



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ LAURENTINO DOS SANTOS JUNIOR

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA ROGUSIDADE NO TORNEAMENTO DA
LIGA DE TI-6AL-4V:
utilizando planejamento de experimentos**

Recife

2022

JOSÉ LAURENTINO DOS SANTOS JUNIOR

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA ROGUSIDADE NO TORNEAMENTO DA
LIGA DE TI-6AL-4V:
utilizando planejamento de experimentos**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de
Graduado em Engenharia Mecânica

Orientador: Carlos Augusto do Nascimento Oliveira

Recife

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos Júnior, José Laurentino dos.

Estudo do comportamento da rugosidade no torneamento da liga de Ti-6Al-4V: utilizando planejamento de experimentos. / José Laurentino dos Santos Júnior. - Recife, 2022.

49 : il., tab.

Orientador(a): Carlos Augusto do Nascimento Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2022.

1. Liga de Ti-6Al-4V. 2. Torneamento. 3. Rugosidade. 4. Design of experiments. I. Oliveira, Carlos Augusto do Nascimento. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

JOSÉ LAURENTINO DOS SANTOS JUNIOR

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA ROGUSIDADE NO TORNEAMENTO DA
LIGA DE TI-6AL-4V:
utilizando planejamento de experimentos**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de
Graduado em Engenharia Mecânica

Aprovado em: 07/10/2022

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Adson Beserra da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Luiz Henrique da Costa (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pois o mesmo me guia em todos os momentos da minha vida. A minha família, que sempre me apoiaram em todas as minhas escolhas e me proporcionaram a oportunidade de seguir com os estudos durante minha trajetória. Além disto, me deram uma educação moral de qualidade. Ao meu orientador, o Prof. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira, por ser um ótimo mentor e educador. Por fim, aos demais que contribuíram direta ou indiretamente na minha caminhada.

RESUMO

Devido às características de baixa densidade, alta resistência a tração, resistência à corrosão, a liga de titânio Ti-6Al-4V encontra aplicação nas indústrias aeroespacial, eletrônica, química, mecânica e biomédica. Dentre as diversas propriedades desta liga se destaca a alta resistência mecânica, quando exposta ao ambiente de elevadas temperaturas. Como um meio fabricação de mecânica, a usinagem através de torneamento tem sido amplamente utilizada para a fabricação de diversos componentes nas diversas áreas de aplicação deste material. A qualidade da superfície da peça é uma das características importantes em qualquer processo de usinagem. Como a rugosidade da superfície tem a natureza mais dominante na determinação da qualidade da superfície, ela foi tomada como base para verificar a influência dos parâmetros de corte. Para estudo da rugosidade são realizados procedimentos de usinagem com os parâmetros (0,12mm/rev, 0,16mm/rev e 0,20mm/rev), três de velocidade de corte (60m/min, 80m/min e 100m/min) e três da temperatura para fluido de corte (10°C, 15°C e 20°C). A análise da influência dos parâmetros na rugosidade é realizada com a utilização da metodologia de planejamento de experimentos (DOE), que é um conjunto de técnicas estatísticas que possibilitam o estudo da influência dos diversos fatores de um processo de forma simultânea. Dentre tais parâmetros, este trabalho mostra que o avanço é a variável mais significativa no estudo da rugosidade. A temperatura do fluido de corte não possui uma influência significativa na rugosidade, contudo o processo de refrigeração é essencial para aumentar a vida útil da ferramenta de corte.

Palavras-chave: liga de Ti-6Al-4V; torneamento; rugosidade; *design of experiments*.

ABSTRACT

Due to the characteristics of low density, high tensile strength, corrosion resistance, the titanium alloy Ti-6Al-4V finds application in aerospace, electronics, chemical, mechanical and biomedical industries. Among the various properties of this alloy is its high mechanical strength when exposed to high temperature environment. Therefore, this alloy is suitable to perform in environments that entail high temperatures. As a means of mechanical fabrication, the turning technique has been widely used for the manufacture of various components in the many areas of application of this material. The surface quality of the machined part is one of the important machining characteristics in any machining process. Since surface roughness has the most dominant nature in determining the surface quality, it was taken as a basis to check the influence of cutting parameters. For roughness study three values of feed (0.12mm/rot, 0.16mm/rot and 0.20mm/rot), three of cutting speed (60m/min, 80m/min and 100m/min) and three of cutting fluid temperature (10°C, 15°C and 20°C) are analyzed. The analysis of the influence of the parameters on the roughness is performed using the methodology of design of experiments (DOE), which is a set of statistical techniques that allow the study of the influence of several factors of a process simultaneously. Among these parameters, this work shows that the feed rate is the most significant variable in the study of roughness. The temperature of the cutting fluid does not have a significant influence on roughness, however the cooling process is essential to increase the life of the cutting tool.

