



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
REDE NORDESTE AEROESPACIAL
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AEROESPACIAL

LUÍS HENRIQUE DA COSTA ARAÚJO

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL E DOS PARÂMETROS DE CORTE
NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DA LIGA TI-6AL-4V: usando planejamento
de experimentos e um sistema de controle de temperatura por resfriamento de
vapor**

Recife
2023

LUÍS HENRIQUE DA COSTA ARAÚJO

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL E DOS PARÂMETROS DE CORTE
NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DA LIGA TI-6AL-4V: usando planejamento
de experimentos e um sistema de controle de temperatura por resfriamento de
vapor**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aeroespacial.

Área de concentração: Ciências e Tecnologias Aeroespaciais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira.

Coorientador: Prof. Dr. Rogério Pontes de Araújo.

Recife

2023

Catálogo na Fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

A663a Araújo, Luís Henrique da Costa.
Análise da integridade superficial e dos parâmetros de corte no processo de torneamento da liga Ti-6Al-4V: usando planejamento de experimentos e um sistema de controle de temperatura por resfriamento de vapor / Luís Henrique da Costa Araújo, 2023.
98 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira.
Coorientador: Prof. Dr. Rogério Pontes de Araújo.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial.
Recife, 2023.
Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia aeroespacial. 2. Liga Ti-6Al-4V. 3. Design de experimentos. 4. Sistema de refrigeração. 5. Rugosidade superficial. 6. Torneamento CNC. I. Oliveira, Carlos Augusto do Nascimento (Orientador). II. Araújo, Rogério Pontes de (Coorientador). III. Título.

629.1CDD (22. ed.)

UFPE

BCTG / 2023 - 242

LUIS HENRIQUE DA COSTA ARAUJO

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL E DOS PARÂMETROS DE CORTE
NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DA LIGA TI-6AL-4V: usando planejamento
de experimentos e um sistema de controle de temperatura por resfriamento de
vapor**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico Centro de Tecnologia e Geociência, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aeroespacial. Área de concentração: Ciências e Tecnologias Aeroespaciais

Aprovado em: 22/09/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Rogério Pontes de Araújo (Coorientador)
Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Oscar Olimpio de Araujo Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jose Angelo Peixoto da Costa (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus por me dar a vida e me ajudar a superar todos os obstáculos que encontrei durante esse tempo.

Obrigado aos meus pais, esposa e irmão por me incentivarem nos momentos difíceis e por me apoiarem em todos os momentos com minha dedicação.

Agradeço ao meu mentor, Prof. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira, e ao meu coorientador, Prof. Rogério Pontes de Araújo, que me fizeram ter um melhor desempenho no processo de formação profissional. Além do professor Tiago Leite Rolim e outros professores que ajudaram diretamente na realização da pesquisa.

RESUMO

Este estudo investigou a rugosidade (variável de saída) durante o torneamento longitudinal, com fluido de corte pressurizado, da liga de Ti-6Al-4V usando técnicas de design de experimentos (DOE). A velocidade de corte (v_c), avanço (f), profundidade de corte (a), temperatura do fluido de corte (T) e raio de ponta da ferramenta (R) são variáveis de entrada, cada uma com três níveis diferentes e a rugosidade como parâmetros de saída. Dentre os aspectos favoráveis desta pesquisa, tem-se a implementação de um sistema de refrigeração acoplado a um torno CNC, cuja finalidade é controlar a temperatura do fluido de corte, com o intuito de aumentar a vida útil da ferramenta. Nesse caso, medindo-se a rugosidade e calculando a incerteza, é possível estudar a influência dos parâmetros de entrada e suas interações no acabamento de cada corpo de prova. Portanto, aplicando essas duas técnicas, analisa-se o modelo matemático que melhor descreve a rugosidade por meio dos parâmetros significativos como a velocidade de corte e avanço. O valor da rugosidade R_a obtido pelo modelo quadrático está mais próximo do valor real, onde se obtém um erro percentual médio absoluto de 6,9%. Já para a rugosidade R_z , o modelo linear é mais satisfatório com erro percentual médio absoluto de 3,8%. Todos os modelos desenvolvidos neste estudo alcançaram confiabilidade superior a 95%.

Palavras-chave: liga Ti-6Al-4V; design de experimentos; sistema de refrigeração; rugosidade superficial; torneamento CNC.

ABSTRACT

This study investigated the roughness (output variable) during longitudinal lathing with pressurized cutting fluid, of a Ti-6Al-4V alloy using design of experiments (DOE) techniques. Cutting speed (v_c), feed rate (f), cut depth (a), cutting fluid temperature (T), and tool tip radius (R) were input variables, each with three different levels. Surface roughness was the output variable. Among the favorable aspects of this study was the implementation of a cooling system coupled to a CNC lathe, whose purpose was to control the temperature of the cutting fluid to increase tool life. In this case, by measuring the roughness and calculating the uncertainty, it was possible to study the influence of the input parameters and their interactions on the finishing of each test specimen. By applying these two techniques, the mathematical model that best describes the roughness through the significant parameters, such as cutting speed and feed rate, was analyzed. The roughness value R_a , obtained by the quadratic model, is closest to the real value, with an average absolute percentage error of 6.9%. For the roughness R_z , the linear model is more satisfactory, with a mean absolute error of 3.8%. All models developed in this study achieved reliability greater than 95%.

Keywords: Ti-6Al-4V alloy; design of experiments; refrigeration system; surface roughness; CNC lathing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Geometria da ferramenta de corte utilizada nesta pesquisa | 28 |
| Figura 2 - Principais formas de desgaste na ferramenta de corte | 30 |
| Figura 3 - Perfil da rugosidade superficial e cálculo do Ra..... | 34 |
| Figura 4 - Perfil da rugosidade superficial e cálculo do Rp..... | 35 |
| Figura 5 - Perfil da rugosidade superficial e cálculo do Rz..... | 35 |
| Figura 6 - Transformação da fase α para fase β do titânio a 882°C..... | 38 |
| Figura 7 - Ilustração da influência dos elementos de liga na mudança de fase nas ligas de titânio..... | 39 |
| Figura 8 - Materiais utilizados na turbina Trent 800..... | 43 |
| Figura 9 - Preparação do corpo de prova por: (a) serramento, (b) faceamento | 54 |
| Figura 10 - Seções do reservatório | 55 |
| Figura 11 - Componentes do sistema de refrigeração..... | 56 |
| Figura 12 - Sistema de aquisição de dados..... | 57 |
| Figura 13 - Região de fixação do termopar | 57 |
| Figura 14 - Porta ferramenta e inserto no torno CNC | 58 |
| Figura 15 - Posições de corte utilizadas: (a) as duas arestas de corte utilizadas da vista superior. (b) as duas arestas de corte utilizadas da vista inferior | 58 |
| Figura 16 - Medição concentricidade do corpo de prova na placa com emprego do relógio comparador | 59 |
| Figura 17 - Três pontos de medição da peça usinada..... | 59 |
| Figura 18 - Diagrama de blocos referente a cada etapa de experimento | 60 |
| Figura 19 - (a) Desgaste com T de 10,0 °C, v_c de 60 m/min e f de 0,12 mm/rev. (b) Desgaste com T de 20,0 °C, v_c de 60 m/min e f de 0,12 mm/rev | 64 |
| Figura 20 - Monitoramento das temperaturas na seção 1 com T de 10,0 °C (linha preta) e 20,0 °C (linha vermelha). A v_c e f são constantes, 60 m/min e 0,12 mm/rev respectivamente | 65 |
| Figura 21 - (a) Desgaste com fluido a T de 10,0 °C, v_c de 100 m/min e f de 0,20 mm/rev. (b) Desgaste a seco com v_c de 100 m/min e f de 0,20 mm/rev | 65 |

| | |
|---|----|
| Figura 22 - Monitoramento das temperaturas das ferramentas de corte com usinagem a seco (v_c de 100 m/min e f de 0,20 mm/rev) e úmida (T de 10,0 °C, v_c de 100 m/min e f de 0,20 mm/rev) | 66 |
| Figura 23 - (a) Desgaste com v_c de 60 m/min, T de 20,0 °C e f de 0,12 mm/rev. (b) Desgaste com v_c de 100 m/min, T de 20,0 °C e f de 0,12 mm/rev. | 67 |
| Figura 24 - Monitoramento das temperaturas na ferramenta de corte com v_c de 60 m/min (linha preta) e 100 m/min (linha vermelha). A T e f são constantes, 20,0 °C e 0,12 mm/rev respectivamente | 68 |
| Figura 25 - Efeito dos parâmetros de corte sobre R_a | 69 |
| Figura 26 - Efeito dos parâmetros de corte sobre R_z | 69 |
| Figura 27 - Significância dos fatores e suas interações na resposta R_a | 70 |
| Figura 28 - Significância dos fatores e suas interações na resposta R_z | 71 |
| Figura 29 - Predição da rugosidade R_a | 71 |
| Figura 30 - Predição da rugosidade R_z | 72 |
| Figura 31 - Efeito dos parâmetros de corte sobre T_{max} | 73 |
| Figura 32 - Predição da temperatura máxima no torneamento | 73 |
| Figura 33 - Efeito do raio da ferramenta, avanço e profundidade de corte sobre R_a | 75 |
| Figura 34 - Significância dos fatores e suas interações na resposta R_a | 76 |
| Figura 35 - Predição do R_a | 77 |
| Figura 36 - Predição do R_z | 77 |
| Figura 37 - Predição da temperatura máxima da ferramenta de corte | 78 |
| Figura 38 - Efeito do raio da ferramenta e avanço sobre R_a | 80 |
| Figura 39 - Significância dos fatores e suas interações na resposta R_a | 80 |
| Figura 40 - Significância dos fatores e suas interações na resposta R_z | 80 |
| Figura 41 - Predição da rugosidade superficial R_a | 81 |
| Figura 42 - Superfície de R_a em função do avanço e do raio da ferramenta de corte | 82 |
| Figura 43 - Predição da rugosidade superficial R_z | 82 |
| Figura 44 - Superfície de R_z em função do avanço e do raio da ferramenta de corte | 83 |
| Figura 45 - Comparação dos modelos de R_a estabelecidos nesta pesquisa com o valor real..... | 84 |

Figura 46 - Comparação dos modelos de R_z estabelecidos nesta pesquisa com o valor real.....85

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Comprimento de amostragem cut-off | 36 |
| Tabela 2 - Características de algumas ligas metálicas | 37 |
| Tabela 3 - Exemplos de ligas das categorias do titânio | 38 |
| Tabela 4 - Propriedades mecânicas do titânio e suas ligas..... | 40 |
| Tabela 5 - Composição química da liga de Ti-6Al-4V | 55 |
| Tabela 6 - Valores utilizados para cada parâmetro de corte na primeira etapa | 61 |
| Tabela 7 - Valores utilizados para cada parâmetro de corte na segunda etapa | 61 |
| Tabela 8 - Medição da rugosidade (R_a e R_z) pelo fatorial 2^3 com 5 pontos centrais com parâmetros em níveis dos fatores | 63 |
| Tabela 9 - Medição da rugosidade (R_a e R_z) pelo fatorial 2^3 com 3 pontos centrais..... | 74 |
| Tabela 10 - Medição da rugosidade (R_a e R_z) pelo <i>definitive screening design</i> | 79 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Resumo das principais técnicas empregadas para melhoria do processo de corte..... | 25 |
| Quadro 2 - Resumo sobre a influência das propriedades do titânio em sua usinabilidade | 43 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|---|
| a | Profundidade de corte |
| \bar{X} | Média amostral |
| $\bar{\bar{X}}$ | Média geral |
| D | Diâmetro externo |
| d | Diâmetro interno |
| f | Avanço |
| F | F-Ratio |
| H_0 | Hipótese nula |
| H_1 | Hipótese alternativa |
| k_p | Custo de processo |
| k_{uf} | Custo da ferramenta |
| k_{um} | Custo de máquina |
| k_{us} | Custo de mão-de-obra |
| l_f | Comprimento de corte |
| Q | Taxa de remoção de material |
| R_a | Rugosidade média |
| R_p | Altura máxima do pico do perfil |
| R_q | Rugosidade da raiz quadrada média |
| R_t | Altura máxima do perfil |
| R_v | Profundidade máxima do vale |
| R_z | Profundidade média de rugosidade |
| SST | Soma dos desvios quadrados sobre a grande media |
| SST_E | Soma dos desvios quadrados para todas observações |
| SST_G | Soma dos desvios quadrados para cada media |
| T | Temperatura do fluido de corte |
| t_c | Tempo de corte |
| T_{max} | Temperatura máxima da ferramenta de corte |
| U | Incerteza expandida |
| v_c | Velocidade de corte |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 18 |
| 1.2 | MOTIVAÇÃO..... | 18 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 19 |
| 1.3.1 | Objetivos gerais..... | 19 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos..... | 19 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 2.1 | USINAGEM..... | 21 |
| 2.2 | TORNEAMENTO | 21 |
| 2.3 | VELOCIDADE (v_c)..... | 22 |
| 2.4 | AVANÇO (f) | 22 |
| 2.5 | PROFUNDIDADE DE CORTE (a)..... | 22 |
| 2.6 | FLUIDO DE CORTE | 23 |
| 2.6.1 | Funções dos fluidos de corte..... | 26 |
| 2.7 | FERRAMENTA DE CORTE | 27 |
| 2.7.1 | Desgaste da ferramenta | 29 |
| 2.7.2 | Vida da ferramenta | 31 |
| 2.8 | USINABILIDADE..... | 32 |
| 2.9 | RUGOSIDADE | 33 |
| 2.9.1 | Rugosidade Média (R_a)..... | 33 |
| 2.9.2 | Rugosidade da raiz quadrada média (R_q) | 34 |
| 2.9.3 | Altura Máxima do Pico do Perfil (R_p)..... | 34 |
| 2.9.4 | Profundidade Máxima do Vale (R_v)..... | 35 |
| 2.9.5 | Altura Máxima do Perfil (R_t)..... | 35 |
| 2.9.6 | Profundidade Média de Rugosidade (R_z)..... | 35 |
| 2.9.7 | Medição da rugosidade | 36 |
| 2.10 | TITÂNIO..... | 36 |
| 2.11 | METALURGIA DO TITÂNIO | 37 |
| 2.11.1 | Alfa (α) Ligas | 40 |
| 2.11.2 | Ligas quase alfa (α)..... | 40 |
| 2.11.3 | Beta (β) Ligas | 41 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.11.4 | Ligas Alfa-Beta (α - β)..... | 41 |
| 2.11.5 | Titânio comercialmente puro (CP-Ti)..... | 41 |
| 2.12 | APLICAÇÃO DO TITÂNIO NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL..... | 42 |
| 2.13 | USINAGEM LIGA DE TITÂNIO..... | 43 |
| 2.14 | USINAGEM LIGA DE TI-6AL-4V..... | 45 |
| 2.15 | DESIGN OF EXPERIMENTS..... | 45 |
| 2.15.1 | Tipos de fatores..... | 46 |
| 2.15.2 | Princípios básicos de projetos experimentais..... | 47 |
| 2.15.3 | Finalidade do DOE..... | 48 |
| 2.15.4 | Análise de variância (ANOVA)..... | 49 |
| 2.15.4.1 | Média | 49 |
| 2.15.4.2 | Soma dos quadrados..... | 50 |
| 2.15.4.3 | Graus de liberdade..... | 50 |
| 2.15.4.4 | F-ratio..... | 51 |
| 2.15.4.5 | Hipótese..... | 51 |
| 2.15.5 | Modelos de superfície de resposta..... | 52 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 54 |
| 3.1 | Corpo de prova..... | 54 |
| 3.2 | SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO..... | 55 |
| 3.3 | SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS..... | 56 |
| 3.4 | USINAGEM..... | 57 |
| 3.5 | AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE..... | 59 |
| 3.6 | METODOLOGIA DO DESIGN DE EXPERIMENTOS..... | 60 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 63 |
| 4.1 | PRIMEIRA FASE DE EXPERIMENTOS UTILIZANDO A TÉCNICA 2 ³ COM CINCO PONTOS CENTRAIS..... | 63 |
| 4.1.1 | Temperatura do fluido de corte..... | 64 |
| 4.1.2 | Velocidade de corte..... | 66 |
| 4.1.3 | Avanço..... | 68 |
| 4.1.4 | Design de experimentos..... | 69 |
| 4.2 | SEGUNDA FASE DE EXPERIMENTOS UTILIZANDO A TÉCNICA 2 ³ COM TRÊS PONTOS CENTRAIS..... | 74 |
| 4.2.1 | Raio da ferramenta de corte..... | 75 |
| 4.2.2 | Design de experimentos..... | 75 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.3 | SEGUNDA FASE DE EXPERIMENTOS UTILIZANDO A TÉCNICA <i>DEFINITIVE SCREENING DESIGN</i> | 78 |
| 4.3.1 | Design de experimentos | 79 |
| 4.4 | VALIDAÇÃO DOS MODELOS | 83 |
| 4.5 | ANÁLISE ECONÔMICA | 85 |
| 5 | CONCLUSÃO | 87 |
| | REFERÊNCIAS | 89 |
| | APÊNDICE A – PROGRAMA UTILIZADO | 98 |

1 INTRODUÇÃO

À medida que o campo da ciência e engenharia de materiais continua a evoluir, a pesquisa sobre o uso de novas tecnologias para criar ligas de alto desempenho está se tornando mais comum. Nesta classificação estão as ligas de titânio, que são materiais metálicos importantes utilizados em diversas indústrias como aeroespacial, automotiva e biomédica (AGRAWAL et al, 2021; MELLO et al, 2021). Isto deve-se à confiabilidade e vasta aplicação dos componentes de titânio, bem como à sua resistência à corrosão e elevada relação resistência/peso (GENGA et al, 2020; YOUNAS et al, 2021). Portanto, o titânio e suas ligas são muito importantes no cenário de transformações da indústria contemporânea (em evolução).

Apesar da crescente demanda por essas ligas em diversas aplicações na ciência e engenharia, sua fabricação, principalmente por usinagem, sofre de uma série de limitações (KHANDAI; MATHEW; KURIACHEN, 2022). O desgaste rápido da ferramenta encontrado na usinagem de ligas de titânio é um desafio a ser superado devido à baixa condutividade térmica destas ligas (LI et al, 2022; LIANG; LIU; WANG, 2020; SINGH et al, 2020). Esta propriedade térmica também é encontrada na liga aeroespacial Ti-6Al-4V aumentando as taxas de desgaste da ferramenta e reduzindo a qualidade do acabamento superficial (LIANG et al, 2020). Para superar este fator, diversos estudos têm sido realizados sobre a lubrificação e refrigeração na usinagem de ligas Ti-6Al-4V com o objetivo de aumentar significativamente a vida útil da ferramenta (AIRAO et al, 2022; ALI KHAN et al, 2019; AGRAWAL et al, 2021; PIMENOV et al, 2021).

Por outro lado, devido às excelentes propriedades acima mencionadas, essas ligas apresentam problemas durante o processamento por usinagem e, portanto, são consideradas materiais de baixa usinabilidade. Os problemas mais comuns são a tendência de reagir quimicamente com a maioria dos materiais das ferramentas de corte em temperaturas acima de 500 °C, assim como também a formação de cavacos segmentados, maior tendência a encruamento durante a usinagem e baixa condutividade térmica (EZUGWU; WANG, 1997). A redução da área de contato cavaco/ferramenta, desenvolvimento de altas temperaturas de corte, alta tensão na ponta e altas forças durante a usinagem de ligas de titânio podem promover deformação plástica e/ou acelerar o desgaste

da ferramenta. Neste caso, a velocidade de corte deve ser reduzida (LAKSHMI et al, 2020). Assim, a alta temperatura de corte é uma das principais razões para o rápido desgaste da ferramenta e a baixa usinabilidade das ligas de titânio, portanto, é necessária uma estratégia de resfriamento eficaz para reduzir a temperatura principalmente na área de contato entre a ferramenta e a peça (JAMIL et al, 2021; LIU, W.; LIU, Z., 2018). Para isto, o sistema de refrigeração deve estar associado a um sistema de medição das temperaturas em diversos pontos no processo. Além de aumentar a vida útil da ferramenta, a lubrificação do material também está relacionada ao acabamento superficial (rugosidade superficial) e custos de operação (MIA; KHAN; DHAR, 2017).

Diversos pesquisadores vêm buscando uma melhor avaliação dos parâmetros de usinagem para um determinado experimento, assim o objetivo é o maior domínio sobre a qualidade da usinagem (DE OLIVEIRA, 2017; JOCH et al, 2022; OUTEIRO et al, 2022). Para a indústria, a boa qualidade de superfície é necessária na fabricação.

Os parâmetros de corte do processo de usinagem têm grande impacto no desempenho e muitas vezes são as variáveis utilizadas na elaboração de um modelo estatístico. Geralmente, os parâmetros de corte referem-se à velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, força de corte, tipo de refrigerante e modo de aplicação etc. Por outro lado, os parâmetros para avaliar os resultados de usinagem geralmente incluem rugosidade da superfície, consumo de energia, tempo de usinagem, custo de produção, vida útil da ferramenta e produtividade (OBIKO; MWEMA; BODUNRIN, 2021; SARIKAYA et al, 2021). Para obter melhores resultados, a avaliação geralmente é feita por meio de modelos estatísticos adequados, que normalmente relacionam as condições de operação aos parâmetros de corte e características da ferramenta.

Um dos processos de usinagem mais comuns na fabricação das ligas de titânio é o torneamento, com máquinas de controle numérico computadorizado (CNC) (TOBOŁA et al, 2022). Embora existam muitos parâmetros que afetam o processo de torneamento, os mais importantes são a velocidade de corte, a taxa de avanço, a profundidade de corte (ARBIZU; PEREZ, 2003; HE; ZONG; ZHANG, 2018). Baseados nesta informação, o trabalho atual selecionou a velocidade de corte, a taxa de avanço, a temperatura do fluido, profundidade de corte e raio da ferramenta de corte para estudar o seu envolvimento com o

acabamento da superfície, que é um importante indicador da qualidade da usinagem de um produto (SAHU; ANDHARE, 2019). Portanto, os pesquisadores se concentram em diferentes estratégias para melhorar o acabamento durante a usinagem (DA SILVA et al, 2017; JAFFERY; MATIVENGA, 2009; MIA; KHAN; DHAR, 2017; RIBEIRO et al, 2016).

Este trabalho usa dados bibliográficos e técnicas de design de experimento para encontrar parâmetros que minimizam a rugosidade. E tem como objetivo avaliar como alguns dos principais fatores de torneamento afetam a rugosidade superficial das amostras. Essa análise será aprimorada usando uma metodologia estatística de design de experimento projetada para mostrar o efeito de cada parâmetro e suas interações no processo.

1.1 JUSTIFICATIVA

As ligas contendo titânio estão entre os materiais mais utilizados atualmente como biomateriais para a fabricação de implantes cirúrgicos, bem como nas indústrias aeroespacial, química, naval e petroquímica.

Estes materiais são cada vez mais utilizados e difíceis de usinar devido ao desgaste prematuro das ferramentas de corte devido as condições de corte (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, tipo de fluido, ferramenta de corte, força de corte, etc).

Portanto, esta pesquisa ajuda a fornecer informações sobre as melhores opções de torneamento com base nas condições de velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, método de refrigeração com lubrificação e geometria da ferramenta de corte.

Por ser um material de difícil usinagem há um forte incentivo para buscar novas tecnologias que possam melhorar o acabamento superficial. Entender o comportamento desses materiais é fundamental para aumentar a produtividade e reduzirmos os custos de fabricação.

1.2 MOTIVAÇÃO

Pesquisas anteriores já abordaram as vantagens da implementação de ligas de titânio em aplicações aeroespaciais. No entanto, esses mesmos estudos

também descrevem seus problemas de usinabilidade, como vida útil curta da ferramenta (KOSEKI et al, 2017).

