R_a e R_z) indicando também o comportamento da sobreposição de ambas para cada meio de lubrificarrefrigeração. Para VCCA observa-se que a velocidade de corte (v_c) tem comportamento semelhante para F_u , R_a e R_z ; entretanto, o avanço (f) possui uma maior influência em R_a e R_z que em F_u , enquanto a profundidade de corte (a_p) é mais significativa para F_u que pra R_a e R_z . No caso de MQL, observa-se que v_c tem comportamento semelhante para F_u e R_a . Porém, f possui maior influência em R_a e R_z que em F_u , enquanto que a_p é mais significativo para F_u e R_z que para R_a .

Figura 11 – Otimização multivariada das variáveis de controle sobre as variáveis de resposta para VCCA e MQL.



Assim, os parâmetros de entrada que geram a melhor combinação das variáveis de resposta estão apresentados na Tab. 8. Nota-se que para VCCA a magnitude de a_p é cerca de 8% maior que o valor mínimo utilizado, o avanço é o menor possível, e v_c é aproximadamente 10% maior que o valor médio do experimento; para MQL, a_p e f são os menores possíveis enquanto v_c é praticamente o valor médio. Observa-se que no passe 12 ($a_p = 0,2$ mm, $f = 0,065$ mm/volta e $v_c = 75$ m/min) os valores de rugosidade ($R_a = 0,36$ μ m; $R_z = 2,40$ μ m) e força ($F_u = 137$ N) encontrados no experimento foram menores que os obtidos pelo modelo de estimação para MQL.

Tabela 8 – Parâmetros de corte e situação otimizada para cada meio lubrificante.

Meio	a_p [mm]	f [mm/volta]	v_c [m/min]	F_u [N]	R_a [μm]	R_z [μm]
VCCA	0,216	0,065	82,3	132,1	0,483	3,33
MQL	0,200	0,065	74,8	152,6	0,426	2,94

Embora os níveis dos parâmetros de corte sejam os mesmos encontrados na otimização multivariada, essa diferença provavelmente ocorreu devido ao $D = 0,898$ com $0,866 < d < 0,932$. Vale lembrar que $70,5\% < R^2 < 95,3\%$. Embora a diferença na estimação tenha sido de 18% para R_a , 22% para R_z , e 11% para F_u , não se descarta a validade do modelo para MQL. Já para VCCA, espera-se obter valores reais bastante próximos do estimado pelo modelo, pois $D = 0,958$, $0,902 < d < 0,999$ e $95,8\% < R^2 < 98,2\%$.

4 CONCLUSÕES

A análise e o projeto de experimentos BBD possibilitaram investigar a influência dos parâmetros de corte (a_p, f, v_c) e dos meios lubrificantes (VCCA e MQL) na força de usinagem (F_u) e nas rugosidades (R_a e R_z) durante o torneamento longitudinal externo da liga Ti-6Al-4V. Com base nisso, algumas conclusões podem ser apontadas.

- Na usinagem com VCCA, os fatores controláveis que mais influenciam F_u foram a_p (80,8%) e f (11,0%); v_c (2,64%) apresentou significativa importância devido a impossibilidade de lubrificação da zona de corte. Aplicando MQL, a maior influência sobre F_u foi de a_p (83,2%) e da combinação $a_p \times f$ (5,70%); v_c (0,07%) mostrou pouca influência.
- Com VCCA, os fatores mais significativos sobre R_a foram o f (84,76%) e $f \times f$ (5,98%). Com MQL, os mais influentes sobre R_a foram f (69,66%) e a_p (9,38%).
- Considerando a aplicação de VCCA, os fatores de maior influência sobre R_z foram f (68,0%) e v_c (13,1%); v_c possui grande relevância pelo fato de influenciar no calor gerado, e VCCA poder refrigerar a zona de corte. No caso do MQL, os fatores de maior significância sobre R_z foram f (48,55%) e a_p (19,52%); novamente não houve influência de v_c (0,001%).
- A otimização multivariada para VCCA manteve os níveis de a_p (0,216 mm) e f (0,065 mm/volta) baixos e v_c (82,3 m/min) médio; os valores estimados (com $D = 0,958$) foram $F_u = 132,1$ N; $R_a = 0,483$ μm e $R_z = 3,33$ μm . Para MQL, a otimização também manteve os níveis de a_p (0,200 mm) e f (0,065 mm/volta) baixos e v_c (74,8 m/min) médio; os valores estimados (com $D = 0,898$) foram $F_u = 152,6$ N; $R_a = 0,426$ μm e $R_z = 2,94$ μm .