Keywords: Ti-6Al-4V alloy; turning; roughness; design of experiments.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Transformação HC para CCC do titânio a 882C°.....	18
Figura 2: Diagrama de fases liga de Ti-6Al-4V com elementos de liga.....	19
Figura 3: Torneamento longitudinal.....	22
Figura 4: Característica da ferramenta de corte.....	28
Figura 5: (a) Processo de usinagem por serramento. (b) Processo de usinagem por torneamento.....	31
Figura 6: Porta ferramenta (em preto) e do inserto para corte de material.....	32
Figura 7: (a) As duas arestas de corte utilizadas da vista superior. (b) As duas arestas de corte utilizadas da vista inferior.....	32
Figura 8: Seções do reservatório.....	33
Figura 9: Componentes do sistema de refrigeração.....	33
Figura 10: Concentricidade garantida pelo contraponto.....	34
Figura 11: Medição da concentricidade com emprego do relógio comparador.....	34
Figura 12: Região de fixação do termopar (em vermelho).....	35
Figura 13: Três pontos de medição da peça usinada.....	37
Figura 14: Gráfico dos efeitos sobre R_a	38
Figura 15: Gráfico dos efeitos sobre R_z	388
Figura 16: Significância dos fatores e suas interações na resposta R_a	39
Figura 17: Significância dos fatores e suas interações na resposta R_z	39
Figura 18: Parâmetros estimados para R_a	40
Figura 19: Gráfico da predição do R_a	40
Figura 20: Parâmetros estimados para R_z	41
Figura 21: Gráfico da predição do R_z	41
Figura 22:(a) Desgaste com T de 10°C, v_c de 60m/min e f de 0,12mm/rev. (b) Desgaste com T de 20°C, v_c de 60m/min e f de 0,12mm/rev.....	42
Figura 23: Gráfico Tempo-Temperatura. Monitoramento dos termopares com T de 10°C, v_c de 60m/min e f de 0,12mm/rev.....	42
Figura 24: Gráfico Tempo-Temperatura. Monitoramento dos termopares com T de 20°C, v_c de 60m/min e f de 0,12mm/rev.....	43
Figura 25: (a) Desgaste com v_c de 60m/min, T de 10°C e f de 0,12mm/rev. (b) Desgaste com v_c de 100m/min, T de 10°C e f de 0,12mm/rev.....	43

Figura 26: (a) Desgaste com v_c de 60m/min, T de 20°C e f de 0,12mm/rev. (b)
Desgaste com v_c de 100m/min, T de 20°C e f de 0,12mm/rev.....44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânica da liga de Ti-6Al-4V	20
Tabela 2: Composição química da liga de Ti-6Al-4V.....	31
Tabela 3: Valores utilizados para cada parâmetro de corte	35
Tabela 4: As treze corridas realizadas no experimento.....	36
Tabela 5: Medição da rugosidade (R_a e R_z) pelo fatorial 2^2 com 5 pontos centrais...	37

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Profundidade de corte
D	Diâmetro externo
E	Módulo de elasticidade
f	Avanço
l_f	Comprimento de corte
Q	Taxa de remoção de material
R_a	Rugosidade média R_a
R_z	Rugosidade média R_z
T	Temperatura do fluido de corte
t_c	Tempo de corte
v_c	Velocidade de corte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	MOTIVAÇÃO	15
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	Objetivo geral	16
1.3.2	Objetivos específicos	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	17
2.1	CLASSIFICAÇÃO DA LIGA DE TITÂNIO	17
2.2	USINAGEM	20
2.2.1	TORNEAMENTO	21
2.2.2	Velocidade de corte (V_c)	23
2.2.3	Tempo de corte (t_c)	24
2.2.4	Avanço	24
2.2.5	Profundidade de corte (ap)	25
2.2.6	Fluido refrigerante	25
2.2.7	Ferramenta de corte	27
2.3	RUGOSIDADE	28
2.3.1	Rugosidade R_a	28
2.3.2	Rugosidade R_z	28
2.4	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO	29
3	METODOLOGIA	30
3.1	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL	30
3.2	PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA	31
3.3	PREPARAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	32
3.4	DESGIN OF EXPERIMENTS	35