Para obter um desempenho confiável, diferentes estratégias de resfriamento devem ser levadas em consideração. Portanto, a eficiência do fornecimento de refrigeração úmida com controle da temperatura do fluido é avaliada neste trabalho analisando a rugosidade superficial e mecanismos de desgaste sob diferentes condições de corte na liga estudada. Em altas velocidades de corte, o calor se torna a principal fonte de desgaste acelerado da ferramenta. O uso do sistema de refrigeração do fluido reduz as cargas térmicas e mecânicas tornando-o muito útil na usinagem de ligas de titânio.

Portanto, a motivação para este estudo foi investigar a influência dos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, raio da ferramenta e temperatura do fluido) na usinabilidade da liga de Ti-6Al-4V recozida, analisando as respostas de corte, incluindo rugosidade da superfície usinada e desgaste da ferramenta em corte com a variação dos parâmetros de usinagem.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos gerais

O objetivo deste estudo é apresentar um modelo estatístico para prever a rugosidade Ra e Rz usando uma abordagem de planejamento de experimentos. Por meio deste, será verificado a influência de cada parâmetro no processo de torneamento da liga de Ti-6Al-4V sobre a integridade superficial.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Estudo das propriedades das ligas de titânio;
- Definir os parâmetros de usinagem segundo bibliografias;
- Realizar a usinagem no material;
- Examinar estratégias de resfriamento no processamento de materiais;

- Verificar a qualidade da superfície por rugosidade;
- Desenvolvimento de modelos analíticos para descrever a rugosidade;
- Fornecer as recomendações dos parâmetros de corte a serem utilizados para minimizar a rugosidade, dentro da faixa estudada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta fundamentação teórica apresenta uma breve revisão sobre as ligas de titânio, dando especial atenção ao Ti-6Al-4V. As propriedades mecânicas e térmicas foram destacadas, enquanto no que diz respeito à aplicação a ênfase foi dada aos campos aeroespacial. Além de destacar tópicos sobre usinabilidade da liga de Ti-6Al-4V, ferramentas de corte, métodos de resfriamento por lubrificação, mecanismos de desgaste e integridade superficial. Por fim, é revisado a metodologia *design of experiments*.

2.1 USINAGEM

Existem muitos fatores relacionados ao planejamento do processo para as operações de usinagem. Esses fatores podem ser classificados como: tipo de operações de usinagem (torneamento, faceamento, fresamento, entre outros), parâmetros de máquinas-ferramentas (rigidez, potência, entre outros), parâmetros das ferramentas de corte (material, geometria, entre outros), parâmetros das condições de corte (velocidade de corte, taxa de avanço, profundidade de corte, tipo de lubrificação), características das peças de trabalho, por exemplo o material, geometria, entre outros (ARROZOLA et al, 2013).

2.2 TORNEAMENTO

O torneamento gera formas axialmente simétricas com uma ferramenta de corte (SINGH; DUBEY; SHARMA, 2023). Uma ferramenta de ponta remove material por meio de uma aresta de corte. Na maioria dos casos, a ferramenta é mantida em uma posição fixa com a peça de trabalho girando em torno de um eixo de rotação (SHIVADE et al, 2014). Há também ferramentas mantidas na linha central do fuso (brocas, alargadores, machos) para aplicações de furação que possuem limitações de velocidade e avanço (DAVIM, 2011).

A ferramenta de corte se move ao longo de dois eixos de movimento, produzindo assim profundidades e diâmetros precisos. O torneamento é feito na

superfície interna ou externa do cilindro para produzir componentes tubulares em várias medidas (FERRARESI, 2018).

Este processo pode ser feito manualmente, em uma máquina tradicional de torneamento, que frequentemente requer supervisão contínua do operador, ou usando um torno controlado por computador e automatizado, que possui uma maior autonomia. Como resultado das demandas de produção de peças torneadas, tornos controlados numericamente com altas taxas de produção estão sendo cada vez mais usados hoje para a fabricação de peças de tamanho pequeno e médio (DAVIM, 2011). Essas máquinas se distinguem por sua capacidade de alterar automaticamente a velocidade de corte, as taxas de avanço, a direção do avanço e as ferramentas de corte.

2.3 VELOCIDADE (v_c)

Velocidade de corte de uma ferramenta é a velocidade na qual o metal é removido pela ferramenta do material de trabalho (COPPINI; DINIZ; MARCONDES, 2000). Em um torno é a velocidade periférica da peça em m/min.

$$v_c = \frac{\pi * D * n}{1000} \text{ (m/min)} \quad (1)$$

Onde D, n são o diâmetro da peça de trabalho (mm) e a velocidade de corte (rpm) respectivamente. Cada diâmetro diferente em uma peça de trabalho terá uma velocidade de corte diferente, mesmo que a velocidade de rotação permaneça a mesma.

2.4 AVANÇO (f)

O avanço da ferramenta de corte no torno mecânico é a distância que a ferramenta avança para cada volta da peça de trabalho em mm (FERRARESI, 2018).

2.5 PROFUNDIDADE DE CORTE (a)

A profundidade de corte é a espessura, em milímetros, da camada a ser removida da peça de trabalho ou a distância da superfície não cortada da peça de trabalho à superfície cortada é expressa em mm (DAVIM, 2011). É importante

observar, porém, que o diâmetro da peça de trabalho é reduzido em duas vezes a profundidade de corte porque essa camada está sendo removida de ambos os lados.

$$a = \frac{D - d}{2} \quad (2)$$

Onde, a é profundidade de corte em mm, D é diâmetro inicial da peça de trabalho e d é diâmetro final da peça de trabalho.

2.6 FLUIDO DE CORTE

Nos últimos anos, novas formulações de fluidos de corte surgiram não apenas como resultado de esforços para melhorar o desempenho na operação de corte, mas também para atender a outros requisitos, resultantes de mudanças nos materiais disponíveis para o fornecedor e limitações no uso de ingredientes específicos (SHARMA; DOGRA; SURI, 2009). Estas limitações surgiram de várias formas: pela escassez de alguns materiais tradicionais; os custos crescentes de materiais, especialmente derivados de petróleo; ênfase na eliminação de riscos à saúde, evitando materiais suspeitos; e a necessidade de usar materiais que possam ser prontamente descartados (TANG et al, 2022). Assim, as pressões se combinaram para tornar a introdução de novos fluidos uma proposta atraente e, conseqüentemente, o usuário foi apresentado a uma escolha mais complexa entre uma ampla variedade de fluidos. Portanto, é ainda mais importante que os usuários de fluidos de corte tenham algum conhecimento básico dos vários tipos disponíveis, sua aplicação e suas características. Segundo Gale e Totemeier (2003), Singh et al (2021) e Yang et al (2023), existem os quatro principais tipos de fluidos de corte disponíveis hoje:

- Óleos de corte reto: estes são materiais à base de óleo, que geralmente contêm o que chamamos de aditivos de extrema pressão. Esses aditivos reagem sob pressão e calor para dar ao óleo melhores características lubrificantes. Esses óleos de corte são usados com mais frequência sem diluição. Ocasionalmente, eles são diluídos com óleo mineral, querosene ou óleo de vedação mineral para reduzir a viscosidade ou o custo. Eles não se misturam com água e não formam uma emulsão com água. As vantagens dos óleos de corte reto são qualidades antiaderentes eficazes,

boa proteção contra ferrugem e corrosão e estabilidade. As desvantagens são: resfriamento ruim, formação de névoa e fumaça em altas velocidades de corte, alto custo inicial e de descarte. Os óleos retos têm melhor desempenho em operações de usinagem pesada e operações de retificação muito críticas, onde a lubricidade é muito importante. Os óleos diretos não funcionam bem em operações de corte de alta velocidade porque não dissipam o calor de forma eficaz.

- Óleos emulsionáveis em água: mais comumente referido como óleos solúveis. Isso, no entanto, é um nome impróprio porque eles não são realmente solúveis em água, mas formam uma emulsão quando adicionados à água. Esses óleos emulsionáveis são concentrados à base de óleo, que contêm emulsificantes que permitem que se misturem com a água. Os óleos emulsionáveis também contêm aditivos semelhantes aos encontrados nos óleos de corte reto para melhorar suas propriedades lubrificantes. Eles contêm inibidores de ferrugem e corrosão. As vantagens dos óleos emulsionáveis em água são: bom resfriamento, baixa viscosidade e não são inflamáveis, tem custo inicial e de descarte relativamente baixo. As desvantagens são: baixa lubricidade, névoa, baixa estabilidade (os componentes têm diferentes níveis de degradação), na produção em massa exigem manutenção diária cara para manter a composição necessária. Os óleos emulsionáveis em água são os fluidos de corte mais populares em uso atualmente. Como combinam as qualidades lubrificantes do óleo com as propriedades de resfriamento da água, podem ser usados em uma ampla gama de operações de usinagem e retificação.
- Fluidos Sintéticos: às vezes chamados de fluidos químicos, esses fluidos sintéticos são concentrados à base de água, que formam uma solução transparente ou translúcida quando adicionados à água. Esses fluidos contêm lubrificantes sintéticos solúveis em água, que lhes conferem as propriedades lubrificantes necessárias. Além disso, esses fluidos sintéticos contêm inibidores de ferrugem e corrosão, biocidas, surfactantes e antiespumantes. As vantagens dos fluidos de corte sintéticos são: baixa viscosidade, boa proteção contra ferrugem, poucos problemas de névoa, não tóxico, não inflamável, boa filtragem com filtros

padrão e são biodegradáveis. As desvantagens são: lubrificação insuficiente para aplicações pesadas, reação com peças não metálicas, resíduo é frequentemente um problema. Os fluidos sintéticos apresentam menos problemas de descarte do que os óleos emulsionáveis.

- Fluidos semissintéticos: são fluidos sintéticos, que possuem até 25% de óleo adicionado ao concentrado. Quando diluídos em água, formam uma emulsão muito fina que se parece muito com uma solução, mas na verdade é uma emulsão. O óleo é adicionado para melhorar a lubrificação.

Os fluidos de corte são usados para melhorar a eficiência das operações de corte de metal, conforme medida em termos de aumento da vida útil da ferramenta ou melhor acabamento superficial (YANG et al, 2023). Também pode haver uma redução nas forças de corte e, portanto, a potência necessária pode ser menor (SHARMA; DOGRA; SURI, 2009). Os benefícios dessas melhorias na eficiência podem ser aceitos pelo que são, ou pode-se aproveitar a oportunidade de usar velocidades de corte e avanços mais altos, mantendo a vida útil da ferramenta e o acabamento superficial aceitáveis (SILVA; WALLBANK, 1999). Conforme Ashmawy; Elsheikh e Elkassas (2023), Kui et al (2022) e Singh et al (2021), o Quadro 1 mostra as principais técnicas de refrigeração utilizadas na usinagem e o corte a seco.

Quadro 1 - Resumo das principais técnicas empregadas para melhoria do processo de corte

| Técnica | Descrição |
|----------------------------|--|
| Corte a seco | O corte a seco minimiza a poluição ambiental, o risco à saúde do operador da máquina e o choque térmico no corte interrompido. Mas a ausência de fluidos de corte causa mais limitação na velocidade de corte e pode resultar em alta temperatura de corte, rápido desgaste da ferramenta e degradação da integridade da superfície da peça de trabalho. |
| Resfriamento por inundação | Com este método, a refrigeração é fornecida com uma bomba que inunda a área de corte geral. O fluido de corte pode sair de um bocal na forma de jato líquido para imergir toda a zona de corte. Requer uma grande quantidade de fluido de corte para inundar |

| | |
|--------------------------------|--|
| | completamente toda a zona de corte. Portanto, a taxa de descarga de líquido é alta. É capaz de absorver mais calor da zona de usinagem. |
| Quantidade mínima lubrificação | Essa técnica se baseia em direcionar uma pequena quantidade de água e óleo solúvel para a aresta de corte, o que permite reduzir a temperatura, a rugosidade da superfície e o custo. A desvantagem desta técnica inclui riscos à saúde como resultado da geração de névoa. O uso de óleos vegetais é melhor do que óleos minerais em termos de custo, saúde, segurança e meio ambiente. |
| Ar frio | O método de ar frio usa gás refrigerado comprimido com pequena quantidade de óleo, que é direcionado para a zona de corte. Misturar ar com óleo dá melhor desempenho. |
| Lubrificantes sólidos | Na forma de pó seco, o grafite e o dissulfeto de molibdênio são os materiais mais comumente usados como lubrificantes sólidos. O desempenho dos lubrificantes sólidos é melhor em velocidades de corte mais altas. |

2.6.1 Funções dos fluidos de corte

Os fluidos de corte consistem nos líquidos e gases que são aplicados na região de corte para facilitar a operação de corte. Vastas quantidades são usadas para atingir uma série de objetivos (KUCHARIKOVA et al, 2009; TANG et al, 2022). Alguns desses objetivos ou funções são descritas a seguir:

- Para evitar o superaquecimento da ferramenta, ou seja, para que nenhuma temperatura seja atingida onde a dureza da ferramenta e a resistência à abrasão são reduzidas, diminuindo assim a vida útil da ferramenta.
- Manter a peça resfriada, evitando usinagens que resultem em dimensões finais imprecisas.

- Reduzir o consumo de energia, o desgaste da ferramenta e a geração de calor, afetando o processo de corte.
- Proporcionar um bom acabamento superficial no processo de fabricação. Por exemplo, segundo Carou et al (2017) para aplicações aeroespaciais, a faixa típica de valores de R_a é 0,8-1,6 μm , ou seja, dentro da classe N7. Portanto, etum bom acabamento para o material em aplicação aeroespacial se encontra nessa faixa.
- Para ajudar a fornecer uma formação de cavacos satisfatória (relacionada ao comprimento do contato).
- Para lavar os cavacos e limpar as limalhas da área de corte.
- Para evitar a corrosão do trabalho, da ferramenta e da máquina.

Conforme Coppini; Diniz e Marcondes (2000), as propriedades desejáveis dos fluidos de corte em geral são:

- Alta condutividade térmica para resfriamento.
- Boas qualidades lubrificantes.
- Não deve acarretar risco de incêndio.
- Não deve produzir um precipitado sólido em temperaturas normais de trabalho.
- Seja estável contra a oxidação.
- Não deve promover corrosão ou descoloração do material de trabalho.
- Deve fornecer alguma proteção contra corrosão para superfícies recém-formadas.
- Nenhum odor desagradável deve se desenvolver com o uso contínuo.
- Não deve causar irritação ou contaminação da pele.
- Uma viscosidade que permita o fluxo livre do trabalho.

2.7 FERRAMENTA DE CORTE

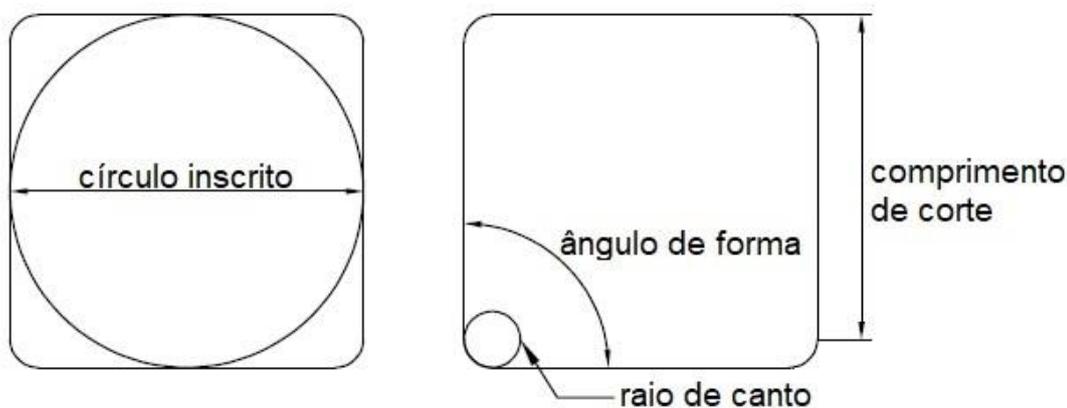
Hoje as ferramentas de corte desempenham um papel importante na taxa de produção e na qualidade do produto (O'SULLIVAN; COTTERELL, 2001). Diferentes tipos foram usados em aplicações industriais para usinagem de materiais. Os pré-requisitos de qualquer material de ferramenta de corte são alta dureza e tenacidade a quente, boa resistência ao desgaste, alta resistência

mecânica e ao choque térmico e a capacidade de manter essas propriedades na temperatura de corte (FERRARESI, 2018). Alta dureza confere boa resistência ao desgaste da ferramenta (COPPINI; DINIZ; MARCONDES, 2000). A resistência ao choque térmico requer que o material da ferramenta tenha alta condutividade térmica e alto calor específico, e um baixo valor de coeficiente de expansão térmica (GRIGORIEV; FEDOROV; HAMDY, 2019). A temperatura durante o corte é consideravelmente mais alta que a temperatura ambiente e varia com a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte.

As ferramentas de corte para corte de metais têm muitas formas, cada uma delas descrita por seus ângulos e geometrias. Cada uma dessas formas de ferramenta tem uma finalidade específica na usinagem. O principal objetivo da usinagem é obter a separação mais eficiente dos cavacos da peça de trabalho (COPPINI; DINIZ; MARCONDES, 2000). Por esta razão, a seleção da geometria correta da ferramenta de corte é crítica. Segundo O'Sullivan e Cotterell (2001), outras influências na formação de cavacos incluem: o material da peça de trabalho, o material da ferramenta de corte, a potência da máquina e várias condições de processo (como calor e vibração).

A maior parte do torneamento é feita com ferramenta de metal duro intercambiáveis revestidos, mas o material da ferramenta também pode ser aço rápido, cerâmica, nitretos cúbicos de boro ou diamante policristalino (RIZZO et al, 2020). A geometria de uma pastilha inclui: a forma básica da ferramenta, seu alívio ou ângulo de incidência, o círculo inscrito da ferramenta ou tamanho IC, comprimento de corte e o raio da ponta da pastilha (Figura 1).

Figura 1 - Geometria da ferramenta de corte utilizada nesta pesquisa



Fonte: O autor (2023).

2.7.1 Desgaste da ferramenta

O desgaste da ferramenta pode ser definido como a mudança na forma de uma ferramenta de sua forma original durante a operação de corte, como resultado da perda gradual de material da ferramenta, assim, chamada desgaste da ferramenta (CHOWDHURY, 2016). Quando uma ferramenta é usada por algum tempo, o desgaste torna-se aparente. Durante o corte, a ferramenta deve funcionar satisfatoriamente. Desempenho insatisfatório da ferramenta de corte indica falha da ferramenta (KUANG et al, 2022).

Conforme Baralić; Mitrović e Radović (2022), o desgaste da ferramenta depende dos seguintes parâmetros:

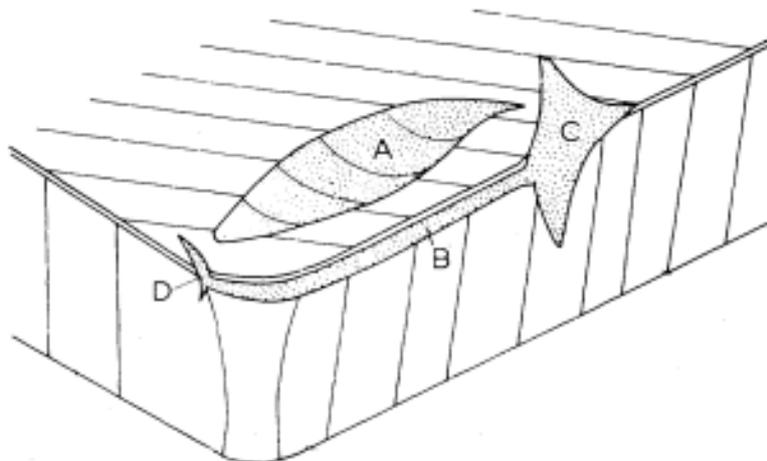
- Material da ferramenta e da peça.
- Forma da ferramenta.
- Velocidade de corte.
- Avanço e profundidade de corte.
- Fluido de corte usado.
- Características da máquina-ferramenta, etc.

As seguintes desvantagens são observadas quando ocorre falha da ferramenta (YEMUL et al, 2021).

- As ferramentas param de produzir a peça de acordo com as dimensões exigidas.
- As ferramentas superaqueceram.
- Observa-se rugosidade superficial excessiva.
- A falha da ferramenta aumenta as forças de corte e, portanto, o requisito de energia será maior.
- Pode causar quebra de ferramentas.

O desgaste gradual da ferramenta pode ser classificado nos seguintes tipos: desgaste de flanco, desgaste da cratera e desgaste do entalhe (COPPINI; DINIZ; MARCONDES, 2000). Na Figura 2, a zona A representa o desgaste de cratera, a zona B o desgaste de flanco, a zona C e D de desgaste tipo entalhe.

Figura 2 - Principais formas de desgaste na ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de Machado et al (2015).

O desgaste de flanco é uma forma de desgaste que aparece na face de flanco (alívio ou folga) abaixo da aresta de corte da ferramenta. É causada por uma abrasão entre o flanco da ferramenta e a superfície da peça recém-usinada (CHOWDHURY, 2016). O desgaste de flanco será maior perto da ponta da ferramenta e não é uniforme ao longo da aresta de corte. Geralmente resulta de altas temperaturas, que afetam a ferramenta e a peça de trabalho (KUMAR et al, 2015). Este tipo de desgaste ocorre em todas as ferramentas ao cortar qualquer tipo de material de trabalho.

O desgaste na face de saída da ferramenta é chamado de desgaste de cratera. Neste desgaste, os cavacos corroem a face de saída da ferramenta (CHOWDHURY, 2016). O fluxo de cavacos pela face de saída desenvolve um atrito severo entre o cavaco e a face de saída. O desgaste da cratera pode aumentar o ângulo de saída de trabalho e reduzir a força de corte, mas também enfraquecerá a resistência da aresta de corte (QEHAJA; KYÇYKU; ZHUJANI, 2017).

O desgaste tipo entalhe é causado pelo atrito da ferramenta contra a superfície de trabalho original, que é mais dura do que a usinada (QEHAJA; KYÇYKU; ZHUJANI, 2017).

Conforme Chowdhury (2016) e Kovaříková et al (2009), esses tipos de mecanismos de desgaste de ferramentas ocorrem devido aos seguintes motivos:

- Abrasão: o desgaste por abrasão ocorre quando há abrasão mecânica entre o material da peça de trabalho e a ferramenta de corte. Nesse

desgaste, partículas duras na parte inferior do cavaco passam sobre a face da ferramenta. A ação abrasiva ocorre tanto no desgaste de flanco quanto no desgaste de cratera. É uma causa significativa de desgaste de flanco.

- Adesão: como parte do mecanismo de fricção, são formadas junções entre o cavaco e o material da ferramenta. Quando essas junções são fraturadas, pequenos fragmentos de material da ferramenta podem ser arrancados e movidos sob o cavaco ou para a nova superfície da peça de trabalho.
- Desgaste por Difusão: esse tipo de desgaste ocorre devido ao processo de difusão onde os átomos de uma rede cristalina metálica se movem da região de alta concentração atômica para a região de baixa concentração. Durante o corte de metal, quando a temperatura é alta na interface da ferramenta e da peça de trabalho, os átomos se movem do material da ferramenta para os materiais da peça de trabalho, enfraquecendo assim a estrutura da ferramenta.
- Interação Química: isso ocorre devido à afinidade química entre o material da peça de trabalho e o material da ferramenta de corte.
- Oxidação: a oxidação é o resultado de uma reação química entre a face da ferramenta e o oxigênio.
- Deformação plástica: É causada por uma perda de dureza, gerada no ponto de corte. A ação combinada da força de corte e da temperatura de corte fará com que a ferramenta se deforme.