Portanto, pode-se concluir que ambos os meios de lubrificação proporcionam influência semelhante sobre as variáveis de saída, com variações máximas de 15% na F_u e de 13% em R_a e R_z . Apesar de os resultados serem semelhantes aos do MQL, o VCCA reduz de maneira significativa os impactos ambientais, colabora com a saúde dos operadores e possui menor custo.

REFERÊNCIAS

ASM HANDBOOK. “Fatigue and fracture properties of titanium alloys”. In: **Fatigue and Fracture**, ASM International, v. 19, p. 829-853, 1996.

ASTAKHOV, V. P. “Ecological machining: Near-dry machining”, In: **Machining – Fundamentals and Recent Advances**. Springer, London, p. 195-223, 2008.

BOSWELL, B. *et al.* “A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, p. 321-340, 2017.

COSTA, N. R., LOURENÇO, J., PEREIRA, Z. L. “Desirability function approach: A review and performance evaluation in adverse conditions”. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 107, p. 234-244, 2011.

DEBNATH, S., REDDY, M. M., YI, Q. S. “Environmentally friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review”. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33-47, 2014.

DINO. **Bondmann lança fluido de usinagem isento de óleo**, 2014. Disponível em: <https://noticias.dino.com.br/noticia/?releaseId=44823>. Acesso em: 16/10/2021.

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

FERREIRA, S. L. C. *et al.* “Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods”. **Analytica Chimica Acta**, v. 597, p. 179- 186, 2007.

GINTING, Y. R. *et al.* “Environmental generation of cold air for machining”, **Procedia CIRP**, v. 40, p. 648-652, 2016.

GUPTA, K., LAUBSCHER, R. F. “Sustainable machining of titanium alloys: A critical review”. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 231, p. 2543-2560, 2016.

GÜRKAN, D., YAŞAR, S. A., UZUN, G. KORKUT, Í. “Investigation of the vortex cooling method to machining method and cutting parameters”. **Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology**, v. 8, n. 3, p. 730-745, 2020.

ISO 4288. **Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture**. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1996.

KISTLER. **Cutting Force Measurement: Precise Measuring Systems for Metal-Cutting**, Winterthur, Switzerland, 2009.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes – Cutting**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.

LEMES, C. V., DINIZ, A. E. “Análise dos tipos de ferramentas de metal duro com e sem revestimento no torneamento de titânio comercialmente puro grau 4”. **Anais do 11º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Curitiba, PR, 2021.

LEYENS, C.; PETERS, M. **Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications**. Weinheim: WILEY-VCH, 2003

MACHADO, A. R., WALLBANK, J. “Machining of titanium and its alloys - a review”. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 204, n. 1, p. 53-60, 1990.

MACHADO, Á. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blücher, 2009.

MINITAB, **StatGuide**, 2019.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8.ed., Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

OSCHELSKI, T. B., URASATO, W. T., AMORIM, H. J., SOUZA, A. J. “Effect of cutting conditions on surface roughness in finish turning Hastelloy X superalloy”. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, n. 1, p. 532-537, 2021.

PETERS, M.; HEMPTENMACHER, J.; KUMPFERT, J.; LEYENS, C. “Structure and properties of titanium and titanium alloys”. In: **Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications**. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, p. 1-35, 2003.

PRAMANIK, A. “Problems and solutions in machining of titanium alloys”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, p. 919-928, 2014.

REVURU, R. S., POSINASETTI, N. R., RAMANA, V., AMRITA, M. “Application of cutting fluids in machining of titanium alloys – a review”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, p. 2477-2498, 2017.

SARTORI, S., GHIOTTI, A., BRUSCHI, S. “Solid Lubricant-assisted Minimum Quantity Lubrication and Cooling strategies to improve Ti6Al4V machinability in finishing turning”. **Tribology International**, v. 118, p. 287-294, 2018.

SHOKRANI, A., DHOKIA, V., NEWMAN, S. T. “Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids”. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 57, p. 83-101, 2012.

SOUZA, A. J. **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento**. Tese (Doutorado) em Engenharia Mecânica, UFSC. Florianópolis, 2004.

TAVARES, J. M. R. S., **Indicação dos Estados de Superfície**. CFAC – Concepção e Fabrico Assistidos por Computador. FEUP – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2012.

WALTER TOOLS, **Product Innovations Catalogue: Driving the future of metal cutting**, 2018. Disponível em: <https://waltertools.blaetterkatalog.de/blaetterkatalog/catalogs/innovation/en/18-1-order/pdf/complete.pdf>. Acesso em: 25/09/2021.

ZLATIN, N.; FIELD, M. “Procedures and precautions in machining titanium alloys”. In: Jaffee, R. I.; Burte, H. M. (eds) **Titanium Science and Technology**. Boston: Springer, p. 489-504, 1973.