3.4 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5 CONCLUSÃO.....	45
REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

Por conta do crescente desenvolvimento na área de ciência e engenharia dos materiais, os estudos referentes ao emprego de novas técnicas de fabricação de ligas com maior performance vêm sendo cada vez mais comum. Nesta classificação estão as ligas de titânio, que estão entre os materiais metálicos mais importantes utilizados por diversas indústrias, como as do setor aeroespacial, automotivo e biomédico. Isso se deve à confiabilidade e funcionalidade dos componentes de titânio, além de sua resistência à corrosão e alta relação resistência/peso (GENGA et al, 2020).

Deste modo, o titânio e suas ligas são de grande importância para as operações desafiadoras desses setores. Segundo Gupta et al (2021), embora essas ligas estejam sendo cada vez mais procuradas em uma ampla variedade de aplicações de engenharia e biomédicas, sua fabricação, especialmente usinagem e retificação, impõe muitas restrições. O desgaste rápido da ferramenta encontrado na usinagem de ligas de titânio, devido sua baixa condutividade térmica, é um desafio que precisa ser superado (NANDY; GOWRISHANKAR; PAUL, 2009). Esta propriedade térmica do Ti-6Al-4V aumenta as taxas de desgaste da ferramenta e reduz a qualidade do acabamento superficial (KOSARAJU; ANNE, 2013). Para superar tal fator diversos estudos sobre lubrificação na usinagem da liga de Ti-6Al-4V vêm sendo elaborado com o objetivo de aumentar substancialmente a vida útil da ferramenta de corte.

A alta temperatura de corte, uma das principais razões para o rápido desgaste da ferramenta e, portanto, a baixa usinabilidade das ligas de titânio, exige uma estratégia de resfriamento eficiente para reduzir a temperatura predominante nas zonas de contato ferramenta e peça. Além de aumentar a vida útil da ferramenta de corte, a lubrificação do material a ser usinado influencia a rugosidade superficial (MIA; KHAN; DHAR, 2017).

A literatura busca o resultado da correta avaliação dos parâmetros de usinagem selecionados para um determinado experimento, assim o objetivo é aumentar qualidade da usinagem e boa qualidade de superfície e baixo consumo de energia são necessários na fabricação (OLIVEIRA, 2017). Além disso, o baixo desgaste da ferramenta é necessário para reduzir os custos.

Os parâmetros de corte para processos de usinagem têm alto impacto no desempenho e são geralmente as variáveis que precisam ser ajustadas para otimizar os modelos. Geralmente, os parâmetros de corte referem-se velocidade de corte,

avanço, profundidade de corte, forças de corte, torque, tipo de fluido refrigerante, entre outros. Por outro lado, os parâmetros para avaliar os resultados de usinagem normalmente incluem rugosidade superficial, potência consumida, tempo de usinagem, custo de produção, vida útil da ferramenta, taxa de produção, entre outros (KOSARAJU; ANNE, 2013; OBIKO; MWEMA; BODUNRIN, 2021). Para obter resultados ótimos é comum realizar avaliação por modelos, que geralmente relacionam as condições de trabalho aos parâmetros de corte e recursos da ferramenta.

Uma importante medida da qualidade do produto obtido como resultado da usinagem é a rugosidade da superfície (KOSARAJU; ANNE, 2013). Portanto, os pesquisadores têm focado em diferentes estratégias para melhorar o acabamento durante a usinagem, que inclui a seleção de parâmetros de processo ótimos ou o desenvolvimento de modelos numéricos eficazes para máquinas-ferramenta.

A análise do experimento por meio da técnica de Design de Experimentos busca apurar a interação dos parâmetros de usinagem e obter a modelagem da rugosidade R_a e R_z . A característica específica deste estudo é a investigação de como a rugosidade é influenciada por cada parâmetro por meio da implementação da metodologia de design de experimentos (DOE, do inglês *desing of experiments*).

1.1 JUSTIFICATIVA

O processo de fabricação mecânica por torneamento de materiais duros está sendo cada vez mais empregado nos últimos anos, no qual o principal foco está no desempenho do material (relação entre performance e custo). Por conta disto, há uma cobrança cada vez maior das novas tecnologias empregadas nos processos industriais. Atualmente, em consequência da melhoria de máquina-ferramentas é possível a usinagem dos materiais duros por meio do processo de torneamento. Neste processo se destaca a utilização do torno CNC, no qual apresenta uma precisão e estabilidade dimensional em altas rotações (NEWMAN et al, 2008.).