2.7.2 Vida da ferramenta

Para ferramenta que não executa mais a função desejada pode ser declarada que chegou ao fim de sua vida útil. Nesse ponto, a ferramenta não é necessariamente incapaz de cortar a peça de trabalho, mas é meramente insatisfatória (pode não fornecer o acabamento superficial desejado ou as tolerâncias dimensionais) para a finalidade exigida (FERRARESI, 2018). A ferramenta, portanto, deve ser reafiada para reutilização, ou pode ser usada para

operações de usinagem menos exigentes, ou descartada (COPPINI; DINIZ; MARCONDES, 2000).

A vida útil da ferramenta geralmente é expressa em termos de tempo desde o início de um corte até algum ponto final definido pelo critério de falha (FERRARESI, 2018). A vida útil da ferramenta também é especificada de outras formas como: tempo real de corte até a falha (no corte contínuo) ou tempo total até a falha (no corte intermitente), volume de material removido até a falha, número de componentes idênticos produzido até a falha ou integridade superficial maior que a estabelecida no projeto (COPPINI; DINIZ; MARCONDES, 2000).

No entanto, o critério de falha da ferramenta a ser usado depende dos requisitos do componente que está sendo produzido (IQBAL et al, 2022). Por exemplo, em operações de desbaste, um aumento percentual na força de corte pode ser considerado como critério de falha, enquanto nas operações de acabamento, a deterioração no acabamento superficial e a precisão dimensional podem ser consideradas como critérios de falha. Entretanto, segundo Ferraresi (2018), não se deve permitir que a ferramenta sofra falha total em operações de desbaste para evitar possíveis danos ao componente e/ou perda total da ferramenta de corte.

Conforme (TAYLOR, 1906), o autor fez exaustivos experimentos de corte de metal por muitos anos e, com base nas observações experimentais, ele propôs uma equação de vida útil da ferramenta (a equação de vida útil da ferramenta de Taylor):

$$v * T^n = C_t \quad (3)$$

Onde, v é a velocidade de corte, T é a vida útil da ferramenta (minutos), n é um expoente para as condições testadas, e C_t é uma constante de Taylor para as variáveis não contabilizadas.

2.8 USINABILIDADE

Usinabilidade é o termo frequentemente usado, mas raramente bem definido porque é de natureza qualitativa. A vida útil da ferramenta refere-se à ferramenta de corte, enquanto a usinabilidade se preocupa principalmente com a peça de trabalho, no entanto, a ferramenta e a combinação de trabalho

influenciam ambos (COPPINI; DINIZ; MARCONDES, 2000). A vida útil da ferramenta é muitas vezes tomada como um parâmetro para comparar a usinabilidade de diferentes materiais de trabalho.

A usinabilidade pode ser definida como a facilidade com que um determinado material pode ser trabalhado com uma determinada ferramenta de corte (GALE; TOTEMEIER, 2003). A usinabilidade depende das condições de corte e propriedades do material de trabalho (por exemplo, propriedades físicas mecânicas, metalúrgicas e químicas). Conforme Ferraresi (2018), a usinabilidade pode ser julgada pela vida útil da ferramenta, forças de corte, acabamento superficial, temperatura da ferramenta, etc. Diz-se que um material tem boa usinabilidade se o desgaste da ferramenta for baixo (ou a vida útil da ferramenta for alta), o acabamento da superfície produzida for bom, forças ou potência de corte requisitos são baixos, etc.

2.9 RUGOSIDADE

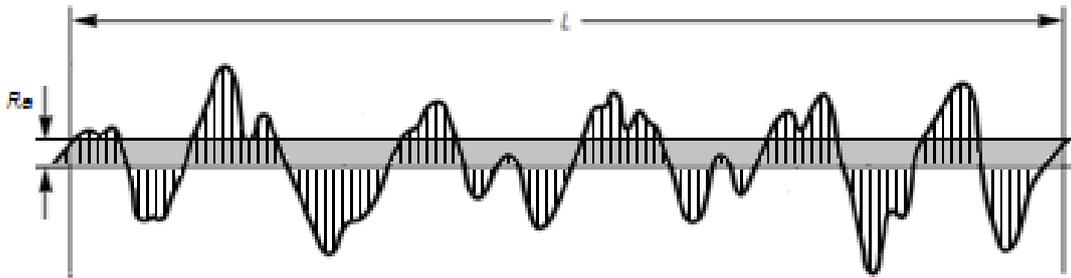
A rugosidade da superfície são as irregularidades da superfície em distâncias pequenas de uma determinada peça. Quantificar as irregularidades da superfície significa avaliá-las categorizando-as por altura, profundidade e intervalo. As rugosidades são então analisadas por um método predeterminado e calculadas de acordo com os padrões de quantidades industriais (FARKAS; DRÉGELYI-KISS, 2018). A forma e o tamanho das irregularidades da superfície e a forma como o produto acabado será utilizado determinam se a rugosidade da superfície atua de forma favorável ou desfavorável (GADELMAWLA et al, 2002). Por exemplo, as superfícies pintadas devem ser fáceis para a tinta aderir, enquanto as superfícies de acionamento devem girar facilmente e resistir ao desgaste. É importante gerenciar a rugosidade da superfície para que seja adequada para o componente em termos de qualidade e desempenho.

2.9.1 Rugosidade Média (Ra)

Ra é o parâmetro internacional de rugosidade universalmente reconhecido e mais utilizado. Segundo Krishnan (2020), o parâmetro Rugosidade média aritmética (Ra) especifica a média aritmética dos valores

absolutos de todas as variações no perfil de rugosidade da linha central sobre a distância total, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Perfil da rugosidade superficial e cálculo do Ra



Fonte: Adaptado de Gadelmawla et al (2002).

Analiticamente, Ra é dado pela seguinte equação, onde $y(x)$ é a função de altura do perfil usada para representar os desvios ponto a ponto entre o perfil medido e a linha média de referência. E L é o comprimento total de amostragem.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (4)$$

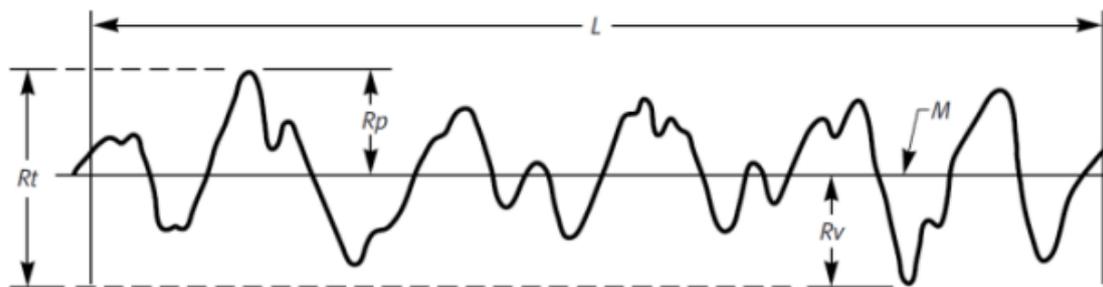
2.9.2 Rugosidade da raiz quadrada média (Rq)

Rq é a média quadrática média dos desvios de altura do perfil obtidos dentro do comprimento de avaliação e medidos a partir da linha média (KRISHNAN, 2020). Analiticamente, é dado pela seguinte equação 5:

$$R_q = \left[\frac{1}{L} \int_0^L (y(x))^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

2.9.3 Altura Máxima do Pico do Perfil (Rp)

Segundo Krishnan (2020), Rp é a distância entre o ponto mais alto do perfil e a linha média dentro de um comprimento de amostragem (Figura 4).

Figura 4 - Perfil da rugosidade superficial e cálculo do R_p 

Fonte: Adaptado de Gadelmawla et al (2002).

2.9.4 Profundidade Máxima do Vale (R_v)

Conforme Krishnan (2020), R_v é a distância entre o ponto mais baixo do perfil e a linha média dentro de um comprimento de amostragem (Figura 4).

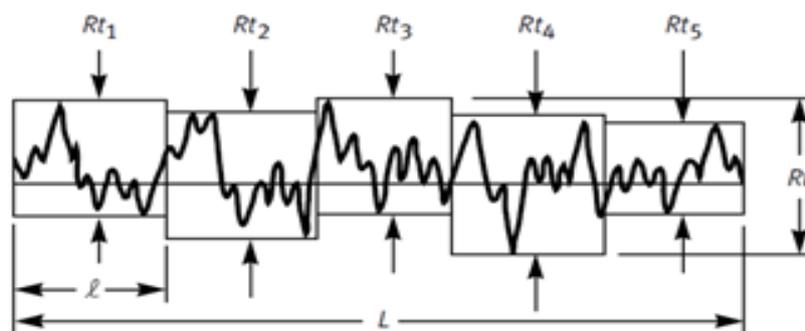
2.9.5 Altura Máxima do Perfil (R_t)

É a distância vertical entre os pontos mais altos e mais baixos do perfil dentro do comprimento de avaliação (KRISHNAN, 2020). Analiticamente, é dado pela equação 5.

$$R_t = R_p + R_v \quad (6)$$

2.9.6 Profundidade Média de Rugosidade (R_z)

R_z é a média aritmética da distância entre o máximo global e o mínimo em cinco seções iguais do comprimento total de avaliação (FARKAS; DRÉGELYI-KISS, 2018). Conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Perfil da rugosidade superficial e cálculo do R_z 

Fonte: Adaptado de Gadelmawla et al (2002).

R_z é o segundo parâmetro mais comumente especificado. É dado pela equação 7.

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ti} \quad (7)$$

2.9.7 Medição da rugosidade

Na medição da rugosidade é necessário analisar o comprimento de amostragem (*cut-off*) a ser utilizado. Conforme a ISO 4288, na Tabela 1 são recomendados os valores para os comprimentos de amostragem.

Tabela 1 - Comprimento de amostragem *cut-off*

| Rugosidade R_a (μm) | Mínimo <i>cut-off</i> (mm) |
|------------------------------------|----------------------------|
| De 0 até 0,1 | 0,25 |
| Maior que 0,1 até 2,0 | 0,80 |
| Maior que 2,0 até 10,0 | 2,50 |
| Maior que 10,0 | 8,00 |

Fonte: ISO 4288.

2.10 TITÂNIO

O titânio é o nono elemento mais abundante que existe na terra. Depois de alumínio (Al), ferro (Fe) e magnésio (Mg) é considerado o quarto material estrutural mais abundante (WILLIAMS; LUTJERING, 2007). O número atômico e o peso atômico deste material são 22 e 47,90, respectivamente. A densidade do titânio é baixa, é cerca de 60% da do aço e também menor que as superligas, mas em contraste, o ponto de fusão do titânio (1670°C) é maior que o do aço, ou seja, quase 200°C acima do aço e mais de 1000°C acima do alumínio (BATHINI et al, 2010; FROES, 2015; ZHANG; CHEN; WANG, 2020). O titânio é considerado um material não magnético com baixa transferência de calor, conforme a

Tabela 2 - O coeficiente de expansão térmica do titânio é menor que o do aço (LIU; CHU; DING, 2004). O titânio não é um bom condutor de eletricidade. Se a condutividade do cobre for tomada como 100%, o titânio tem 3,1% (FROES, 2015).

Tabela 2 - Características de algumas ligas metálicas

| Propriedade | Ti | Al | Fe | Ni |
|--------------------------------|-------|---------|-------|-------|
| Densidade (g/cm ³) | 4,5 | 2,7 | 7,9 | 8,9 |
| Ponto de fusão (°C) | 1670 | 660 | 1538 | 1455 |
| Condutividade térmica (W/mK) | 15-22 | 221-247 | 68-80 | 72-92 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 115 | 72 | 215 | 200 |
| Resistência à corrosão | Alto | Alto | Baixo | Médio |
| Preço do metal | Alto | Médio | Baixo | Alto |

Fonte: Adaptado de Williams e Lutjering (2007).

Porém, o custo do titânio é cerca de quatro vezes maior que o do aço, portanto, a escolha do material de titânio deve ser justificada de acordo com suas aplicações. De acordo com as características deste material, existem duas áreas diversas de aplicações onde a resistência mecânica ou resistência à corrosão são de grande importância (ZHANG; CHEN; WANG, 2020). Com base nessas duas diversas aplicações, diferentes ligas de titânio podem ser usadas para atender aos requisitos da aplicação. Para aplicações de alto desempenho, como estruturas de aeronaves, implantes biomédicos, turbinas a gás, e alguns outros, são necessárias ligas de titânio de maior resistência (ZHANG; CHEN; WANG, 2020). Em contraste, titânio puro de menor resistência é necessário para aplicações resistentes à corrosão, como trocadores de calor, vasos de reatores e usinas de geração de energia (PIMENOV et al, 2021).

2.11 METALURGIA DO TITÂNIO

O titânio é um elemento alotrópico, ou seja, é formado por duas estruturas cristalinas elementares (BOYER, 2010). Geralmente, à temperatura ambiente, o titânio tem uma estrutura cristalina hexagonal compacta (HC), mas quando a temperatura está acima de $882\pm 2^{\circ}\text{C}$, que é conhecida como temperatura β transição, a estrutura é alterada para cúbico de corpo centrado (CCC) (CHOWDHURY, 2016). A aparência de dois tipos de estruturas cristalinas de titânio é mostrada na Figura 6.

Figura 6 - Transformação da fase α para fase β do titânio a 882°C

Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

Em geral, a estrutura cristalina HC é conhecida como fase alfa (α) e a estrutura cristalina CCC é conhecida como fase beta (β). As ligas de titânio podem ser classificadas em: fases α , perto de ligas α , α - β e β , dependendo das composições da liga, que podem ser consideradas como estabilizadores α ou estabilizadores β (BOYER, 2010). A Tabela 3 apresenta, para cada categoria, exemplos de materiais específicos com designação de acordo com suas composições químicas. A temperatura β transição é muito importante, pois as condições de processamento e tratamento térmico são baseadas nessa temperatura. No entanto, a temperatura β transição do titânio pode ser alterada pela adição de elementos de liga. Os elementos de liga que diminuem a temperatura β transição são referidos como estabilizadores α e aqueles que aumentam a temperatura β transição são referidos como estabilizadores β (FROES, 2015).

Tabela 3 - Exemplos de ligas das categorias do titânio

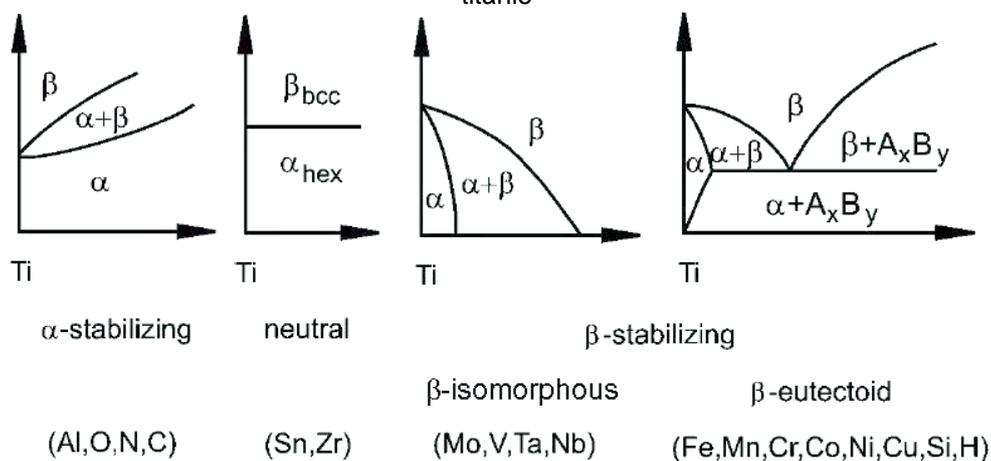
| Categoria | Materiais selecionados | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| CP-Ti | CP-Ti (0,2Fe, 0,18O) | CP-Ti (0,3Fe, 0,25O) | CP-Ti (0,3Fe, 0,35O) | CP-Ti (0,5Fe, 0,40O) |
| Liga α | Ti-5Al-2,5Sn | Ti-3Al-2,5V | Ti-2Cu | Ti-0,3Mo- 0,8Ni |
| Perto de ligas α | Ti-5Al-6Sn- 2Zr- 1Mo- 0,2Si | Ti-2Al-2Sn- 4Zr-2Mo | Ti-8Al-1Mo- 1V | - |

| | | | | |
|-------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|---|
| Liga α - β | Ti-6Al-4V | Ti-6Al-4V- 2Sn | Ti-6Al-2Sn- 4Zr-6Mo | - |
| Liga β | Ti-13V-11Cr- 3Al | Ti-11,5Mo- 6Zr-4,5Sn | Ti-13V-11Cr- 3Al | - |

Fonte: Adaptado de Froes (2015).

Geralmente, elementos como alumínio, nitrogênio e oxigênio são conhecidos como estabilizadores α , pois aumentam a temperatura na qual a fase α é estável (Figura 7). Ao contrário, vanádio, molibdênio e nióbio são conhecidos como estabilizadores β , pois contribuem para a estabilidade da fase β em temperaturas mais baixas (ZHANG; CHEN; WANG, 2020). Existem dois tipos de β -estabilizadores, que diminuem a temperatura de transição. Eles são: β -isomorfos e β -eutetóides (LIU; CHU; DING, 2004). Em estabilizadores β -isomórficos, vanádio e molibdênio têm a mesma solubilidade em β -titânio. No β -eutetóide, cobre e silício formam compostos intersticiais com a fase β e, portanto, têm solubilidade limitada em titânio (FROES, 2015). A microestrutura da peça final que se refere às fases e estruturas de grãos é diretamente dependente das classificações acima mencionadas.

Figura 7 - Ilustração da influência dos elementos de liga na mudança de fase nas ligas de titânio



Fonte: Williams e Lutjering (2007).

A quantidade relativa de fases alfa e beta em qualquer liga em particular tem um efeito significativo nas propriedades desse material em termos de resistência à tração, dureza, propriedades de fluência, ductilidade, soldabilidade e facilidade de conformação. Algumas propriedades das diversas ligas de titânio são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do titânio e suas ligas

| Composição química | Dureza (HV) | Limite de elasticidade (MPa) | Resistência à tração (MPa) | Módulo de elasticidade (GPa) | Temperatura de β transição ($^{\circ}\text{C}$) |
|---------------------|-------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|---|
| 99.98 Ti | 100 | 140 | 235 | 100-145 | 882 |
| CP-Ti (0,5Fe-0,40O) | 260 | 480-655 | >550 | 100-120 | 950 |
| Ti-5Al-2,5Sn | 300 | 827 | 861 | 109 | 1040 |
| Ti-6Al-4V | 300-400 | 800-1100 | 900-1200 | 110-140 | 995 |
| Ti-6Al-6V-2Sn | 300-400 | 950-1050 | 1000-1100 | 110-117 | 945 |
| Ti-10V-2Fe-3Al | 300-470 | 1000-1200 | 1000-1400 | 110 | 800 |

Fonte: Adaptado de Froes (2015).

2.11.1 Alfa (α) Ligas

Essas ligas contêm grandes quantidades de estabilizadores α e baixas concentrações de estabilizadores β . Geralmente, o titânio puro e suas ligas com elementos metálicos não transicionais, como alumínio, oxigênio, estanho, entre outros, são classificados como ligas α (ZHANG; CHEN; WANG, 2020). Ter alta resistência à fluência, alta densidade, ductilidade reduzida e tenacidade especialmente em temperaturas criogênicas são as principais características dessas ligas (LOPES, 2009).

2.11.2 Ligas quase alfa (α)

As ligas quase alfa consistem em grandes quantidades de estabilizadores α e mais concentrações de estabilizadores β em comparação com as ligas α . A principal vantagem dessas ligas é que elas são tratáveis termicamente. A recristalização por recozimento e trabalho a frio provoca alterações na estrutura do grão. A alteração na temperatura máxima de tratamento da solução e nas taxas de resfriamento alteram a microestrutura da peça (LOPES, 2009). Ti-8Al-1Mo-1V é um exemplo de liga de titânio que pode ser classificada como liga

quase alfa (CHOWDHURY, 2016). Vale ressaltar que a resistência à corrosão dessas ligas é menor que a das ligas α .

2.11.3 Beta (β) Ligas

Essas ligas contêm grandes quantidades de estabilizadores β e baixas concentrações de estabilizadores α . Geralmente, ligas de titânio com elementos metálicos de transição, como nióbio, vanádio e molibdênio são classificadas como ligas β . As ligas β apresentam menor resistência à corrosão e ductilidade com maior resistência em comparação com as ligas α (CHOWDHURY, 2016). A característica importante dessas ligas é sua excelente capacidade de forjamento. As outras vantagens dessas ligas são alta temperabilidade e excelente conformabilidade a frio na condição de solução tratada. As desvantagens dessas ligas em comparação com as ligas α - β são sua menor resistência à fluência, maior densidade e menor ductilidade na condição envelhecida. Geralmente, essas ligas são usadas para aplicações de temperatura moderada (LEYENS; PETERS, 2006). Ti-10V-2Fe-3Al é um exemplo de ligas.

2.11.4 Ligas Alfa-Beta (α - β)

Essas ligas contêm uma combinação de um ou mais estabilizadores α , como alumínio, e um ou mais estabilizadores β , como molibdênio ou vanádio. A liga de titânio mais conhecida e atualmente mais utilizada, Ti-6Al-4V, que é utilizada nesta pesquisa, está categorizada neste grupo. Em comparação com o aço essa liga possui uma ótima resistência mecânica, baixa densidade, resistência à corrosão e boa ductilidade, combinadas com aceitáveis tenacidade à fratura, resistência à fluência e boa soldabilidade, tornam o material atraente a aplicações estruturais em condições extremas de força (LOPES, 2009).

2.11.5 Titânio comercialmente puro (CP-Ti)

Titânio comercialmente puro (CP-Ti) contém titânio elementar mais alguma quantidade de impurezas, como nitrogênio (N), hidrogênio (H), oxigênio

(O) e ferro (Fe). Os materiais CP-Ti contêm essencialmente fase α e são divididos em vários graus. A resistência aumenta com o aumento da quantidade dos elementos O e Fe (TEKIN; ERTAN; ÖZGÜL, 2022).

2.12 APLICAÇÃO DO TITÂNIO NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL

O setor aeroespacial tem sido o principal campo de aplicação de ligas de titânio, particularmente nos sistemas de motores e fuselagem (BOYER, 1996). Ti-6Al-4V é a liga de titânio mais comum, que pertence à família de ligas $\alpha+\beta$ e representa mais de 50% da produção de ligas de titânio (ARRAZOLA, 2009). Cerca de 70% de todas as solicitações de titânio são para aplicações aeroespaciais e o restante para aplicações industriais (AWOPETU; DAHUNSI; ADEROBA, 2005).

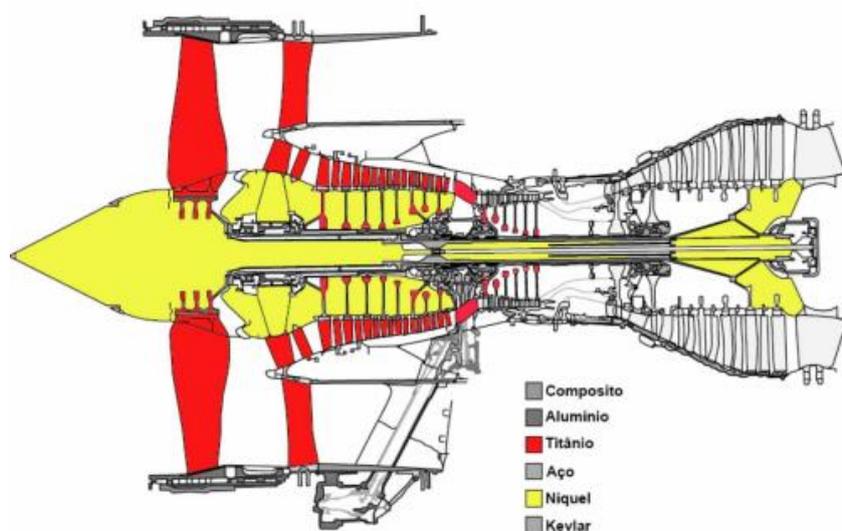
Conforme Khanna e Davim (2015), as principais razões para usar o titânio na indústria aeroespacial são a diminuição do peso (principalmente como substituição do aço), limitação de espaço, temperatura operacional (substituição do Al, Ni e ligas de aço) e resistência a corrosão (substituir aços de baixa liga).

Como a resistência das ligas de titânio é significativamente maior do que as ligas de alumínio, as peças feitas com as primeiras ligas podem ter seção transversal menor, o que resulta em economia de peso (NGUYEN et al, 2017).

As vigas do trem de pouso do Boeing 747 são bons exemplos para ilustrar os problemas de limitação de volume ou espaço e sua solução pela aplicação de ligas de titânio. Na verdade, segundo Polishetty et al (2014), a liga preferencial para esta aplicação em termos de custo é o alumínio 7075, mas o tamanho necessário para suportar as cargas necessárias é excessivo e não cabe no envelope da asa. Assim, as ligas de titânio devem ser a melhor solução.

A Figura 8 ilustra os diferentes materiais usados nos diversos componentes da turbina Trent 800. Pode-se constatar que as ligas de titânio são escolhidas em peças de ventiladores e compressores devido à sua baixa densidade, resistência específica e boa resistência à fadiga. Entretanto, para sistemas de combustão e turbina, são usadas quase exclusivamente superligas à base de níquel.

Figura 8 - Materiais utilizados na turbina Trent 800



Fonte: Adaptado de Reed (2008).

2.13 USINAGEM LIGA DE TITÂNIO

O principal desafio ao usinar o titânio é superar a curta vida útil da ferramenta que normalmente impede que as pessoas usem altas velocidades de corte (KOSEKI et al, 2017). O titânio e suas ligas apresentam baixa usinabilidade devido à sua baixa condutividade térmica, alta reatividade, baixo módulo de elasticidade, alta dureza e resistência em temperatura elevada e características peculiares de encruamento (LIU et al, 2019). O Quadro 2 resume a influência das propriedades do titânio em sua usinabilidade (CHOWDHURY, 2016; FROES, 2015).

Quadro 2 - Resumo sobre a influência das propriedades do titânio em sua usinabilidade

| Propriedades | Descrição |
|-----------------------|---|
| Condutividade térmica | A baixa condutividade térmica causa concentração de calor na aresta de corte e na face da ferramenta, influenciando negativamente na vida útil da ferramenta. |
| Reatividade química | A reatividade com gases comuns como oxigênio, hidrogênio e nitrogênio leva à formação de óxidos, hidretos e nitretos, respectivamente. Essas fases |

| | |
|------------------------|--|
| | causam fragilização e diminuição da resistência à fadiga da liga. |
| | A reatividade com o material da ferramenta de corte causa escoriações, manchas e lascas na superfície da peça de trabalho e rápido desgaste da ferramenta. |
| Módulo de elasticidade | O baixo módulo de elasticidade permite a deflexão de peças finas sob pressão da ferramenta, induzindo vibração e problemas de tolerância. |
| Dureza e força | A resistência a altas temperaturas e a dureza das ligas de titânio requerem altas forças de corte, o que resulta em deformação na ferramenta de corte durante o processo de corte. |

Fonte: Adaptado de Chowdhury (2016) e Froes (2015).

Os principais problemas inerentes ao processo de corte decorrem, entre outros fatores, do excesso de temperatura na interface cavaco-ferramenta. A aplicação de grandes quantidades de fluidos de corte reduz a temperatura de corte, mas resulta em poluição ambiental e problemas de economia de fluidos. A utilização de novas ferramentas de corte feitas de materiais avançados e uma melhor combinação de parâmetros de corte contribuíram para um desenvolvimento significativo, mas limitado, do processo de usinagem, particularmente no caso do titânio e suas ligas (CAROU et al, 2017). Portanto, conforme Zhang; Chen e Wang (2020), os desafios da usinagem de titânio podem ser mitigados por meio de algumas estratégias:

- Seleção do material da ferramenta de corte: materiais de ferramenta de alto desempenho, como metal duro e cerâmica, são frequentemente usados para resistir ao desgaste e suportar altas temperaturas de corte.
- Melhores parâmetros de corte: a taxa de avanço, a velocidade de corte e a profundidade de corte precisam ser cuidadosamente selecionadas para minimizar o calor gerado durante o corte.
- Refrigerantes e lubrificantes: refrigerantes ajudam a reduzir a temperatura de corte e arrastam os cavacos, reduzindo assim o desgaste da ferramenta e melhorando o acabamento superficial.

Assim, técnicas especiais para melhorar a usinabilidade das ligas de titânio têm sido desenvolvidas e testadas por diversos pesquisadores (CAROU et al, 2017; RAMESH; KARUNAMOORTHY; PALANIKUMAR, 2012; UPADHYAY; JAIN; MEHTA, 2013).

2.14 USINAGEM LIGA DE TI-6AL-4V

A liga de Ti-6Al-4V é de difícil corte, devido às suas características peculiares. Altas temperaturas de corte são geradas durante a usinagem desta liga. A maior parte do calor gerado durante a usinagem desta liga de titânio é conduzido para o material da ferramenta devido à baixa condutividade térmica da liga Ti-6Al-4V (CHE-HARON, 2001). Alta reatividade química com quase todos os materiais de ferramentas de corte em temperaturas de corte superiores a 500 C° (GARCÍA-MARTÍNEZ et al, 2019). Baixo módulo de elasticidade que é um parâmetro causador da trepidação durante a usinagem e alta dureza-resistência (alta resistência à deformação) em altas temperaturas.

2.15 DESIGN OF EXPERIMENTS

A metodologia matemática de *design of experiments* (DOE) usada para planejar e conduzir experimentos, bem como analisar e interpretar os dados obtidos dos experimentos. É um ramo da estatística aplicada que é usado para conduzir estudos científicos de um sistema, processo ou produto em que as variáveis de entrada foram manipuladas para investigar seus efeitos na variável de resposta medida. Nas últimas duas décadas, o DOE foi uma ferramenta muito útil tradicionalmente usada para melhoria da qualidade e confiabilidade do produto (ANTONY, 2014). O uso do DOE foi expandido em muitos setores como parte do processo de tomada de decisão, seja ao longo de um novo desenvolvimento de produto, processo de fabricação e melhoria. Não é usado apenas nas áreas de engenharia, tem sido usado em administração, marketing, hospitais, farmacêutico, indústria alimentícia, energia e arquitetura (SHARMA, M.; SHARMA, S.,2021). DOE é aplicável a processos físicos, bem como modelos de simulação de computador (GARUD; KARIMI; KRAFT, 2017).

Segundo Montgomery (2017) e Sharma, M. e Sharma, S. (2021), as etapas e diretrizes práticas gerais para planejar e conduzir o DOE estão listadas abaixo:

1. Declare os objetivos: é uma lista de problemas que serão investigados.
2. Definição da variável de resposta: este é o resultado mensurável do experimento baseado em objetivos definidos.
3. Determinar fatores e níveis: seleção de variáveis independentes (fatores) possuem influência na variável de resposta. Para identificar os fatores que podem afetar a variável de resposta, o diagrama espinha de peixe pode ser usado.
4. Determinar o tipo de projeto experimental: para realizar a análise da função resposta de minimização um planejamento da técnica que será empregada é necessário, assim é possível determinar do número de amostras a ser realizado.
5. Realize experimentos usando a matriz de design.
6. Análise de dados usando métodos estatísticos como regressão e ANOVA.
7. Conclusões e recomendações práticas: incluindo representação gráfica dos resultados e validação dos resultados.

2.15.1 Tipos de fatores

Em um projeto experimental, precisa-se identificar os fatores, níveis e variáveis de resposta. Um fator é a variável de entrada de interesse. Os níveis são o número de variações diferentes que se consideram para cada fator, por exemplo, com três níveis pode-se considerar uma temperatura baixa, média e alta. Uma variável de resposta é a variável de saída de interesse, como a rugosidade superficial (MONTGOMERY, 2017). A construção de projetos e a interpretação de seus resultados dependem muito dos tipos de fatores envolvidos no estudo. Segundo Antony (2014), os tipos de fatores são:

- Fatores contínuos: para um determinado intervalo, qualquer valor no intervalo pode ser escolhido. Alguns exemplos são comprimento de onda, concentração ou temperatura. Valores tomados por fatores contínuos são, portanto, representados por números contínuos.

- Fatores discretos: por outro lado, fatores discretos podem assumir apenas valores particulares. Esses valores não são necessariamente numéricos. A máquina a ser utilizada em um processo (torno convencional, CNC ou fresadora) é um exemplo de fator discreto. Um fator discreto pode assumir valores que são nomes, letras, propriedades ou números. No último caso, o número é realmente apenas um rótulo numérico e não representa uma quantidade numérica. É apenas um nome ou uma referência.
- Fatores ordinais: são fatores discretos que podem ser colocados em uma ordem lógica. Por exemplo, o tamanho pode ser representado como grande, médio ou pequeno. As classificações também são ordinais: primeiro, segundo, terceiro e quarto.
- Fatores booleanos: são fatores discretos que podem assumir apenas dois níveis: alto e baixo, aberto ou fechado, preto e branco, -1 e 1 e assim por diante.

2.15.2 Princípios básicos de projetos experimentais

O objetivo de trabalhar com planejamento de experimentos é aumentar a precisão do experimental. Para aumentar a precisão, tenta-se reduzir o erro. Para reduzir o erro experimental, adota-se algumas técnicas. Essas técnicas formam os princípios básicos de projetos experimentais. Conforme Montgomery (2017), os princípios básicos dos delineamentos experimentais são replicação, randomização e blocagem.

- Randomização: à randomização é um método que protege contra um viés desconhecido que distorce os resultados do experimento. A maioria dos testes estatísticos assume que as observações são independentes. Como na maioria das suposições estatísticas, a independência das observações é um ideal que nunca pode ser alcançado. Uma maneira de ajudar a atingir o objetivo das observações independentes é randomizar, obtendo uma amostra aleatória da população ou atribuindo tratamentos aleatoriamente às unidades experimentais.
- Replicação: a replicação aumenta o tamanho da amostra e é um método para aumentar a precisão do experimento. A replicação aumenta a

relação sinal-ruído quando o ruído se origina de variáveis incontroláveis. Uma réplica é uma repetição completa das mesmas condições experimentais, começando com a configuração inicial.

- Blocação: é uma ferramenta usada quando experimentos devem ser realizados em um processo sujeito a alterações por exemplo, quando os experimentos são realizados em diferentes períodos de tempo e sob diferentes condições de ruído, ou quando ocorrer flutuações nas entradas do processo como uma nova matéria-prima, nova máquina, mudança de operador, etc. Portanto, a blocação é um método de remover o efeito de condições extraordinários nas experiências.

2.15.3 Finalidade do DOE

Conforme Antony (2014), com base nos objetivos dos experimentos, o DOE pode ser usado para os seguintes propósitos:

- Comparações: quando se tem várias opções de design, vários materiais ou fornecedores estão disponíveis, o usuário pode criar um experimento para escolher o melhor.
- Triagem variável: se houver um grande número de variáveis que podem afetar o desempenho de um produto ou sistema, mas apenas um número relativamente pequeno delas for importante, um experimento de triagem pode ser conduzido para identificar as variáveis importantes.
- Exploração da função de transferência: uma vez que um pequeno número de variáveis tenha sido identificado como importante, seus efeitos no desempenho ou na resposta do sistema podem ser mais explorados. A relação entre as variáveis de entrada e a resposta de saída é chamada de função de transferência. O DOE pode ser aplicado para projetar experimentos eficientes para estudar os efeitos lineares e quadráticos das variáveis e algumas das interações entre as variáveis.
- Melhoria do sistema: o objetivo do projeto do sistema é melhorar o desempenho do sistema, como melhorar a eficiência, a qualidade e a confiabilidade. Se a função de transferência entre variáveis e respostas

foi identificada, a função de transferência pode ser usada para melhorar de projeto.

2.15.4 Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) é um método estatístico que compara as médias de dois ou mais grupos para testar se eles são significativamente diferentes. Da mesma forma que uma variância (ou desvio padrão) pode ser calculada a partir de um conjunto de dados, uma variância pode ser calculada a partir de um conjunto de médias (ANTONY, 2014).

A análise de variância, ou ANOVA, é usado para determinar a influência que as variáveis independentes têm sobre a variável dependente em um estudo de regressão (ANTONY, 2014).

Existem poucos termos que são encontrados durante a realização do teste ANOVA. Dentre eles tem-se: média, soma dos quadrados, graus de liberdade, F-ratio e hipótese (MONTGOMERY, 2017).

2.15.4.1 Média

Uma média é definida como uma média aritmética de um determinado intervalo de valores. No teste ANOVA, existem dois tipos de média que são calculados: média amostral e média geral. Uma média amostral (\bar{X}) representa o valor médio de um grupo de tamanho n (MONTGOMERY, 2017).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (8)$$

Enquanto a média geral ($\bar{\bar{X}}$) representa o valor médio das médias amostrais de diferentes grupos ou média de todas as observações combinadas (MONTGOMERY, 2017). O número total de grupos é dado por k e N é o tamanho total de todas as amostras.

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}}{N} \quad (9)$$

2.15.4.2 Soma dos quadrados

Em estatística, a soma dos quadrados é definida como uma técnica estatística usada na análise de regressão para determinar a dispersão dos pontos de dados. No teste ANOVA, é usado ao calcular o valor de F. Como a soma dos quadrados informa sobre o desvio da média, ela também é conhecida como variação (MONTGOMERY, 2017). Soma dos desvios quadrados sobre a grande média em todas as N observações é dada por:

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{X})^2 \quad (10)$$

A soma dos desvios quadrados para cada média de grupo sobre a grande média é dada por:

$$SST_G = \sum_{i=1}^k n(\bar{X}_i - \bar{X})^2 \quad (11)$$

Soma dos desvios quadrados para todas as observações dentro de cada grupo da média desse grupo, somados em todos os grupos é dado por:

$$SST_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{X}_i)^2 \quad (12)$$

2.15.4.3 Graus de liberdade

Graus de liberdade refere-se ao número máximo de valores logicamente independentes que têm a liberdade de variar em um conjunto de dados (ANTONY, 2014). Graus de liberdade total é dado por:

$$\text{Graus totais de liberdade} = N - 1 \quad (13)$$

Graus de liberdade entre grupos é dado por:

$$\text{Graus de liberdade entre grupos} = k - 1 \quad (14)$$

Graus de liberdade dentro dos grupos é dado pela subtração da equação 13 pela equação 14.

2.15.4.4 F-ratio

A estatística que mede a extensão da diferença entre as médias de diferentes amostras ou quão significativamente as médias diferem é chamada de F-statistic ou F-Ratio (MONTGOMERY, 2017). F-ratio é calculada a partir de uma razão que é formada entre as diferenças nas médias dos grupos (MST_G) e a variância do erro (MST_E).

$$F = \frac{MST_G}{MST_E} \quad (15)$$

Onde MST_G é dado por:

$$MST_G = \frac{SST_G}{k - 1} \quad (16)$$

E a MST_E é dado por:

$$MST_E = \frac{SST_E}{N - k} \quad (17)$$

Como é usado variâncias para explicar tanto a medida do efeito quanto a medida do erro, F é mais uma razão de variâncias.

- Quando o valor de F for superior a 1 significa que a variância devido ao efeito é maior que a variância associada ao erro amostral; Quando $F > 1$, variação devido ao efeito > variação devido ao erro.
- Se $F < 1$, significa variação por efeito < variação por erro.
- Quando $F = 1$ significa variação por efeito = variação por erro.

2.15.4.5 Hipótese

Para analisar estatisticamente a adequação do modelo matemático e a significância dos coeficientes, foi utilizada a técnica de análise de variância (ANOVA). O procedimento consiste basicamente em testar duas hipóteses: a Hipótese Nula (H_0) e a Hipótese Alternativa (H_1). A Hipótese Nula em ANOVA é válida quando as médias amostrais são iguais ou não apresentam diferença significativa. A Hipótese Alternativa é válida quando pelo menos uma das médias amostrais é diferente da outra (MONTGOMERY, 2017).

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n \quad \text{hipótese nula} \quad (18)$$

$$H_0: \mu_1 \neq \mu_n \quad \text{hipótese alternativa}$$

Através do valor de F, pode-se determinar a probabilidade de erro ao aceitar a hipótese, definida pelo valor de P. Este indicador é obtido através da distribuição de F em um determinado nível de significância. Em geral, utiliza-se um nível de significância acima de 90%.

2.15.5 Modelos de superfície de resposta

Uma vez que um experimento de triagem foi realizado e os fatores importantes determinados, a próxima etapa geralmente é realizar um experimento de superfície de resposta para produzir um modelo de previsão para determinar a curvatura e detectar interações entre os fatores (ANTONY, 2014). O modelo de superfície de resposta conta com a suposição de uma relação matemática entre a variável de resposta e os fatores. Nesta seção é apresentado as três hipóteses mais simples: um modelo linear, um modelo de interação linear de duas ordens e um modelo quadrático. Em cada um desses modelos y representa a variável resposta, x_i os fatores e β_i e β_{ij} são os coeficientes de regressão.

Um modelo linear (também chamado de modelo de regressão linear) é o modelo polinomial mais simples que contém apenas termos lineares e descreve apenas a relação linear entre as variáveis experimentais e as respostas (MONTGOMERY, 2017). Os parâmetros do modelo terão a seguinte forma (equação 19):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad (19)$$

O próximo nível de modelos polinomiais contém termos adicionais que descrevem a interação entre diferentes variáveis experimentais (MONTGOMERY, 2017). Assim, um modelo de interação contém os seguintes termos (equação 20):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (20)$$

Os dois modelos acima são usados principalmente para investigar o sistema experimental, por exemplo, com estudos de triagem. Para poder determinar um máximo ou mínimo ótimo, termos quadráticos devem ser

introduzidos no modelo (MONTGOMERY, 2017). Ao introduzir esses termos no modelo, é possível determinar relações não lineares entre as variáveis experimentais e as respostas. A função polinomial abaixo descreve um modelo quadrático (equação 21):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 \quad (21)$$

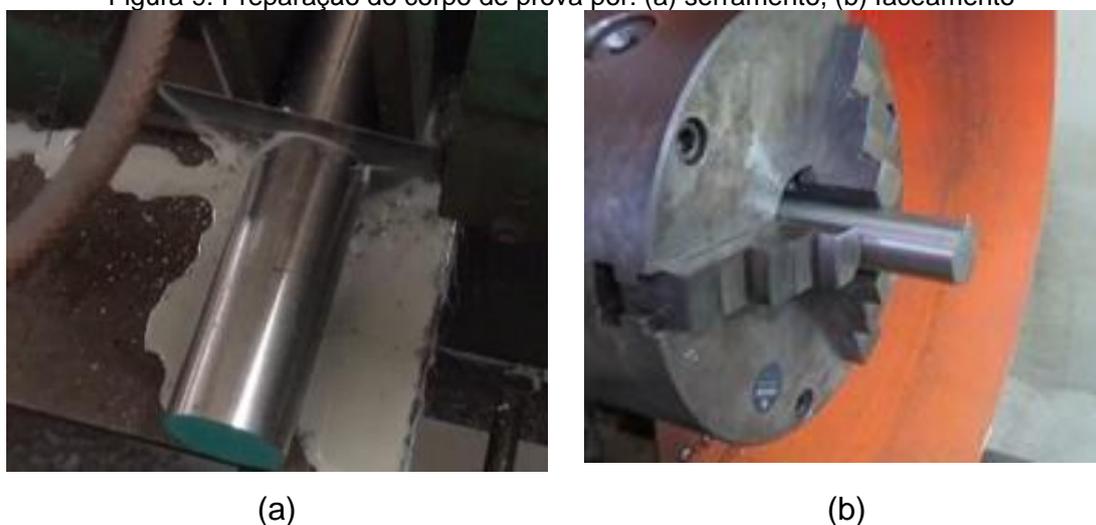
3 METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Usinagem por Comando Numérico Computadorizado (CNC) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco (DEMEC – UFPE). Foi usado um torno CNC marca Romi, modelo Centur 30D, instalado um sistema de refrigeração com o objetivo de manter a temperatura do fluido controlada. No planejamento dos procedimentos foi adotada a metodologia DOE, que será descrita nas seções seguintes.

3.1 Corpo de prova

A fase inicial do projeto focou na preparação de três amostras da liga Ti-6Al-4V. Nesta etapa, conforme mostra a Figura 9, o processo de fabricação envolveu serragem com serra de fita e torneamento manual em torno Romi Mascote para faceamento e realização do furo de centro.

Figura 9: Preparação do corpo de prova por: (a) serramento, (b) faceamento



Fonte: O autor (2023).

As dimensões das amostras usadas nessa pesquisa são de 51 mm de diâmetro e 124 mm de comprimento, fabricadas em liga de Ti-6Al-4V. A escolha do comprimento foi realizada com o objetivo de obter três corpos de provas, com o material disponível para esta pesquisa. A composição química da liga de titânio usada neste estudo é mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química da liga de Ti-6Al-4V

| Composição química (%) | | | | | | | |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|--------|
| Ti | Al | V | C | Fe | N | O | Outros |
| 89,24 | 6,14 | 3,80 | 0,02 | 0,23 | 0,03 | 0,14 | 0,40 |

Fonte: O autor (2023).

Além disso, a liga Ti-6Al-4V é tratada termicamente por recozimento, pelo fabricante, de modo que o material tem um limite de resistência à tração de 979 MPa, um limite de escoamento de 904 MPa, um alongamento de 18% e uma redução de área de 41%, segundo o fabricante.

3.2 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

O fluido de corte utilizado foi o BIO100e, na proporção de 1 litro de BIO100e para 19 litros de água, empregando, portanto, um fluido solúvel sintético biodegradável para usinagens. Adaptou-se o sistema de refrigeração no torno CNC para controlar a temperatura do fluido de corte. Esse equipamento foi instalado de modo a agir no tanque de fluido de corte do torno CNC que tem capacidade de 56 litros divididos em três seções, conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10 - Seções do reservatório



Fonte: Adaptado de Araújo et al (2019).

O torno possui como acessório um sistema de bombeamento do fluido de corte, que desloca o fluido de corte do tanque (seção 1, Figura 10) para a região de corte realizando o método de usinagem molhado e pressurizado. Cabe ao

sistema de refrigeração reduzir a temperatura do fluido do reservatório no valor especificado na pesquisa.

O sistema de refrigeração é constituído por: compressor, gás refrigerante, condensador, ventilador, válvula de expansão, controlador de temperatura e evaporador. A Figura 11 mostra o sistema de refrigeração por compressão utilizado, montado no torno CNC.

Figura 11 - Componentes do sistema de refrigeração

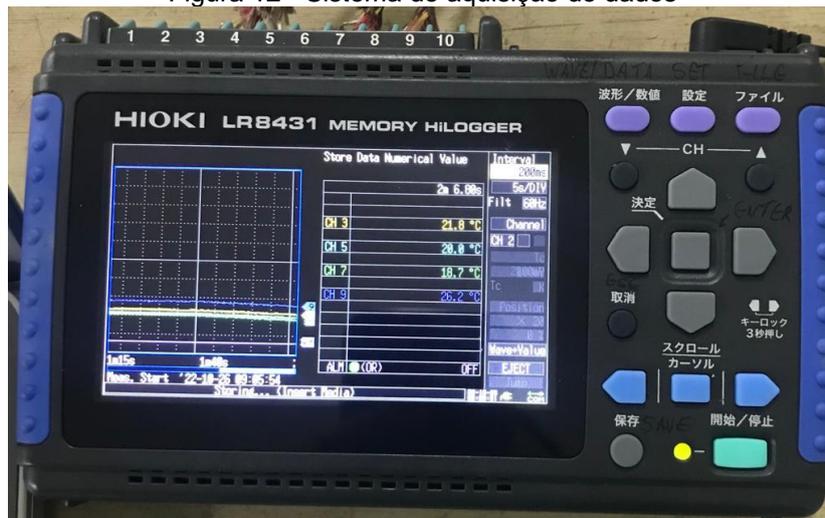


Fonte: Adaptado de Araújo et al (2019).