O torneamento CNC diminui significativamente o tempo e os custos referentes a produção, além disto melhora a qualidade superficial do produto. Essas vantagens, contudo, só podem ser alcançadas com a escolha correta dos parâmetros de corte, como também da ferramenta de corte a ser empregada (WANG; ZHANG; YANG, 2018). Tais parâmetros possuem influências no acabamento das superfícies usinadas.

Então, neste trabalho é verificada a influência de vários fatores de processo, como por exemplo, a velocidade de corte, o avanço e a temperatura do fluido de corte. Na literatura atual é comum encontrar estudos da influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade, porém normalmente é analisado a influência de cada um deles isoladamente, no qual exige uma permutação completa de todos os parâmetros selecionados para estudo, sendo então um grande número de ensaios. Portanto, tal procedimento exige um alto custo homem-máquina, além de empregar desnecessariamente um desgaste maior da ferramenta de corte.

A preocupação na melhoria do desempenho traz a obrigação das empresas a utilizarem técnicas não usuais de planejamento e melhoria dos processos. Portanto, uma das melhorias possíveis é a construção de modelos matemáticos por meio da análise experimental. Uma técnica estatística conhecida como metodologia de design de experimentos (DOE, do inglês *desing of experiments*), que significa planejar os experimentos com o objetivo de gerar dados adequados para uma análise estatística eficiente, que acarreta em conclusões objetivas e válidas (MANDENIUS; BRUNDIN, 2008).

1.2 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento deste trabalho foi motivado pelo fato dessa liga está sendo utilizada em diversos setores da engenharia. Por conta disso, indústrias têm buscado ampliar o seu desenvolvimento para melhorar a qualidade superficial através dos diversos processos de fabricação (OLIVEIRA, 2017). Além disso, devido à crescente demanda das ligas de titânio vem surgindo uma atenção especial por diversos pesquisadores para superar grandes dificuldades na geração de forma, dimensão e acabamento dessas ligas.

Portanto, é essencial estudar os possíveis meios de fabricar mais rápido e com custos reduzidos. Contudo, isso tem que ser realizado sustentavelmente. Desta forma, as análises estatísticas permitem melhorar o processo de fabricação por meio das conclusões objetivas dos experimentos (MANDENIUS; BRUNDIN, 2008).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo do presente estudo é propor um modelo para prever a rugosidade R_a e R_z com o emprego da metodologia de design de experimentos. Para análise do resultado são usadas técnicas para controle de temperatura, análise da qualidade da superfície e vida da ferramenta de corte. A partir da implementação do modelo, é verificada a influência do controle de temperatura do fluido, do avanço e da velocidade de corte na rugosidade.

1.3.2 Objetivos específicos

- Levantar os parâmetros de usinagem para a liga de titânio em relação ao torneamento;
- Usar uma estratégia de refrigeração na usinagem do material;
- Realizar a usinagem por torneamento da peça e avaliar a vida da ferramenta de corte;
- Examinar a qualidade da superfície através da rugosidade;
- Desenvolver um modelo analítico para descrição da rugosidade.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em quatro capítulos. No capítulo 1 é apresentado a problemática, ou seja, a importância da usinagem da liga de Ti-6Al-4V e suas dificuldades, o objetivo principal e os objetivos secundários da pesquisa, assim pode-se chegar as possíveis contribuições do trabalho. O capítulo 2 mostra de forma clara a revisão bibliográfica sobre os principais conceitos acerca do tema do trabalho, possibilitando embasamento teórico. No capítulo 3 foi realizado o desenvolvimento do trabalho, no qual foi abordado a metodologia para se chegar ao modelo da rugosidade R_a e R_z a partir dos parâmetros de corte selecionados. Além disto, foi apresentado a influência de tais parâmetros no modelo em questão. Por fim, é foi apresentada a conclusão do trabalho com seus principais impactos e com o estudo desenvolvido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

Nesta seção são apresentados os conceitos, termos e ferramentas utilizadas no processo de torneamento da liga de Ti-6Al-4V, desenvolvendo um raciocínio para melhor compreensão sobre o estudo abordado.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DA LIGA DE TITÂNIO