3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para monitorar a temperatura tanto no reservatório quanto na ferramenta foi usado um sistema de aquisição de dados marca HIOKI e modelo LR8431 (Figura 12). O sistema possui uma taxa de aquisição de 5 por segundos. Nele foram instalados quatro termopares do tipo K distribuídos em cada seção do reservatório do fluido de corte e na ferramenta de corte. Os termopares foram calibrados através da comparação dos valores com o termopar do sistema de refrigeração, no qual esse termopar já havia sido calibrado anteriormente.

Figura 12 - Sistema de aquisição de dados



Fonte: O autor (2023).

A Figura 13 mostra o esquema de montagem do termopar na ferramenta de corte. Esse termopar foi utilizado para monitorar o calor que é retido na pastilha durante a usinagem da liga Ti-6Al-4V.

Figura 13 - Região de fixação do termopar



Fonte: O autor (2023).

3.4 USINAGEM

O processo de usinagem executado foi o torneamento automático, com o emprego do torno CNC Romi Centur 30D. O código base utilizado nessa pesquisa está no apêndice A, no qual a cada corrida as variáveis eram modificadas. As ferramentas de corte usadas no processo foram os insertos intercambiáveis de metal duro, marca Sandvik, referência SNMG 120408SMR H13A, SNMG 120412SMR H13A e SNMG 120416SMR H13A, com raio de ponta

de 0,8 mm, 1,2 mm e 1,6 mm respectivamente. O porta ferramenta empregado é do mesmo fabricante modelo SNMG 120408 (Figura 14).

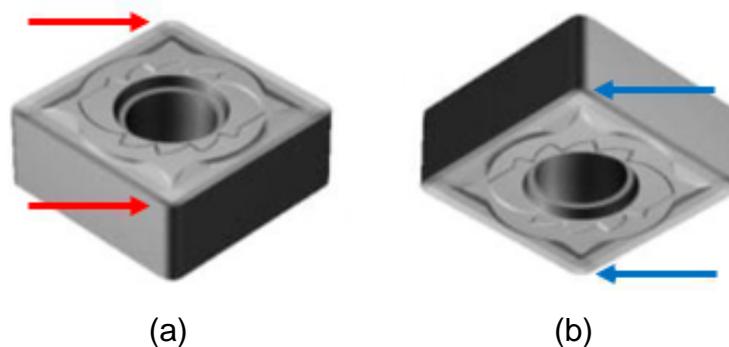
Figura 14 - Porta ferramenta e inserto no torno CNC



Fonte: O autor (2023).

Cada ferramenta de corte contém oito posições possíveis de corte, contudo utilizou-se apenas quatro posições para cada ferramenta, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Posições de corte utilizadas: (a) as duas arestas de corte utilizadas da vista superior. (b) as duas arestas de corte utilizadas da vista inferior



Fonte: O autor (2023).

A concentricidade entre a peça e a placa foi garantida através das três castanhas recém torneadas, utilização do contraponto rotativo e pela verificação de alinhamento com o relógio comparador, ilustrado pela Figura 16, no qual possui resolução de 0,01 mm. O desgaste da ferramenta foi monitorado, no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM), utilizando-se um microscópio óptico Olympus BX51M com câmera digital, com magnificação de 50 vezes.

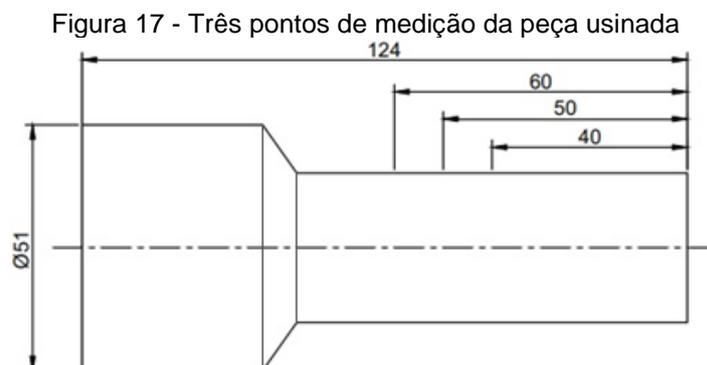
Figura 16 - Medição concentricidade do corpo de prova na placa com emprego do relógio comparador



Fonte: O autor (2023).

3.5 AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE

As medições da rugosidade foram realizadas através do rugosímetro Instrutherm modelo RP-200. O rugosímetro tem precisão menor que 10% e repetitividade do valor exibido menor que 6%. Após cada passe a amostra foi retirada da máquina para medir a rugosidade. O *cut-off* utilizado foi de 0,8 mm, pois é o comprimento mínimo de amostragem recomendado para R_a maior que $0,1 \mu\text{m}$ e menor que $2 \mu\text{m}$. Nesse momento, a pastilha também é retirada do suporte para modificar a aresta de corte, ou seja, cada uma das quatro posições de corte possíveis (Figura 15) fica exposta apenas para um passe. Portanto, a rugosidade não é afetada pelo desgaste do inserto de corridas anteriores. As medições de rugosidade foram sempre feitas 3 vezes em cada ponto (40 mm, 50 mm e 60 mm a partir da face do corpo de prova) conforme mostrado na Figura 17.



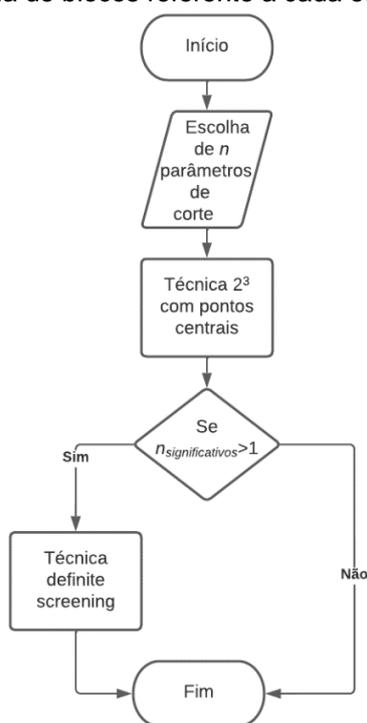
Fonte: O autor (2023).

Após a medição da rugosidade, foi realizada uma média aritmética dos valores de rugosidade e calculada a incerteza expandida.

3.6 METODOLOGIA DO DESIGN DE EXPERIMENTOS

Com a seleção correta da técnica que será utilizada na metodologia do design de experimentos, o número de execuções pode ser minimizado e resultados confiáveis podem ser obtidos. Portanto, este estudo foi dividido em duas etapas, cada uma iniciando com a utilização de uma técnica 2^3 com pontos centrais. Esta técnica permite elaborar modelos lineares. Se o número de parâmetros significativos for maior que 1, na técnica 2^3 com pontos centrais, foi utilizada em seguida uma técnica *definitive screening design*, resultando em um modelo quadrático, que permite a obtenção do ponto de mínimo. O fluxograma da Figura 18, mostra a sequência utilizada neste estudo.

Figura 18 - Diagrama de blocos referente a cada etapa de experimento



Fonte: O autor (2023).

A ideia em questão é usar uma técnica com menos execuções para verificar o efeito de cada parâmetro. Se o número de parâmetros significativos, no estudo da rugosidade, for maior que 1, então serão aproveitadas as corridas da técnica 2^3 com pontos centrais e adicionadas mais 8 corridas para obter um modelo quadrático.

Na primeira etapa, o planejamento do design de experimentos (DOE) foi abordado levando em consideração os parâmetros velocidade de corte, avanço e temperatura do fluido. A Tabela 6 fornece os três fatores de velocidade de corte, taxa de avanço, temperatura do fluido de corte e seus respectivos níveis de mudança, onde o DOE indica que o nível inferior é -1, o central é 0 e o superior é +1.

Tabela 6 - Valores utilizados para cada parâmetro de corte na primeira etapa

| Parâmetros de corte | Níveis dos fatores | | |
|---------------------|--------------------|------|------|
| | -1 | 0 | 1 |
| v_c (m/min) | 60 | 80 | 100 |
| f (mm/rev) | 0,12 | 0,16 | 0,20 |
| T (°C) | 10,0 | 15,0 | 20,0 |

Fonte: O autor (2023).

Os níveis, ou valores dos parâmetros de usinagem, foram especificados em função de diversos artigos que tratavam sobre a usinagem da liga Ti-6Al-4V (BERMINGHAM; PALANISAMY; DARGUSCH, 2012; CAROU et al, 2017; D'MELLO; PAI; PUNEET, 2017; RAMESH; KARUNAMOORTHY; PALANIKUMAR, 2012; UPADHYAY; JAIN; MEHTA, 2013). Além disso, a profundidade de corte foi definida como 0,3 mm e o comprimento de trabalho de usinagem foi definido como 90 mm.

Pela análise dos testes da primeira etapa e depois de identificar os parâmetros mais significativos foi possível realizar a segunda fase dos experimentos. Nesta etapa utilizou-se o avanço, o raio de ponta da ferramenta e a profundidade de corte como parâmetros do design de experimentos (Tabela 7). A velocidade de corte foi fixada em 100 m/min e a temperatura do fluido de corte em 15,0 °C.

Tabela 7 - Valores utilizados para cada parâmetro de corte na segunda etapa

| Parâmetros de corte | Níveis dos fatores | | |
|---------------------|--------------------|------|------|
| | -1 | 0 | 1 |
| R (mm) | 0,8 | 1,2 | 1,6 |
| f (mm/rev) | 0,12 | 0,16 | 0,20 |
| a (mm) | 0,25 | 0,5 | 0,75 |

Fonte: O autor (2023).

Os ensaios de torneamento foram dimensionados de forma a proporcionar uma maneira mais precisa de se estudar a influência da velocidade de corte, avanço, temperatura do fluido de corte, raio da ferramenta e profundidade de corte na rugosidade (R_a e R_z) da peça usinada, através da aplicação da metodologia de projeto de experimentos (DOE). Conforme previsto pelo método DOE, os experimentos foram realizados em ordem aleatória. Como pode ser visto, o modelo proposto simplifica o experimento, pois seriam 27 execuções em cada etapa se fosse usado o fatorial completo (3^3). Além disso, o uso dos pontos centrais minimiza a presença de erro experimental.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção será discutido os resultados de cada etapa adotada neste trabalho.

4.1 PRIMEIRA FASE DE EXPERIMENTOS UTILIZANDO A TÉCNICA 2^3 COM CINCO PONTOS CENTRAIS

Os dados experimentais do projeto fatorial 2^3 com cinco pontos centrais com os resultados da rugosidade R_a e R_z são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Medição da rugosidade (R_a e R_z) pelo fatorial 2^3 com 5 pontos centrais com parâmetros em níveis dos fatores

| N | V_c (m/min) | f (mm/rev) | T (°C) | R_a (μm) | U_{Ra} (μm) | R_z (μm) | U_{Rz} (μm) | T_{max} (°C) |
|----|---------------|--------------|-----------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 0,31 | 0,01 | 1,79 | 0,08 | 28,0 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | 0,29 | 0,01 | 2,1 | 0,2 | 30,1 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 0,76 | 0,03 | 4,0 | 0,1 | 28,2 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | 0,80 | 0,03 | 3,8 | 0,2 | 29,8 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 0,42 | 0,02 | 2,49 | 0,06 | 28,6 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | 0,36 | 0,01 | 1,9 | 0,1 | 31,1 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | 0,72 | 0,02 | 3,6 | 0,1 | 28,7 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 0,90 | 0,02 | 3,7 | 0,1 | 31,3 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0,511 | 0,009 | 2,62 | 0,08 | 29,0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0,520 | 0,005 | 2,64 | 0,07 | 29,3 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0,51 | 0,01 | 2,80 | 0,06 | 29,5 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0,51 | 0,01 | 2,7 | 0,2 | 29,3 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0,52 | 0,01 | 2,7 | 0,1 | 29,1 |

Fonte: O autor (2023).

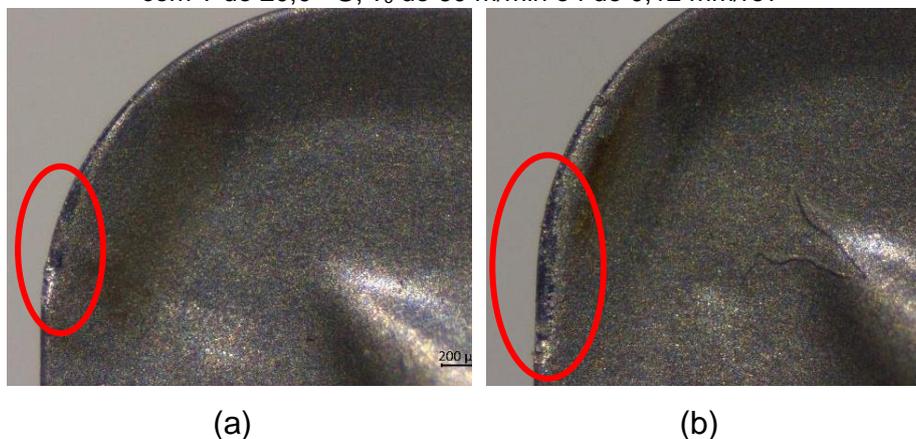
É possível analisar que os parâmetros de rugosidades R_a obtidos nos ensaios para a liga de Ti-6Al-4V foram relativamente baixos, visto que o avanço variou de 0,12 mm/rev a 0,20 mm/rev. A rugosidade média R_a ficou na faixa de 0,29-0,90 μm e a rugosidade R_z ficou na faixa de 1,79 μm a 4,00 μm . Para cada corrida realizada foi calculada a incerteza expandida (U_{Ra} e U_{Rz}), no qual o N na primeira coluna representa a numeração da corrida realizada. Além disto, por

meio do sistema de monitoramento é possível verificar a temperatura máxima da ferramenta de corte na região onde está localizado o termopar.

4.1.1 Temperatura do fluido de corte

Na Tabela 8, fixando a velocidade de corte e o avanço, é perceptível que o aumento da temperatura do fluido gera uma maior rugosidade. Por exemplo, nas corridas 1 e 5 com o aumento da temperatura (10,0 °C para 20,0 °C) a rugosidade R_a atinge, 0,31 μm e 0,42 μm , respectivamente. Possivelmente, este aumento ocorre em função da interação química entre os materiais onde processos difusionais na interface peça e ferramenta levam a alterações de composição com mudança de propriedades e mesmo arrancamento de material. O processo de troca de calor, ferramenta-fluido, é feito em sua maior parte por convecção. Assim, à medida que a temperatura do fluido aumenta, menor é a quantidade de calor dissipado, conseqüente a vida útil do inserto reduzida, como mostra a Figura 19.

Figura 19 - (a) Desgaste com T de 10,0 °C, v_c de 60 m/min e f de 0,12 mm/rev. (b) Desgaste com T de 20,0 °C, v_c de 60 m/min e f de 0,12 mm/rev

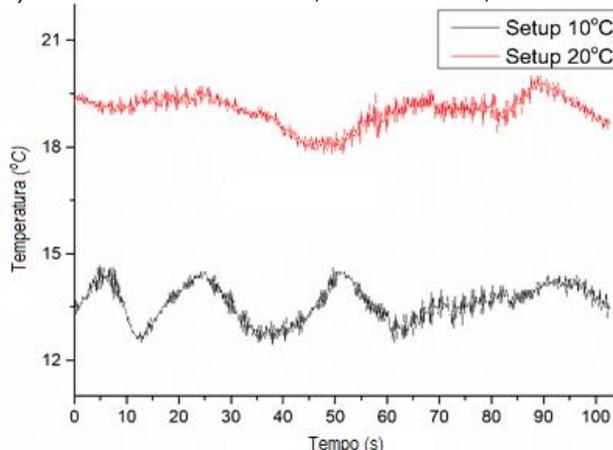


Fonte: O autor (2023).

O desgaste na aresta de corte se torna mais intenso com o incremento na temperatura da ferramenta, afetando, portanto, a qualidade da peça nos aspectos de dimensão e acabamento. A difusão é um dos principais mecanismos de desgastes das ferramentas de corte (EZUGWU; WANG, 1997). O desgaste da aresta de corte pode prejudicar a usinagem nos aspectos: mudanças na forma do cavaco, devido ao calor gerado entre a peça-ferramenta, e deformação

plástica na pastilha (ÇELIK; FIDAN, 2022). A Figura 20 mostra a evolução da temperatura do fluido na seção 1 do reservatório.

Figura 20 - Monitoramento das temperaturas na seção 1 com T de 10,0 °C (linha preta) e 20,0 °C (linha vermelha). A v_c e f são constantes, 60 m/min e 0,12 mm/rev respectivamente



Fonte: O autor (2023).

A resolução do sistema de aquisição de temperatura é de 0,1 °C. Em temperaturas mais altas, como 20,0 °C, o sistema consegue chegar mais próximo da temperatura desejada. Por conta disto, na segunda etapa dos experimentos a temperatura foi fixada em 15,0 °C.

É perceptível o efeito da temperatura no desgaste ferramenta de corte nas condições de usinar o material a seco e com fluido. A Figura 21 (a), apresenta a morfologia da ferramenta de corte após ter sido utilizada para realizar passes na condição de usinagem com fluido de corte pressurizado. Contudo, ao usinar a seco, é possível observar na Figura 21 (b), que há um intenso desgaste de cratera, provavelmente relacionado ao elevado atrito gerado na interface cavaco-superfície de saída da ferramenta.

Figura 21 - (a) Desgaste com fluido a T de 10,0 °C, v_c de 100 m/min e f de 0,20 mm/rev. (b) Desgaste a seco com v_c de 100 m/min e f de 0,20 mm/rev



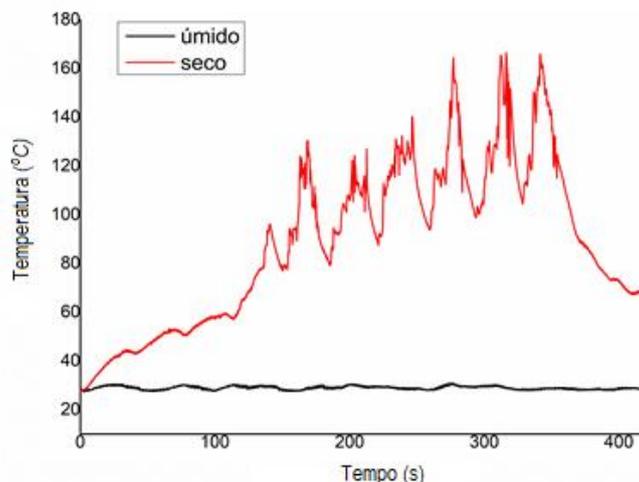
(a)

(b)

Fonte: O autor (2023).

De acordo com a Figura 22, utilizando fluido de corte a 10,0 °C, a temperatura média da ferramenta no ponto de medição fica em torno de 28,9 °C. No entanto, durante a usinagem a seco, a temperatura da ferramenta de corte aumenta rapidamente a cada operação subsequente, atingindo uma temperatura máxima de 166,5 °C.

Figura 22 - Monitoramento das temperaturas das ferramentas de corte com usinagem a seco (v_c de 100 m/min e f de 0,20 mm/rev) e úmida (T de 10,0 °C, v_c de 100 m/min e f de 0,20 mm/rev)

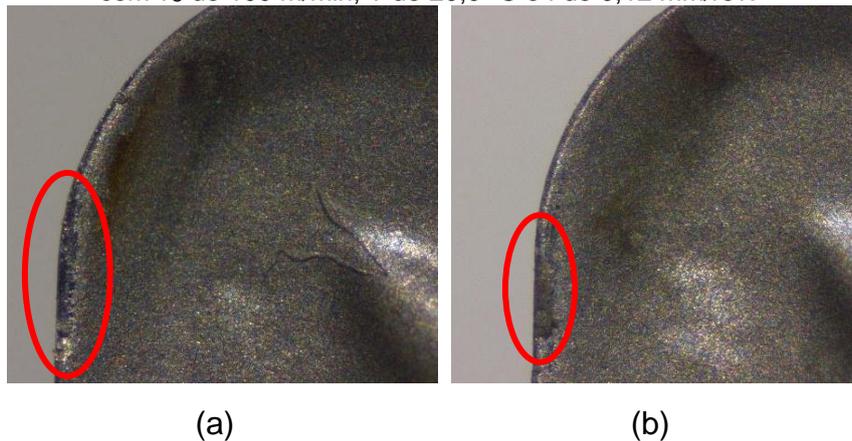


Fonte: O autor (2023).

4.1.2 Velocidade de corte

Voltando a analisar os dados da Tabela 8, se for fixada a temperatura e usado o avanço em seu nível inferior (0,12 mm/rev) observa-se o surgimento de aresta postiça de corte. A Figura 23 mostra o resultado da aresta postiça no gume da ferramenta de corte.

Figura 23 - (a) Desgaste com v_c de 60 m/min, T de 20,0 °C e f de 0,12 mm/rev. (b) Desgaste com v_c de 100 m/min, T de 20,0 °C e f de 0,12 mm/rev.

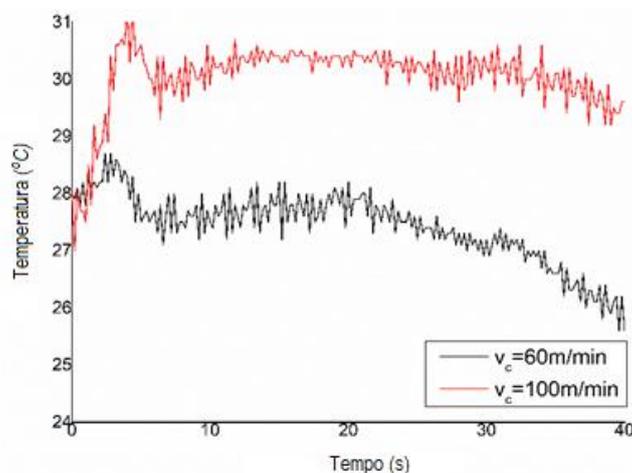


Fonte: O autor (2023).

Este fenômeno ocorre em baixas velocidades (60 m/min), onde uma porção de material se adere na superfície de saída da ferramenta afetando o acabamento, por exemplo, nas corridas 5 e 6 com aumento da velocidade de corte (60 m/min para 100 m/min) a rugosidade R_a diminui de 0,42 μm para 0,36 μm . Portanto é possível acabar com esse fenômeno aumentando a velocidade de corte.

Quando o avanço está no nível superior (0,20 mm/rev) e a temperatura é mantida, não se observa o surgimento da aresta postiça de corte, por exemplo, nas corridas 3 e 4 com o aumento da velocidade de corte (60 m/min para 100 m/min) a rugosidade R_a aumenta. Portanto, o efeito do aumento da velocidade de corte se torna mais significativo para a rugosidade. Conforme pode ser observado na Figura 24, o incremento da velocidade de corte eleva a temperatura na zona de corte, o que contribui para o desgaste da ferramenta, causando posteriormente danos à superfície.

Figura 24 - Monitoramento das temperaturas na ferramenta de corte com v_c de 60 m/min (linha preta) e 100 m/min (linha vermelha). A T e f são constantes, 20,0 °C e 0,12 mm/rev respectivamente



Fonte: O autor (2023).

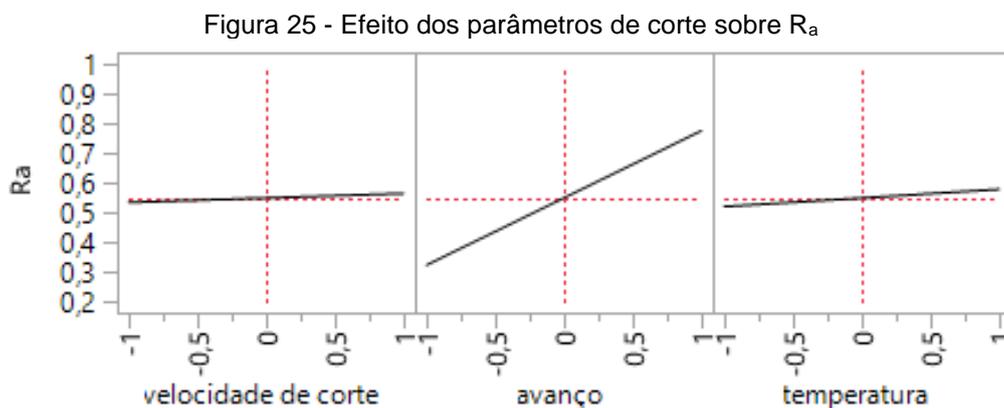
Devido à baixa condutividade térmica da liga de Ti-6Al-4V deve-se ter cuidado para não incrementar demasiadamente a velocidade de corte (GUPTA et al, 2020). Portanto, quando for aplicar operações de desbaste é recomendado aumentar o avanço e diminuir a velocidade de corte, evitando, portanto, o desgaste da ferramenta devido ao aumento da sua temperatura. Já em operações de acabamento deve-se reduzir o avanço e aumentar a velocidade para evitar o surgimento da aresta postiça de corte. Assim, maior será o tempo de vida da ferramenta, com o desgaste da ferramenta como critério de fim de vida, e o comprimento de corte obtido.

4.1.3 Avanço

Dentre os parâmetros de usinagem estudados, o avanço foi o parâmetro que individualmente demonstrou maior influência sobre a rugosidade R_a e R_z . Analisando as corridas 1 e 3 há um aumento de pouco mais de 140% na rugosidade R_a . Assim com o aumento do avanço a rugosidade cresce. Portanto, analisando cada parâmetro isoladamente é possível determinar que o avanço possui maior influência no processo de torneamento da liga de Ti-6Al-4V. Contudo é necessário realizar uma análise mais detalhada para verificar o efeito das interações dos parâmetros, conforme a próxima seção.

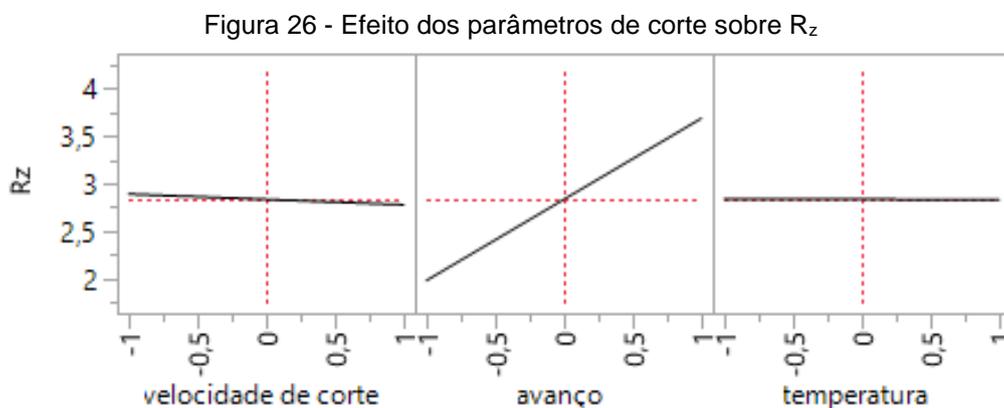
4.1.4 Design de experimentos

Os resultados do DOE foram obtidos com o auxílio do *software* JMP. A Figura 25 mostra, por meio da inclinação da reta, indícios de influência das condições de corte (velocidade de corte, avanço e temperatura do fluido) sobre a rugosidade R_a .



Fonte: O autor (2023). Software JMP

Analisando a Figura 25, o avanço possui um efeito maior sobre a rugosidade R_a em comparação com o efeito da velocidade de corte e da temperatura do fluido. O maior efeito do avanço se deve a medida do seu incremento, 0,12-0,20 mm/rev, o que resulta em mais ondulações na superfície da peça. O efeito positivo da velocidade de corte é devido ao aumento da temperatura do inserto e possivelmente aumento da vibração do sistema máquina-peça. A baixa influência da temperatura do fluido se deve pela curta variação das temperaturas médias nos experimentos. A Figura 26 mostra os indícios da influência de cada parâmetro sobre a rugosidade R_z .



Fonte: O autor (2023). Software JMP

Para a rugosidade R_z o avanço também possui um efeito positivo acentuado. Contudo a velocidade de corte passa a ter um efeito negativo predominando o fenômeno da aresta postiça de corte no acabamento final. Já o efeito da temperatura do fluido de corte é quase nulo, podendo ser desprezado para análise da rugosidade R_z . O gráfico de Pareto permite analisar o real efeito dos principais parâmetros e das suas interações ($v_c * f$, $v_c * T$ e $T * f$) sobre as rugosidades estabelecidas, ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Significância dos fatores e suas interações na resposta R_a

| Fonte | Significância | Pvalor |
|-------------------------|---------------|--------|
| f(mm/rev) | 4,910 | 0,0000 |
| v_c (m/min)*f(mm/rev) | 1,135 | 0,0732 |
| T(°C) | 0,843 | 0,1436 |
| f(mm/rev)*T(°C) | 0,409 | 0,3898 |
| v_c (m/min) | 0,384 | 0,4133 |
| v_c (m/min)*T(°C) | 0,282 | 0,5220 |

Fonte: O autor (2023). Software JMP

De acordo com a Figura 27 somente o avanço pode ser considerado influente sobre o sistema R_a , pois foi o único parâmetro que obteve probabilidade P menor que o nível de significância de 0,05. Já os parâmetros v_c , T , $v_c * f$, $v_c * T$ e $T * f$ não são considerados significativos no sistema, pois obtiveram $P > 0,05$. A interação entre a velocidade de corte e o avanço se aproximou ao P -valor menor que 5% para a rugosidade R_a . Essa interação ($v_c * f$) corrobora com a presença ou não da aresta postiça de corte em função do avanço e da velocidade. Estudos mostram que a velocidade é significativa quando se analisa a força de corte, apesar da velocidade de corte não ser significativa no estudo da rugosidade (GUPTA et al, 2020; REVURU et al, 2018). Por conta disso, ao realizar o processo de torneamento deve ter em foco o que se deseja melhorar.

O cenário aplicado nessa pesquisa é o torneamento úmido com controle da temperatura do fluido de corte. Os meios de refrigeração no torneamento da liga de Ti-6Al-4V são significativos no estudo da rugosidade (MIA et al, 2017). Estudo mostra que ao utilizar a refrigeração criogênica a velocidade de corte e o tipo de ferramenta são as variáveis significativas no estudo da rugosidade, já o avanço não possui significância no processo (MIA; KHAN; DHA, 2017). Ao analisar o torneamento úmido, sem o controle da temperatura do fluido, e a seco

é verificado que apenas o avanço é significativo para a rugosidade (KECHAGIAS et al, 2020; SARGADE; NIPANIKAR; MESHARAM, 2016). Portanto, a velocidade de corte e a profundidade de corte podem ser desconsideradas no torneamento úmido e a seco.

Para o R_z o avanço foi a única variável significativa, conforme apresentado na Figura 28. As demais variáveis e as interações obtiveram $P > 0,05$.

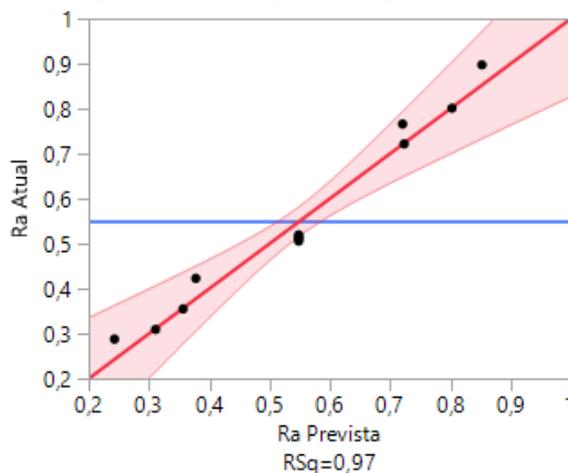
Figura 28 - Significância dos fatores e suas interações na resposta R_z

| Fonte | Significância | Pvalor |
|-------------------------|---------------|--------|
| f(mm/rev) | 4,273 | 0,0000 |
| f(mm/rev)*T(°C) | 0,740 | 0,1818 |
| v_c (m/min)*T(°C) | 0,457 | 0,3490 |
| v_c (m/min) | 0,275 | 0,5311 |
| v_c (m/min)*f(mm/rev) | 0,086 | 0,8199 |
| T(°C) | 0,015 | 0,9650 |

Fonte: O autor (2023). Software JMP

Diferentemente da rugosidade R_a não houve nenhuma interação com valor próximo ao considerado significativo. Além disso, a significância da temperatura do fluido de corte é quase zero. A Figura 29 mostra as linhas de probabilidade normal para os resíduos do modelo de rugosidade R_a .

Figura 29 - Predição da rugosidade R_a

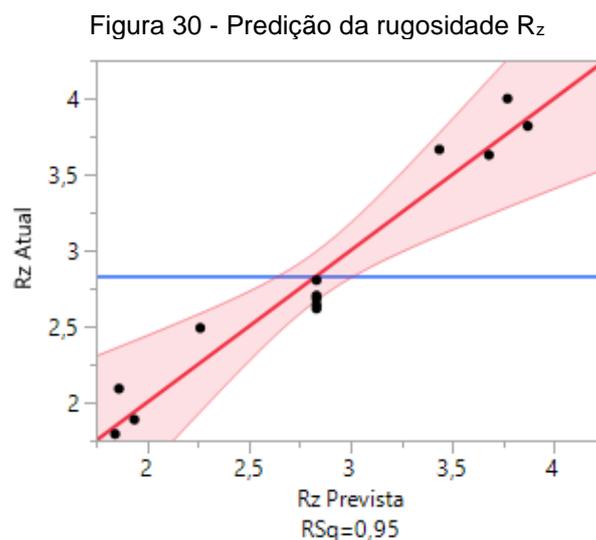


Fonte: O autor (2023). Software JMP

Os pontos de observação estão distribuídos em uma linha reta, podendo-se concluir que os dados estão distribuídos normalmente. Observou-se também que os resíduos foram apresentados de forma independente e aleatória. Portanto, pode-se observar que o modelo encontrado é satisfatório. Como pode

ser visto, o modelo linear resultante apresenta um excelente ajuste (R^2 adj = 97%). O coeficiente de confiabilidade mede quão bem o modelo explica a variação dos dados, e quanto mais próximo de 100%, melhor o modelo é considerado.

Da mesma forma, foi realizada a análise de variância para a rugosidade R_z , no qual apenas o avanço é classificado como variável significativa. Os demais parâmetros obtiveram valores P relativamente maiores que 0,05. Através da Figura 30, a confiabilidade encontrada é de 95%.



Fonte: O autor (2023). Software JMP

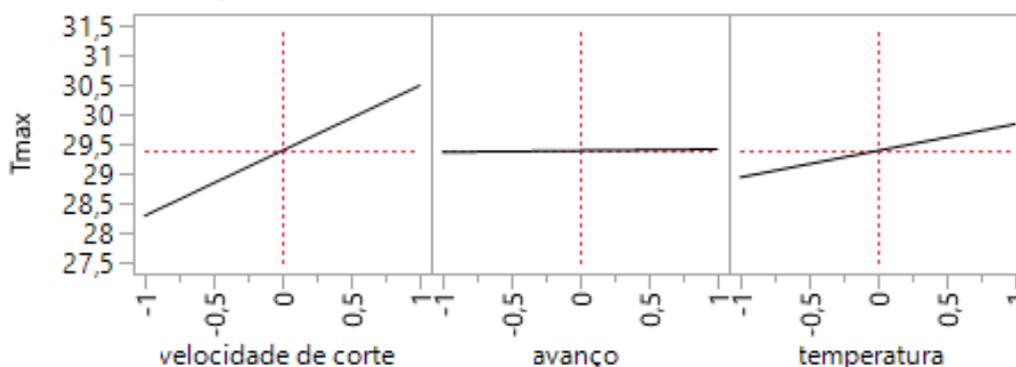
Nos dois modelos (R_a e R_z) os coeficientes de avanço foram maiores mostrando seu efeito significativo. Para o modelo R_a a velocidade de corte obteve um coeficiente positivo, portanto há pouco efeito da aresta postiça de corte neste modelo. O oposto ocorre na rugosidade R_z , onde o coeficiente é negativo prevalecendo o efeito do surgimento da aresta postiça de corte no valor da rugosidade R_z .

O objetivo principal deste trabalho é o estudo da rugosidade durante o torneamento da liga Ti-6Al-4V, portanto, houve apenas um parâmetro significativo na primeira etapa, não sendo aplicada posteriormente a técnica *definitive screening design*.

A temperatura máxima da ferramenta também pode ser usada como uma resposta no design de experimentos, portanto é possível verificar os efeitos de cada parâmetro na T_{max} . Os gráficos de indícios de influência verificam que a

temperatura do fluido e a velocidade de corte são significativas ao estudar a temperatura máxima da ferramenta, conforme a Figura 31.

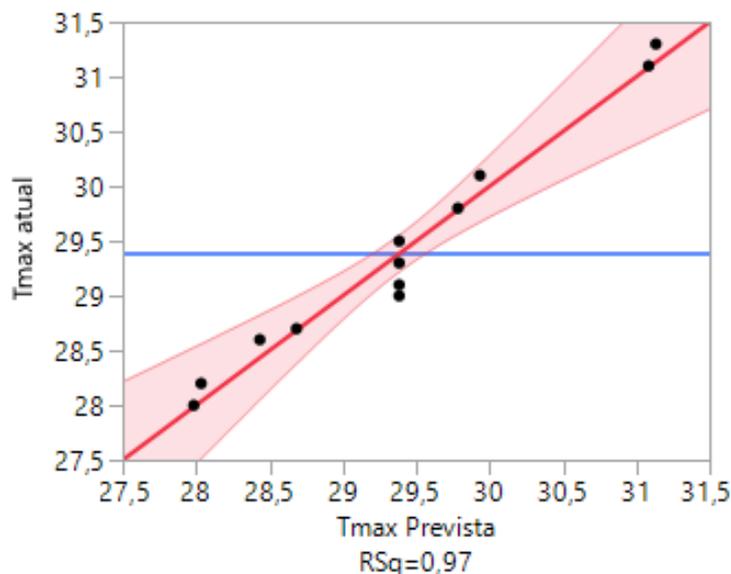
Figura 31 - Efeito dos parâmetros de corte sobre Tmax



Fonte: O autor (2023). Software JMP

Como se constata pela bibliografia, ao contrário da análise da rugosidade, a velocidade de corte tem um forte efeito positivo na temperatura máxima da ferramenta, ou seja, à medida que a velocidade de corte aumenta, a temperatura da ferramenta aumenta durante a usinagem. A temperatura do fluido torna-se então o segundo parâmetro mais importante no estudo da temperatura máxima, portanto, ao realizar estudos de usinagem, deve-se verificar qual variável de resposta deseja melhorar. Conforme a Figura 32, essa análise da temperatura máxima obteve um ótimo ajuste ($R^2 \text{ adj} = 97\%$).

Figura 32 - Predição da temperatura máxima no torneamento



Fonte: O autor (2023). Software JMP

4.2 SEGUNDA FASE DE EXPERIMENTOS UTILIZANDO A TÉCNICA 2³ COM TRÊS PONTOS CENTRAIS

Os experimentos a seguir foram uma melhoria em relação aos resultados obtidos na primeira fase, pois ao concluir que um parâmetro não é significativo para o objetivo adotado o mesmo é retirado do experimento. Assim, o avanço continuou sendo empregado no estudo e acrescentou mais dois parâmetros, o raio da ferramenta de corte e a profundidade de corte. Além disto, através da primeira etapa foi verificado que com a utilização de três pontos centrais era obtido praticamente os mesmos resultados que cinco pontos centrais.

Os resultados das rugosidades R_a e R_z do projeto fatorial 2³ com três pontos centrais são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9: Medição da rugosidade (R_a e R_z) pelo fatorial 2³ com 3 pontos centrais

| N | R (mm) | f (mm/rev) | a (mm) | R_a (μm) | U_{Ra} (μm) | R_z (μm) | U_{Rz} (μm) | $T_{\text{max}}(^{\circ}\text{C})$ |
|----|-----------|---------------|-----------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 0,64 | 0,02 | 3,28 | 0,06 | 30,8 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | 0,19 | 0,03 | 1,3 | 0,1 | 28,1 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 1,564 | 0,007 | 6,8 | 0,1 | 30,7 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | 0,652 | 0,008 | 3,4 | 0,1 | 28,9 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 0,54 | 0,02 | 2,8 | 0,2 | 30,3 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | 0,339 | 0,005 | 1,9 | 0,1 | 29,4 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | 1,88 | 0,01 | 7,59 | 0,07 | 28,9 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 0,74 | 0,03 | 3,4 | 0,1 | 31,1 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0,951 | 0,009 | 4,22 | 0,02 | 30,5 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0,948 | 0,007 | 4,22 | 0,03 | 30,7 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0,956 | 0,009 | 4,23 | 0,02 | 30,8 |

Fonte: O autor (2023).

Os valores de rugosidades R_a e R_z obtidos nos ensaios para a liga de Ti-6Al-4V obtiveram uma maior variação comparados ao experimento anterior. A rugosidade média R_a ficou na faixa de 0,19-1,88 μm e a rugosidade R_z ficou na faixa de 1,30-7,59 μm . Esta maior variação se deve aos diversos perfis que foram encontrados na peça acabada (perfil liso e perfil semelhante ao de uma rosca).

Com o objetivo de evitar o desgaste da ferramenta, por conta do aumento da velocidade, devido à elevação de temperatura ferramenta-peça, e evitar o efeito da aresta postiça de corte, a velocidade de corte foi fixada em 100 m/min.

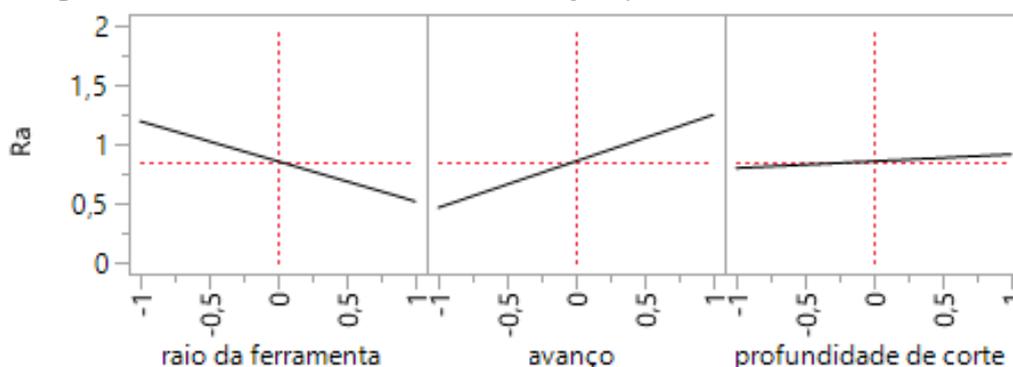
4.2.1 Raio da ferramenta de corte

O raio da ponta de uma ferramenta tem vários efeitos no processo de torneamento. Dentre eles, pode-se destacar que o aumento do raio melhora o acabamento superficial e também aumenta a resistência da aresta de corte, pois resulta em maior área da peça em contato com a ferramenta (PARIDA; RAO; GHOSH, 2020). As mudanças das rugosidades, R_a e R_z , devido a alteração no raio de ponta da ferramenta de corte são visualizadas na Tabela 9, no qual em todos os casos que o avanço e a profundidade foram fixados o aumento do raio acarretou uma menor rugosidade R_a e R_z .

4.2.2 Design de experimentos

Gerando o gráfico de efeito dos parâmetros empregados é possível verificar que o comportamento do avanço se mantém como esperado. Na Figura 33, o avanço possui um efeito positivo maior sobre a rugosidade R_a em comparação com o efeito da profundidade de corte.

Figura 33: Efeito do raio da ferramenta, avanço e profundidade de corte sobre R_a



Fonte: O autor (2023). Software JMP

A profundidade possui uma pequena influência no torneamento da liga de Ti-6Al-4V. Já o raio da ferramenta de corte possui um efeito acentuado e negativo. Esse efeito negativo está conforme diversos estudos sobre o raio da ferramenta, pois a rugosidade superficial é inversamente proporcional ao raio da

ferramenta (PARIDA; RAO; GHOSH, 2020). O comportamento da rugosidade R_z é bastante similar a rugosidade R_a , portanto a profundidade de corte apresenta um efeito quase nulo novamente.

O gráfico de Pareto, ilustrado na Figura 34, permite analisar o real efeito dos principais parâmetros e das suas interações (f^*R , R^*a e f^*a) sobre as rugosidades estabelecidas. Os valores obtidos de P-valor para R_z foram similares aos de R_a .

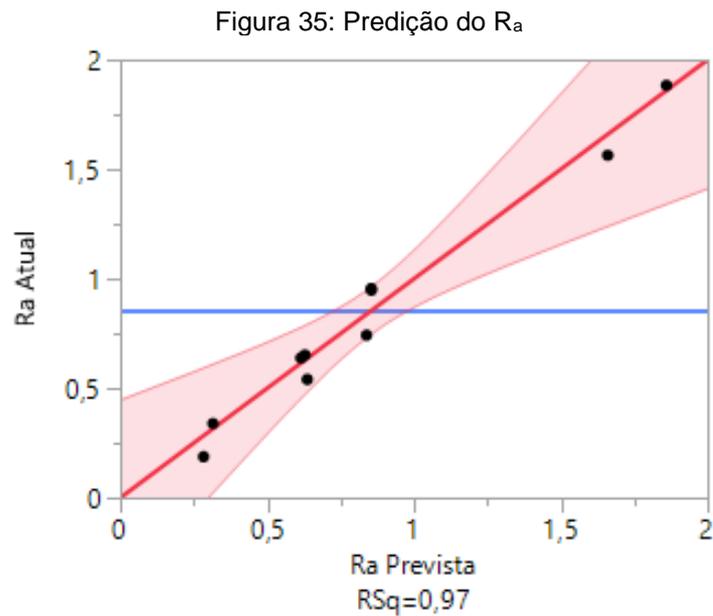
Figura 34: Significância dos fatores e suas interações na resposta R_a

| Fonte | Significância | Pvalor |
|-----------------|---------------|--------|
| f(mm/rev) | 2,987 | 0,0010 |
| R(mm) | 2,743 | 0,0018 |
| R(mm)*f(mm/rev) | 1,724 | 0,0189 |
| a(mm) | 0,560 | 0,2752 |
| f(mm/rev)*a(mm) | 0,412 | 0,3870 |
| R(mm)*a(mm) | 0,018 | 0,9589 |

Fonte: O autor (2023). Software JMP

De acordo com a Figura 34, o avanço e o raio da ferramenta são os parâmetros que possuem significância sobre o processo de torneamento da liga de Ti-6Al-4V. Contudo, o avanço é o principal fator a ser analisado quando se trata do torneamento desta liga. Além disto, a interação destes parâmetros (f^*R) também possui significância sobre o processo. Já os fatores a , f^*a e R^*a não são considerados significativos no processo. Contudo o tipo de processo a ser empregado pode modificar esse cenário de resultados. O estudo mostra que o avanço e a profundidade de corte são significativos no controle da rugosidade no torneamento de peças com pequenos diâmetros, já a velocidade de corte não atende ao nível de significância de $Pvalor < 0,05$ (ASLANTAS et al, 2020).

É possível realizar a estimativa dos parâmetros para todos os termos do modelo, utilizando a análise de variância (ANOVA) para a modelagem da rugosidade média R_a . A Figura 35 mostra o ótimo ajuste ($R^2 \text{ adj} = 97\%$) do modelo a ser empregado para a rugosidade R_a .

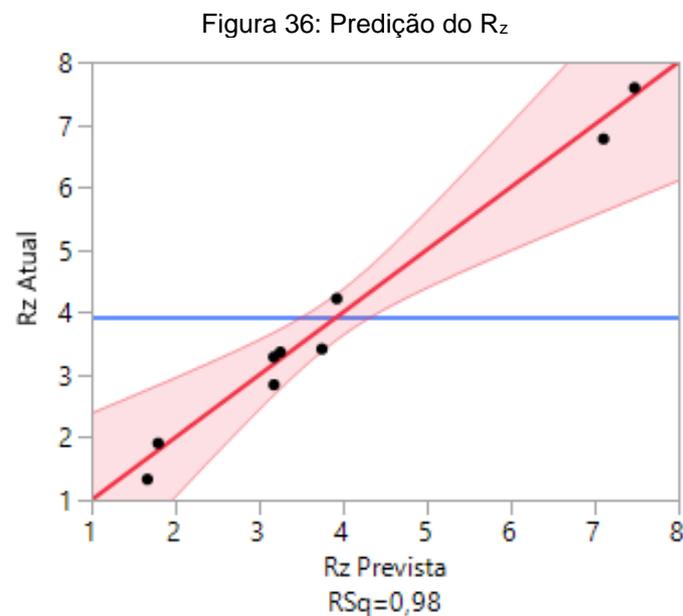


Fonte: O autor (2023). Software JMP

A equação 22 apresenta o modelo matemático linear para R_a , que foi obtido utilizando apenas as variáveis significativas.

$$R_a = 0,855 + 0,392f - 0,338r - 0,175fr \quad (22)$$

A Figura 36 mostra que a confiabilidade encontrada é de 98% para o modelo linear de R_z . Por meio do qual é possível visualizar nenhum ponto fora da margem de erro do sistema.



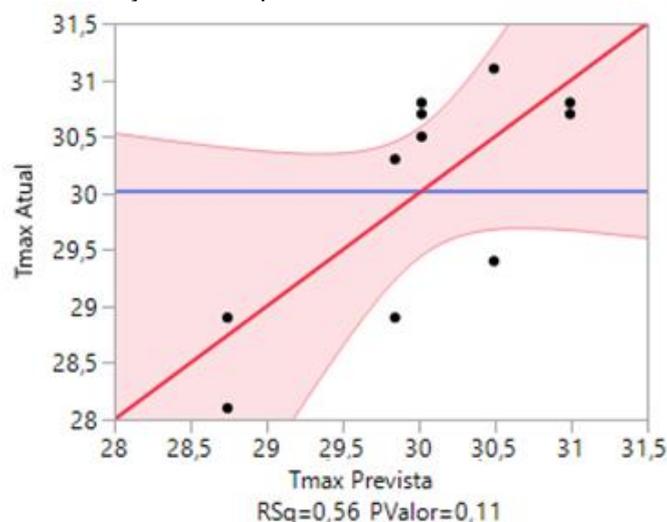
Fonte: O autor (2023). Software JMP

A equação 23 apresenta o modelo matemático linear para R_z , que foi obtido utilizando apenas os parâmetros significativos.

$$R_z = 3,925 + 1,471f - 1,309r - 0,587fr \quad (23)$$

A temperatura máxima da ferramenta de corte é uma outra variável de resposta que pode ser analisada nesta técnica utilizada, contudo o modelo elaborado não possui um bom ajuste (R^2 adj = 56%). Além disto, o P-valor do modelo é maior que 5% (Figura 37). Portanto, não é possível prever de forma satisfatória a influência de cada parâmetro na temperatura máxima da ferramenta de corte nesta segunda etapa.

Figura 37: Predição da temperatura máxima da ferramenta de corte



Fonte: O autor (2023). Software JMP

4.3 SEGUNDA FASE DE EXPERIMENTOS UTILIZANDO A TÉCNICA *DEFINITIVE SCREENING DESIGN*

Na análise preliminar dos experimentos da segunda fase, mais de um parâmetro significativo foi observado, então uma técnica mais robusta foi desenvolvida. O *definitive screening design* permite obter modelagem quadrática, onde o objetivo principal é obter valores a serem utilizados para minimizar a rugosidade, dentro da faixa estudada dos parâmetros de corte. A Tabela 10 mostra que as corridas da técnica anterior (2^3 com 3 pontos centrais) foram mantidas e 8 corridas foram adicionadas. Para manter o cenário da técnica anterior, a velocidade de corte foi mantida em 100 m/min e a temperatura do fluido selecionada foi de 15,0 °C. Através da Tabela 10 é verificado que a

rugosidade R_a ultrapassa o valor aceitável para aplicações aeroespaciais (entre 0,8-1,6 μm).

Tabela 10: Medição da rugosidade (R_a e R_z) pelo *definitive screening design*

| N | R (mm) | f (mm/rev) | a (mm) | R_a (μm) | U_{Ra} (μm) | R_z (μm) | U_{Rz} (μm) |
|----|-----------|---------------|-----------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 0,64 | 0,02 | 3,28 | 0,06 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | 0,19 | 0,03 | 1,3 | 0,1 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 1,564 | 0,007 | 6,8 | 0,1 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | 0,652 | 0,008 | 3,4 | 0,1 |
| 5 | 1 | 1 | -1 | 0,699 | 0,009 | 3,4 | 0,2 |
| 6 | -1 | -1 | 1 | 0,541 | 0,02 | 2,8 | 0,2 |
| 7 | -1 | -1 | 1 | 0,52 | 0,06 | 2,8 | 0,1 |
| 8 | 1 | -1 | 1 | 0,339 | 0,005 | 1,9 | 0,1 |
| 9 | -1 | 1 | 1 | 1,88 | 0,01 | 7,59 | 0,07 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 0,74 | 0,03 | 3,4 | 0,1 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0,951 | 0,009 | 4,22 | 0,02 |
| 12 | 0 | -1 | -1 | 0,46 | 0,06 | 2,65 | 0,09 |
| 13 | 0 | 1 | 1 | 1,60 | 0,02 | 5,6 | 0,1 |
| 14 | 1 | 0 | 1 | 0,37 | 0,01 | 2,8 | 0,1 |
| 15 | 1 | -1 | 0 | 0,32 | 0,02 | 1,8 | 0,1 |
| 16 | -1 | 0 | -1 | 0,87 | 0,05 | 5,78 | 0,08 |
| 17 | -1 | 1 | 0 | 1,73 | 0,02 | 7,1 | 0,2 |

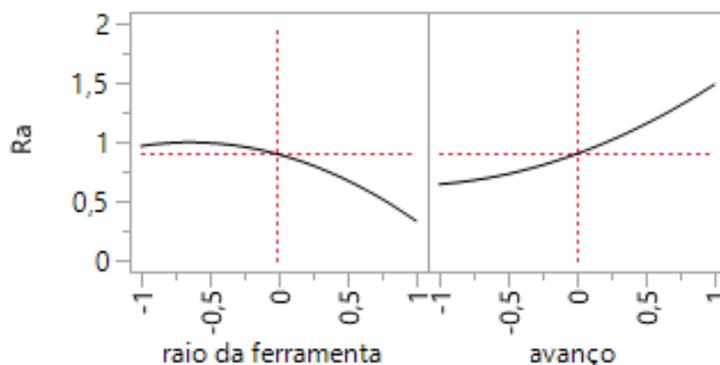
Fonte: O autor (2023).

4.3.1 Design de experimentos

Na técnica *definitive screening design*, o *software* JMP já elimina o parâmetro que não é significativo no processo de torneamento. Portanto os gráficos de efeitos e de Pareto só mostram os parâmetros significativos para a rugosidade. Através da Figura 38 é possível visualizar que, no estudo da rugosidade R_a , o coeficiente quadrático é obtido tanto para o avanço como para o raio da ferramenta de corte. Assim, diferentemente do modelo linear, o ponto

ótimo poderá se encontrar fora do nível inferior para o avanço e do nível superior para o raio da ferramenta de corte.

Figura 38: Efeito do raio da ferramenta e avanço sobre R_a



Fonte: O autor (2023). Software JMP

A Figura 38, mostra resultados que corroboram com a técnica anterior, onde com o incremento no avanço há um aumento na rugosidade R_a . O oposto ocorre com o raio da ferramenta de corte. A Figura 39 mostra todos os parâmetros e suas interações que obtiveram P valor menor que 5%.

Figura 39: Significância dos fatores e suas interações na resposta R_a

| Fonte | Significância | Pvalor |
|---------------------|---------------|--------|
| f(mm/rev) | 7,501 | 0,0000 |
| R(mm) | 6,256 | 0,0000 |
| R(mm)*f(mm/rev) | 3,787 | 0,0002 |
| R(mm)*R(mm) | 2,151 | 0,0071 |
| f(mm/rev)*f(mm/rev) | 1,306 | 0,0494 |

Fonte: O autor (2023). Software JMP

Conforme a técnica anterior, a profundidade de corte não possui significância no estudo da rugosidade R_a através do torneamento da liga de Ti-6Al-4V. As interações da profundidade de corte continuam fora da análise (f^*a e R^*a) e seu termo quadrático (a^*a) também não possui significância para o sistema. Já no estudo da rugosidade R_z , o termo quadrático do raio da ferramenta de corte (R^*R) não possui significância no processo, conforme a Figura 40.

Figura 40: Significância dos fatores e suas interações na resposta R_z

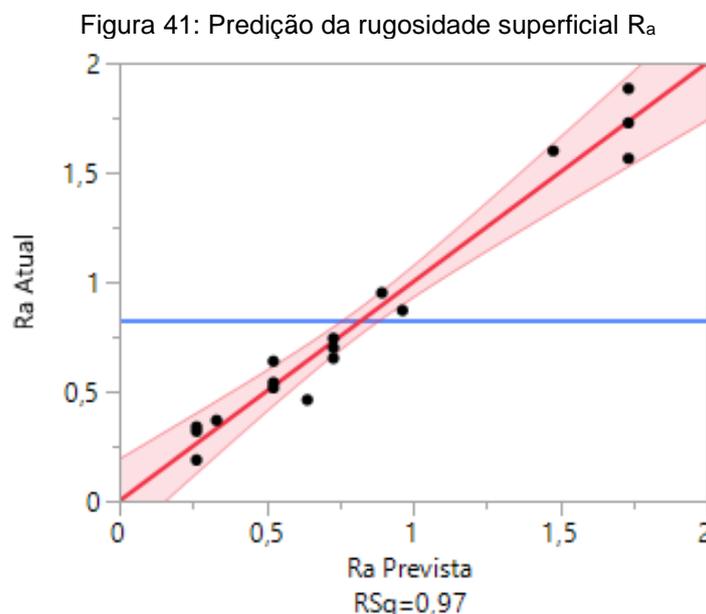
| Fonte | Significância | Pvalor |
|-----------------|---------------|--------|
| f(mm/rev) | 9,857 | 0,0000 |
| R(mm) | 9,193 | 0,0000 |
| R(mm)*f(mm/rev) | 5,253 | 0,0000 |

| Fonte | Significância | Pvalor |
|---------------------|---------------|--------|
| f(mm/rev)*f(mm/rev) | 1,523 | 0,0299 |

Fonte: O autor (2023). Software JMP

Para as duas rugosidades estudadas o avanço continua sendo a variável com maior influência sobre o processo, seguido pelo raio da ferramenta. A menor influência está nos termos quadráticos.

Por meio da análise de variância (ANOVA) foi desenvolvido o modelo quadrático para as rugosidades R_a e R_z . A Figura 41 mostra o ajuste (R^2 adj = 97%) do modelo desenvolvido para a rugosidade R_a .



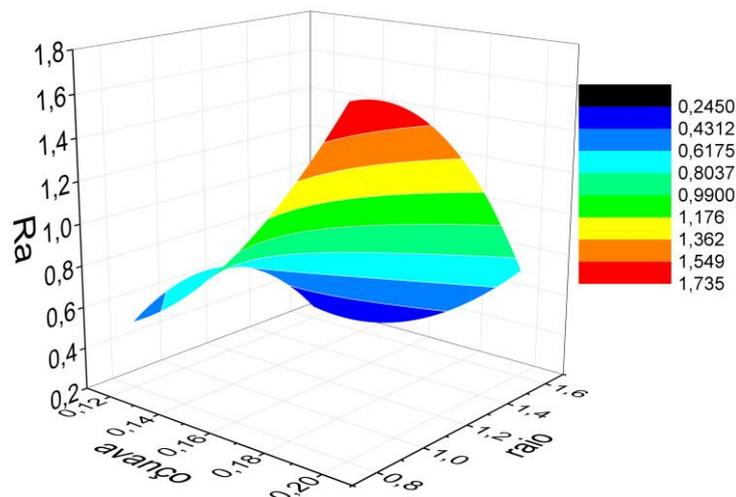
Fonte: O autor (2023). Software JMP

A equação 24 apresenta o modelo matemático quadrático para R_a , no qual foram retirados os parâmetros que não obtiveram P-valor menor que 5%.

$$R_a = 0,894 + 0,165f^2 - 0,246r^2 + 0,419f - 0,316r - 0,186fr \quad (24)$$

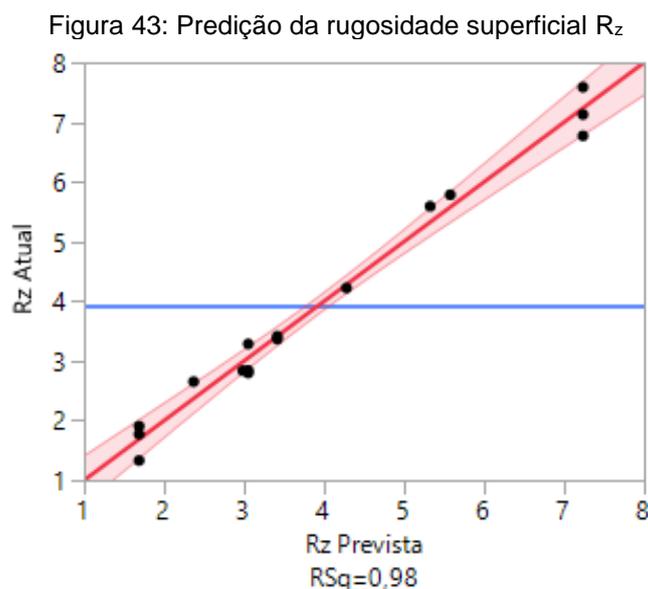
Realizando todas as combinações, com duas casas decimais, dentro do intervalo superior e inferior de cada parâmetro é obtido o gráfico, conforme a Figura 42. Por meio deste gráfico, é verificado que o ponto de mínimo local para R_a se encontra no avanço de 0,13 mm/rev e raio da ferramenta de 1,6 mm.

Figura 42: Superfície de R_a em função do avanço e do raio da ferramenta de corte



Fonte: O autor (2023).

A Figura 43 mostra que o ajuste encontrado é de 98% para o modelo quadrático de R_z . Por meio do qual é possível visualizar alguns pontos no limite da margem de erro do sistema, mas nenhum ponto fora.

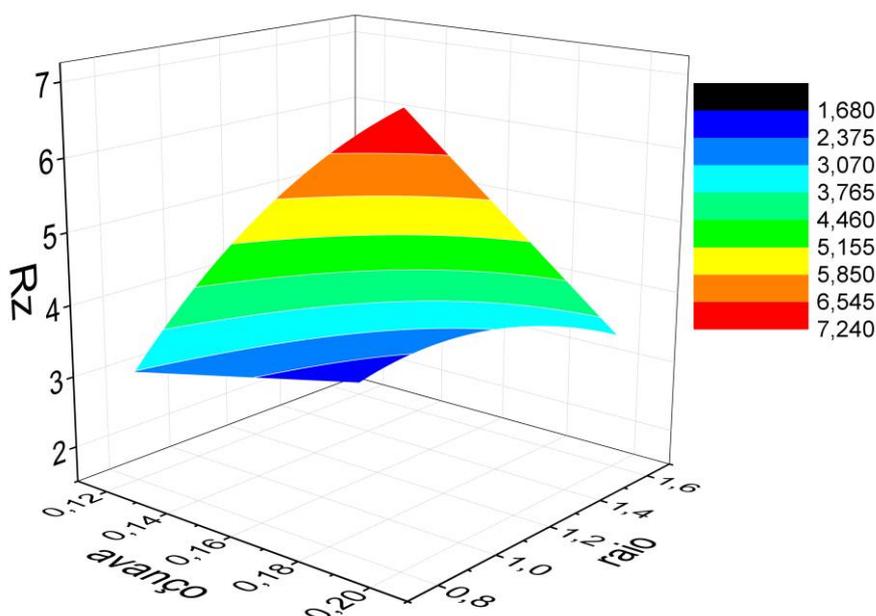


Fonte: O autor (2023). Software JMP

A equação 25 apresenta o modelo matemático quadrático para R_z , que foi desenvolvido utilizando apenas os parâmetros significativos.

$$R_z = 4,281 - 0,433f^2 + 1,478f - 1,296r - 0,614fr \quad (25)$$

Ao realizar todas as combinações, com duas casas decimais, entre o nível inferior e superior é obtido o gráfico, conforme a Figura 44. O ponto de mínimo local se encontra no avanço 0,12 mm/rev e raio da ferramenta de 1,6 mm na análise da rugosidade R_z .

Figura 44: Superfície de R_z em função do avanço e do raio da ferramenta de corte

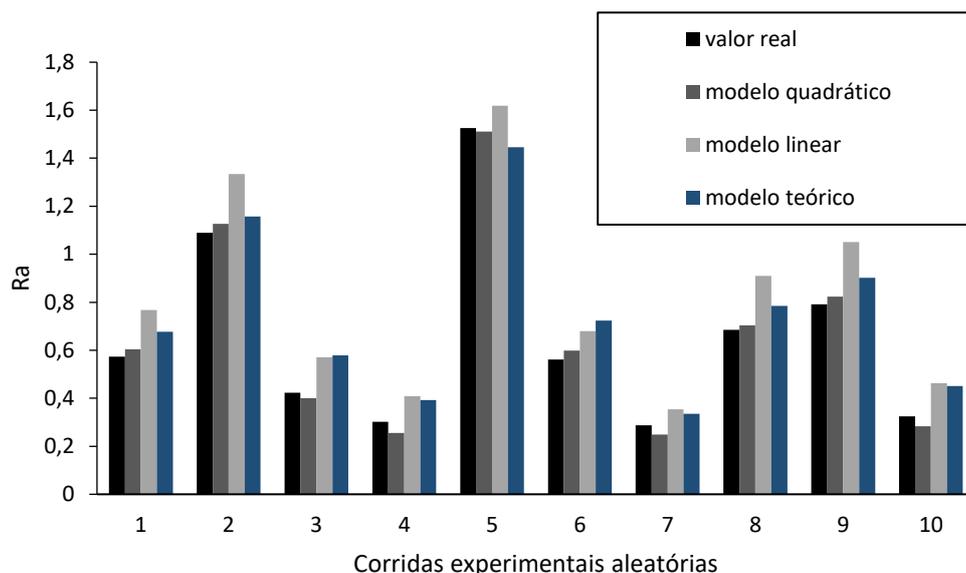
Fonte: O autor (2023).

4.4 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

No torneamento, caso o avanço seja menor que o raio de ponta da ferramenta, a rugosidade média teórica pode ser aproximada pela equação 26, onde R_a é expresso em milímetros, f em mm/rev e R é expresso em milímetros (GILLIBRAND; SARWAR; PIERCE, 1996).

$$R_{a(\text{teórico})} = \frac{f^2}{31,2R} \quad (26)$$

Para validar os modelos experimentais obtidos nesta pesquisa foram realizados 10 testes aleatórios, no qual os valores atribuídos para os parâmetros se encontraram entre os níveis inferiores e superiores. Através da Figura 45 é possível comparar os valores medidos de R_a nesse 10 teste (valor real), com valor obtido no modelo quadrático (equação 24), no modelo linear (equação 22) e no modelo teórico (equação 26).

Figura 45: Comparação dos modelos de R_a estabelecidos nesta pesquisa com o valor real

Fonte: O autor (2023).

A Figura 45 mostra que o modelo quadrático da rugosidade R_a chegou mais próximo do valor real. A flutuação é verificada através da equação 27. A equação 27 relaciona o valor real (v_{real}) com o valor previsto em cada modelo proposto (v_{modelo}) nos 10 testes executados ($N=10$).

$$Flutuação = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{v_{real} - v_{modelo}}{v_{real}} \right| \quad (27)$$

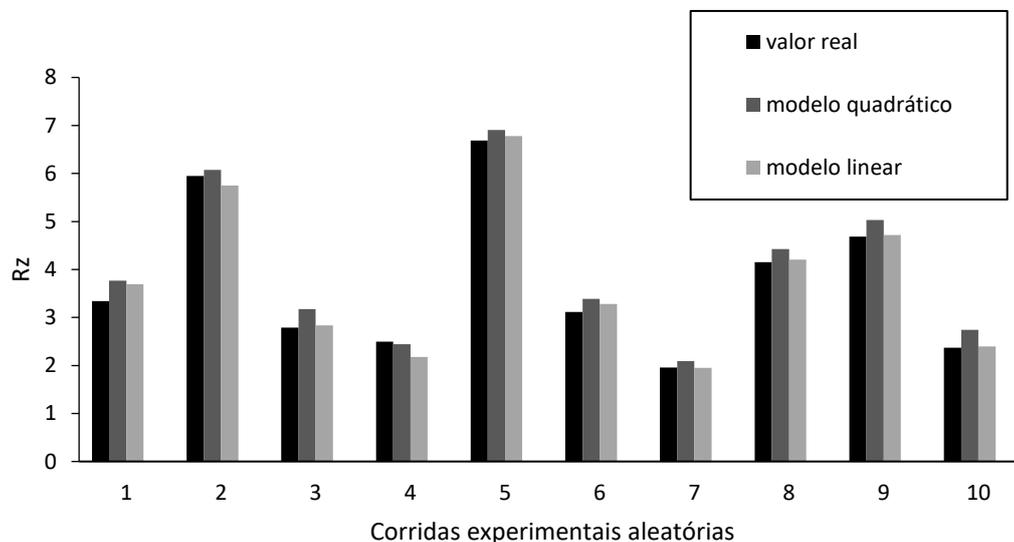
Através da equação 27, é verificado uma flutuação de 6,9% para o modelo quadrático, uma flutuação de 28,5% para o modelo linear e 20,9% para o modelo teórico. Portanto, o modelo quadrático é recomendado por esta pesquisa para prever a rugosidade R_a no torneamento da liga de Ti-6Al-4V.

A equação 24 (modelo quadrático) obtida através dos resultados experimentais possui uma distinção da equação teórica (equação 26). A equação teórica é aplicada a diversos materiais, contudo o processo de torneamento é influenciado pelo tipo de material a ser usinado. Assim a equação quadrática leva em conta o material torneado, podendo, portanto, aplicar somente a liga de Ti-6Al-4V.

Uma análise semelhante foi elaborada para verificar qual modelo prevê melhor a rugosidade R_z , Figura 46. O modelo quadrático apresentou uma flutuação de 7,9%, já o modelo linear apresentou uma flutuação de 3,8%.

Portanto, no estudo da rugosidade R_z da liga de Ti-6Al-4V o modelo linear é o mais recomendado.

Figura 46: Comparação dos modelos de R_z estabelecidos nesta pesquisa com o valor real



Fonte: O autor (2023).

4.5 ANÁLISE ECONÔMICA

A pesquisa, que detalha a utilização deste sistema de refrigeração úmida com controle de temperatura, mostra que o emprego deste processo de refrigeração é mais econômico que a refrigeração criogênica e os sistemas de jato de alta pressão (ARAÚJO et al, 2019). O custo de um processo de usinagem (K_p) é aquele incorrido diretamente no corte do material e é obtido através da soma dos custos da mão-de-obra (K_{us}), de máquina (K_{um}) e da ferramenta (K_{uf}), conforme equação 28 (DINIZ, MARCONCES, COPPINI, 2001).

$$k_p = k_{us} + k_{um} + k_{uf} \quad (28)$$

Considerando dois cenários do torneamento com refrigeração úmida, com controle de temperatura, no qual a temperatura do fluido é o único parâmetro de corte que varia no processo. Então k_{uf} será o fator diferencial no custo do processo de usinagem, já que os demais fatores são mantidos em cada cenário. O custo da ferramenta é dado por:

$$k_{uf} = \frac{t_c}{T'} C_3 \quad (29)$$

Onde C_3 é a constante de custo relativo à ferramenta, t_c é o tempo de corte e T' é a vida da ferramenta. No processo de torneamento com a temperatura controlada tem-se $K_{uf(10^\circ C)}$ para a temperatura de $10,0^\circ C$ e $K_{uf(20^\circ C)}$ para a temperatura de $20,0^\circ C$. O tempo de corte será igual, pois a velocidade de corte é a mesma nos dois cenários. A relação do custo da ferramenta de cada cenário será:

$$\frac{k_{uf(10^\circ C)}}{k_{uf(20^\circ C)}} = \frac{T'_{20,0^\circ C}}{T'_{10,0^\circ C}} \quad (30)$$

A rugosidade é um possível critério de vida da ferramenta. Devido ao desgaste da ferramenta de corte no decorrer da usinagem, a rugosidade tende a aumentar com o uso prolongado da mesma aresta de corte. Nas corridas 1 e 5 (Tabela 8) a temperatura vai de $10,0^\circ C$ para $20,0^\circ C$ e a rugosidade R_a passa de $0,31 \mu m$ para $0,42 \mu m$. Assim é necessário realizar mais vezes a corrida 1, mantendo a aresta de corte, até que a rugosidade alcance o valor de apenas uma usinagem da corrida 5. Considerando um aumento de 15% da rugosidade R_a para cada passe adicional, a vida da ferramenta lubrificada a $10,0^\circ C$ seria aproximadamente o triplo. Portanto estima-se uma redução de 66,7% do custo da ferramenta.

5 CONCLUSÃO

Para entender as dificuldades no processo de torneamento das ligas de titânio, a pesquisa desenvolvida buscou estudar as propriedades do titânio e suas ligas. Assim foi possível analisar os motivos do desgaste na ferramenta de corte.

O presente trabalho utilizou dados da literatura para identificar os níveis de cada parâmetro de corte a ser utilizado no processo de torneamento da liga de Ti-6Al-4V.

Com base nos resultados obtidos para torneamento longitudinal da liga Ti-6Al-4V usando duas técnicas de planejamento de experimentos (DOE), as seguintes conclusões podem ser tiradas:

Na primeira etapa, uma baixa rugosidade R_a foi obtida (0,29-0,90 μm) usando as variáveis avanço, velocidade de corte e temperatura do fluido, onde apenas o avanço foi considerado uma variável importante para o acabamento superficial. No entanto, este estudo mostrou que a velocidade de corte e a temperatura do fluido influenciam diretamente no desgaste da ferramenta, conforme pôde ser apresentado nos resultados da pesquisa, o que reforça pesquisas realizadas por outros autores sobre a mesma temática. Além disto, é verificado a importância da manutenção da temperatura com valores baixos para reduzir os efeitos da difusão atômica e, conseqüentemente, diminuir o desgaste (perda de massa da ferramenta de corte).

Em outro cenário (segunda etapa), o valor R_a da rugosidade aumentou significativamente (0,19-1,88 μm) com o uso de outras variáveis (avanço, raio da ferramenta e profundidade de corte). Isso se deve à relação inversa entre o raio da ferramenta e a rugosidade.

Os modelos linear e quadrático obtidos fornecem uma boa predição com ajuste dos parâmetros de rugosidade R_a e R_z acima de 95%, mostrando que o avanço e o raio da ferramenta de corte têm maior influência nos parâmetros de rugosidade. Assim os parâmetros que fornecem os melhores valores de R_a foram descritos pelo avanço de 0,13 mm/rev e raio da ferramenta de 1,6 mm.

A validação dos modelos foi analisada na prática por valores aleatórios dos parâmetros. Ao comparar os modelos linear e quadrático, verificou-se que o modelo quadrático melhor descreveu a rugosidade R_a com uma flutuação de

6,9%. Já para a rugosidade R_z , o modelo linear torna-se mais satisfatório com flutuação de 3,8%.

Portanto, os parâmetros especificados neste estudo podem ser utilizados no torneamento da liga de Ti-6Al-4V, pois o desgaste da ferramenta é mínimo, mas deve-se ter cuidado na seleção da velocidade de corte, pois o surgimento da aresta de corte faz com que a ferramenta de corte desgaste e, assim, aumenta a rugosidade.

REFERÊNCIAS

- ABNT, NBRISO. 4288. Especificações geométricas do produto (GPS)-Rugosidade: Método do perfil-Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. 10p, 2008.
- AGRAWAL, Chetan et al. Comprehensive analysis of tool wear, tool life, surface roughness, costing and carbon emissions in turning Ti–6Al–4V titanium alloy: Cryogenic versus wet machining. **Tribology International**, v. 153, p. 106597, 2021.
- AIRAO, Jay et al. Sustainable cooling strategies to reduce tool wear, power consumption and surface roughness during ultrasonic assisted turning of Ti-6Al-4V. **Tribology International**, v. 169, p. 107494, 2022.
- ALI KHAN, Muhammad et al. Statistical analysis of energy consumption, tool wear and surface roughness in machining of Titanium alloy (Ti-6Al-4V) under dry, wet and cryogenic conditions. **Mechanical Sciences**, v. 10, n. 2, p. 561-573, 2019.
- ANTONY, Jiju. **Design of experiments for engineers and scientists**. Elsevier, 2023.
- ARAÚJO, Rogério Pontes et al. Analysis of the surface roughness and cutting tool wear using a vapor compression assisted cooling system to cool the cutting fluid in turning operation. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 44, p. 38-46, 2019.
- ARBIZU, I. Puertas; PEREZ, CJ Luis. Surface roughness prediction by factorial design of experiments in turning processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143, p. 390-396, 2003.
- ARRAZOLA, P.-J. et al. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). **Journal of materials processing technology**, v. 209, n. 5, p. 2223-2230, 2009.
- ARRAZOLA, Pedro Jose et al. Recent advances in modelling of metal machining processes. **Cirp Annals**, v. 62, n. 2, p. 695-718, 2013.
- ASHMAWY, Mayar; ELSHEIKH, Ammar; ELKASSAS, Ahmed. A Review of Cooling and Lubrication Techniques for Machining Difficult-to-cut Material. **Journal of Engineering Research**, v. 7, n. 1, p. 21-31, 2023.
- ASLANTAS, Kubilay et al. Investigations on surface roughness and tool wear characteristics in micro-turning of Ti-6Al-4V alloy. **Materials**, v. 13, n. 13, p. 2998, 2020.
- AWOPETU, O. O.; DAHUNSI, O. A.; ADEROBA, A. A. Selection of Cutting Tool for Turning α -Titanium Alloy BT5. **Assumption University Journal of Technology**, v. 8, n. 4, p. 196-202, 2005.

BARALIĆ, Jelena; MITROVIĆ, Anđelija; RADOVIĆ, Maja. Flank wear as a function of cutting time. 2022.

BATHINI, Udaykar et al. A study of the tensile deformation and fracture behavior of commercially pure titanium and titanium alloy: influence of orientation and microstructure. **Journal of materials engineering and performance**, v. 19, p. 1172-1182, 2010.

BERMINGHAM, M. J.; PALANISAMY, S.; DARGUSCH, M. S. Understanding the tool wear mechanism during thermally assisted machining Ti-6Al-4V. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 62, p. 76-87, 2012.

BOYER, Renee R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. **Materials Science and Engineering: A**, v. 213, n. 1-2, p. 103-114, 1996.

BOYER, Rodney R. Titanium and its alloys: metallurgy, heat treatment and alloy characteristics. **Encyclopedia of Aerospace Engineering, American Cancer Society**, 2010.

CALLISTER JR, William D, RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais** - uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAROU, D. et al. Experimental study for the effective and sustainable repair and maintenance of bars made of Ti-6Al-4V alloy. Application to the aeronautic industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 465-475, 2017.

ÇELIK, Yahya Hışman; FIDAN, Şehmus. Analysis of cutting parameters on tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy by multiple linear regression and genetic expression programming methods. **Measurement**, v. 200, p. 111638, 2022.

CHE-HARON, C. H. Tool life and surface integrity in turning titanium alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 118, n. 1-3, p. 231-237, 2001.

CHOWDHURY, Mohammad. **Wear Behaviour of Coated Carbide Tools During Machining of Ti6Al4V Aerospace Alloy**. 2016. Tese de Doutorado.

COPPINI, Nivaldo Lemos; DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos. Tecnologia de Usinagem dos Materiais. **São Paulo: Art Liber Editora**, p. 244, 2000.

D'MELLO, Grynal; PAI, P. Srinivasa; PUNEET, N. P. Optimization studies in high speed turning of Ti-6Al-4V. **Applied Soft Computing**, v. 51, p. 105-115, 2017.

- DA SILVA, Marcio Bacci; WALLBANK, James. Cutting temperature: prediction and measurement methods—a review. **Journal of materials processing technology**, v. 88, n. 1-3, p. 195-202, 1999.
- DA SILVA, Rosemar B. et al. Surface integrity and tool life when turning of Ti-6Al-4V with coolant applied by different methods. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, n. 5, p. 1893-1902, 2017.
- DAVIM, J. Paulo (Ed.). **Modern machining technology: a practical guide**. Elsevier, 2011.
- DE OLIVEIRA, Juliano Aparecido et al. Analysis of the micro turning process in the Ti-6Al-4V titanium alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 9, p. 4009-4016, 2017.
- DINIZ, A.E., MARCONCES, F.C., COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 3ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.
- EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M. Titanium alloys and their machinability—a review. **Journal of materials processing technology**, v. 68, n. 3, p. 262-274, 1997.
- FARKAS, G.; DRÉGELYI-KISS, Á. Measurement uncertainty of surface roughness measurement. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 012020.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Editora blucher, 2018.
- FROES, FHe (Ed.). **Titanium: physical metallurgy, processing, and applications**. ASM international, 2015.
- GADELMAWLA, E. S. et al. Roughness parameters. **Journal of materials processing Technology**, v. 123, n. 1, p. 133-145, 2002.
- BRANDES, Eric Adolph; BROOK, G. B. (Ed.). **Smithells metals reference book**. Elsevier, 2013.
- GARCÍA-MARTÍNEZ, Enrique et al. Métodos de lubrificação sustentáveis para usinagem de ligas de titânio: uma visão geral. **Materiais**, v. 12, n. 23, pág. 3852, 2019.
- GARUD, Sushant S.; KARIMI, Iftekhar A.; KRAFT, Markus. Design of computer experiments: A review. **Computers & Chemical Engineering**, v. 106, p. 71-95, 2017.
- GENGA, R. M. et al. Effects of Mo₂C, Ni binder and laser surface modification on WC inserts for turning Ti-6Al-4V. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 87, p. 105145, 2020.

GILLIBRAND, D.; SARWAR, M.; PIERCE, C. T. The economic benefit of finish turning with coated carbide. **Surface and Coatings Technology**, v. 86, p. 809-813, 1996.

GRIGORIEV, Sergey N.; FEDOROV, Sergey V.; HAMDY, Khaled. Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cutting tools– a review. **Manufacturing Review**, v. 6, p. 19, 2019.

GUM, ISO. Avaliação de dados de Medição-Guia para a expressão de incerteza de medição. **1ª edição brasileira**, 2008.

GUPTA, Munish Kumar et al. Experimental characterisation of the performance of hybrid cryo-lubrication assisted turning of Ti-6Al-4V alloy. **Tribology International**, v. 153, p. 106582, 2021.

GUPTA, Munish Kumar et al. Modeling and performance evaluation of Al₂O₃, MoS₂ and graphite nanoparticle-assisted MQL in turning titanium alloy: an intelligent approach. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 42, n. 4, p. 1-21, 2020.

HE, C. L.; ZONG, W. J.; ZHANG, J. J. Influencing factors and theoretical modeling methods of surface roughness in turning process: State-of-the-art. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 129, p. 15-26, 2018.

IQBAL, Asif et al. Sustainable Machining: Tool Life Criterion Based on Work Surface Quality. **Processes**, v. 10, n. 6, p. 1087, 2022.

JAFFERY, S. I.; MATIVENGA, P. T. Assessment of the machinability of Ti-6Al-4V alloy using the wear map approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 40, n. 7, p. 687-696, 2009.

JAMIL, Muhammad et al. Heat transfer efficiency of cryogenic-LN₂ and CO₂-snow and their application in the turning of Ti-6Al-4V. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 166, p. 120716, 2021.

JOCH, Richard et al. Effects of Process Cutting Parameters on the Ti-6Al-4V Turning with Monolithic Driven Rotary Tool. **Materials**, v. 15, n. 15, p. 5181, 2022.

KECHAGIAS, John D. et al. A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy. **Measurement**, v. 151, p. 107213, 2020.

KHANDAI, DEBENDRA KUMAR; MATHEW, JOSE; KURIACHEN, BASIL. FEM modelling of residual stresses of Ti-6Al-4V during micro-turning considering the scale effect. **Sādhanā**, v. 47, n. 2, p. 1-14, 2022.

KHANNA, Navneet; DAVIM, J. P. Design-of-experiments application in machining titanium alloys for aerospace structural components. **Measurement**, v. 61, p. 280-290, 2015.

KOSEKI, Shuho et al. Wear mechanisms of PVD-coated cutting tools during continuous turning of Ti-6Al-4V alloy. **Precision Engineering**, v. 47, p. 434-444, 2017.

KOVAŘÍKOVÁ, Ingrid et al. Study and characteristic of abrasive wear mechanisms. **Materials Science and Technology**, v. 1, p. 1-8, 2009.

KRISHNAN, B. Radha. Review of surface roughness prediction in machining process by using various parameters. **International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER)**, v. 6, n. 1, p. 7-12, 2020.

KUANG, Weijie et al. A short review on the influence of mechanical machining on tribological and wear behavior of components. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 120, n. 3-4, p. 1401-1413, 2022.

KUCHARIKOVA, Eva et al. Cutting fluids management. **Res. Pap. Fac. Mater. Sci. Technol. Trnava Slovak Univ. Technol. Bratisl**, v. 26, p. 33-37, 2009.

KUI, Gary Wong Ang et al. Recent progress and evolution of coolant usages in conventional machining methods: a comprehensive review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 119, n. 1-2, p. 3-40, 2022.

KUMAR, M. Pradeep et al. Study on tool life and its failure mechanisms. **Int. J. Innov. Res. Sci. Technol**, v. 2, n. 4, p. 126-131, 2015.

LAKSHMI, Vennela VK et al. Parametric optimization while turning Ti-6Al-4V alloy in Mist-MQCL (Green environment) using the DEAR method. **Manufacturing Review**, v. 7, p. 38, 2020.

LEYENS, Christoph; PETERS, Manfred (Ed.). **Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications**. Wiley-vch, 2006.

LI, Qiuqin et al. Enhancing the wear performance of WC-6Co tool by pulsed magnetic field in Ti-6Al-4V machining. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 80, p. 898-908, 2022.

LIANG, Xiaoliang et al. Tool wear induced modifications of plastic flow and deformed material depth in new generated surfaces during turning Ti-6Al-4V. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 5, p. 10782-10795, 2020.

LIANG, Xiaoliang; LIU, Zhanqiang; WANG, Bing. Multi-pattern failure modes and wear mechanisms of WC-Co tools in dry turning Ti-6Al-4V. **Ceramics International**, v. 46, n. 15, p. 24512-24525, 2020.

- LIU, Wentao; LIU, Zhanqiang. High-pressure coolant effect on the surface integrity of machining titanium alloy Ti-6Al-4V: a review. **Materials Research Express**, v. 5, n. 3, p. 032001, 2018.
- LIU, Xin et al. Performances of micro-textured WC-10Ni3Al cemented carbides cutting tool in turning of Ti6Al4V. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 84, p. 104987, 2019.
- LIU, Xuanyong; CHU, Paul K.; DING, Chuanxian. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 47, n. 3-4, p. 49-121, 2004.
- LOPES, Éder Sócrates Najar. Correlação entre transformações de fases e comportamento mecânico de ligas Ti-Nb-Sn e sua aplicação na concepção de implantes ortopédicos com propriedades otimizadas. **Campinas: Universidade Estadual de Campinas-Faculdade de Engenharia Mecânica**, 2009.
- MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher, 2015.
- MELLO, Amanda Oliveira et al. Comparison between the machinability of different titanium alloys (Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb) employing the multi-objective optimization. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 43, n. 11, p. 1-14, 2021.
- MIA, Mozammel et al. Mono-objective and multi-objective optimization of performance parameters in high pressure coolant assisted turning of Ti-6Al-4V. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 1, p. 109-118, 2017.
- MIA, Mozammel; KHAN, Md Awal; DHAR, Nikhil Ranjan. Performance prediction of high-pressure coolant assisted turning of Ti-6Al-4V. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 5, p. 1433-1445, 2017.
- MIA, Mozammel; KHAN, Md Awal; DHAR, Nikhil Ranjan. Study of surface roughness and cutting forces using ANN, RSM, and ANOVA in turning of Ti-6Al-4V under cryogenic jets applied at flank and rake faces of coated WC tool. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, n. 1, p. 975-991, 2017.
- MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. John Wiley & sons, 2017.
- NGUYEN, Dinh et al. Microstructural impact on flank wear during turning of various Ti-6Al-4V alloys. **Wear**, v. 384, p. 72-83, 2017.

O'SULLIVAN, Denis; COTTERELL, Matthew. Temperature measurement in single point turning. **Journal of materials processing technology**, v. 118, n. 1-3, p. 301-308, 2001.

OBIKO, Japheth Oirere; MWEMA, Fredrick Madaraka; BODUNRIN, Michael Oluwatosin. Validation and optimization of cutting parameters for Ti-6Al-4V turning operation using DEFORM 3D simulations and Taguchi method. **Manufacturing Review**, v. 8, p. 5, 2021.

OUTEIRO, José et al. Modelling and Optimization of Machining of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Using Machine Learning and Design of Experiments Methods. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 6, n. 3, p. 58, 2022.

PARIDA, Asit Kumar; RAO, Paruchuri Venkatswar; GHOSH, Sudarsan. Machinability study of Ti-6Al-4V alloy using solid lubricant. **Sādhanā**, v. 45, n. 1, p. 1-8, 2020.

PIMENOV, Danil Yu et al. Improvement of machinability of Ti and its alloys using cooling-lubrication techniques: A review and future prospect. **journal of materials research and technology**, v. 11, p. 719-753, 2021.

POLISHETTY, Ashwin et al. A preliminary assessment of machinability of titanium alloy ti 6al 4 v during thin wall machining using trochoidal milling. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 357-364, 2014.

QEHAJA, Nexhat; KYÇYKU, Azem; ZHUJANI, Fatlume. Tool wear modeling of hardened 42CrMo4 steel depending on cutting parameters and workpiece material hardness during turning process. **Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara**, v. 15, n. 4, p. 117-122, 2017.

RAMESH, S.; KARUNAMOORTHY, L.; PALANIKUMAR, K. Measurement and analysis of surface roughness in turning of aerospace titanium alloy (gr5). **Measurement**, v. 45, n. 5, p. 1266-1276, 2012.

REED, Roger C. **The superalloys: fundamentals and applications**. Cambridge university press, 2008.

REVURU, Rukmini Srikant et al. Optimization of titanium alloys turning operation in varied cutting fluid conditions with multiple machining performance characteristics. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 1, p. 1451-1463, 2018.

RIBEIRO FILHO, Sergio Luiz Moni et al. Influence cutting parameters on the surface quality and corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy in synthetic body environment (SBF) using Response Surface Method. **Measurement**, v. 88, p. 223-237, 2016.

RIZZO, Antonella et al. The critical raw materials in cutting tools for machining applications: A review. **Materials**, v. 13, n. 6, p. 1377, 2020.

SAHU, Neelesh Kumar; ANDHARE, Atul B. Multiobjective optimization for improving machinability of Ti-6Al-4V using RSM and advanced algorithms. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1-12, 2019.

SARGADE, V.; NIPANIKAR, S.; MESHARAM, S. Analysis of surface roughness and cutting force during turning of Ti6Al4V ELI in dry environment. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v. 7, n. 2, p. 257-266, 2016.

SARIKAYA, Murat et al. A state-of-the-art review on tool wear and surface integrity characteristics in machining of superalloys. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 35, p. 624-658, 2021.

SHARMA, Mithun; SHARMA, Shilpi. Critical evaluation into the practical utility of the Design of Experiments. **Engineering Management in Production and Services**, v. 13, n. 3, p. 50-65, 2021.

SHARMA, Vishal S.; DOGRA, Manu; SURI, N. M. Cooling techniques for improved productivity in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 6, p. 435-453, 2009.

SHIVADE, Anand S. et al. Optimization of machining parameters for turning using taguchi approach. **International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN**, p. 2277-3878, 2014.

SINGH, Ajay; DUBEY, Vineet; SHARMA, Anuj Kumar. Thermal modelling of cutting tool under different cutting environment in turning. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

SINGH, Jasjeevan et al. A review on cutting fluids used in machining processes. **Engineering Research Express**, v. 3, n. 1, p. 012002, 2021.

SINGH, Rupinder et al. Wear behavior of textured tools under graphene-assisted minimum quantity lubrication system in machining Ti-6Al-4V alloy. **Tribology International**, v. 145, p. 106183, 2020.

TANG, Lizhi et al. Biological stability of water-based cutting fluids: progress and application. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 35, p. 1-24, 2022.

TAYLOR, Frederick Winslow. **On the art of cutting metals**. American society of mechanical engineers, 1906.

TEKIN, Merve; ERTAN, Rukiye; ÖZGÜL, Hande Güler. Forming evolution of titanium grade2 sheets. **Materials Testing**, v. 64, n. 1, p. 116-124, 2022.

TOBOŁA, Daniel et al. Effect of tribo-layer developed during turning of Ti–6Al–4V ELI alloy on its low-temperature gas nitriding. **Applied Surface Science**, v. 602, p. 154327, 2022.

UPADHYAY, Vikas; JAIN, P. K.; MEHTA, N. K. In-process prediction of surface roughness in turning of Ti–6Al–4V alloy using cutting parameters and vibration signals. **Measurement**, v. 46, n. 1, p. 154-160, 2013.

WILLIAMS, James C.; LUTJERING, G. Titanium. **Basic Properties**, 2007.

YANG, Khor Zheng et al. Application of coolants during tool-based machining—A review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 14, n. 1, p. 101830, 2023.

YEMUL, MR NAGESH NARENDRA et al. Analysis of Tool Wear in Turning Operation of Aluminium. **International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology**, v. 8, n. 2, p. 26-32.

YOUNAS, Muhammad et al. Development and analysis of tool wear and energy consumption maps for turning of titanium alloy (Ti6Al4V). **Journal of Manufacturing Processes**, v. 62, p. 613-622, 2021.

ZHANG, Lai-Chang; CHEN, Liang-Yu; WANG, Liqiang. Surface modification of titanium and titanium alloys: technologies, developments, and future interests. **Advanced Engineering Materials**, v. 22, n. 5, p. 1901258, 2020.

APÊNDICE A – PROGRAMA UTILIZADO

Programa utilizado no torno de Comando Numérico Computadorizado
(CNC)

01 ; PROGRAMA MESTRADO LUIS

02 G99#

03 T00#

04 G54#

05 T0707#

06 M12#

07 G96#

08 S100.#

09 G92 S3000 M03#

10 M06#

11 G00 X58. Z5.#

12 G01 X50.6 F.2#

13 Z-90.#

14 G00 X68.#

15 Z3.#

16 M30#