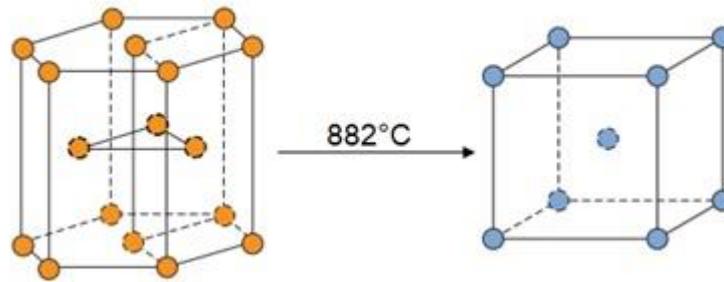
O titânio é o quarto metal estrutural mais abundante e é o nono elemento mais abundante na Terra. O titânio é um elemento de baixa densidade (aproximadamente 60% da densidade do aço e superligas) que pode ser muito reforçado por processamento de ligas e deformações (BATHINI et al, 2010).

O titânio oferece um espectro de propriedades único devido à combinação de alta resistência, rigidez, tenacidade, baixa densidade e boa resistência à corrosão. Essas propriedades são possibilitadas por uma ampla variedade de ligas de titânio que variam de aplicações em temperaturas muito baixas a elevadas (GENGA et al, 2020). Esse espectro permite economia de peso em várias aplicações aeroespaciais importantes e outras aplicações de alto desempenho na indústria médica, química e automobilística.

O peso atômico do titânio é 47,9. O titânio é elasticamente rígido (em torno de 115 GPa do módulo de Young), intrinsecamente forte, leve, resistente à corrosão e altamente abundante na natureza. O titânio e suas ligas possuem resistências à tração que variam entre 210-1380 MPa, o que se aproxima das resistências encontradas em muitos aços complexos (LIU; CHU; DING, 2004; PIMENOV et al, 2021).

Titânio puro, que é estável na fase α em temperatura ambiente, tem um formato hexagonal compacto (HC) estrutura cristalina (NGUYEN et al, 2017). O titânio não ligado sofre transição α - β , que é uma transformação alotrópica de hexagonal compacto, conforme a figura 1, para estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), em temperaturas acima de 882°C (CRUPI et al, 2017).

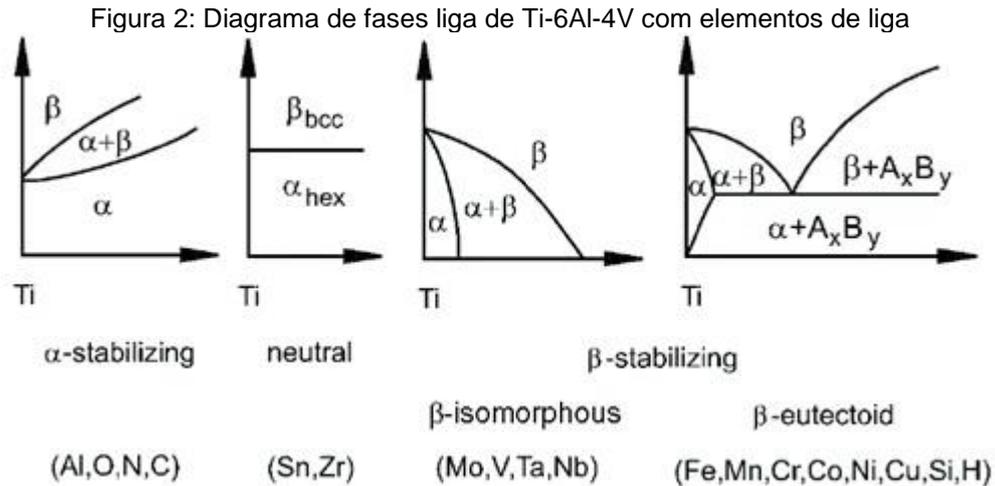
Figura 1: Transformação HC para CCC do titânio a 882°C



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

As ligas de titânio podem ser divididas em ligas α , próximas de α , $\alpha + \beta$, próximos de β e β (NGUYEN et al, 2017). Ti-6Al-4V é uma liga $\alpha + \beta$, porque é ligado com alumínio, que é um α -estabilizador e vanádio, que é um β -estabilizador. Uma característica entre as ligas $\alpha + \beta$ é que elas possuem menores taxas de encruamento em comparação com os aços (GALARRAGA et al, 2017). O Ti-6Al-4V é o mais comumente usado das ligas de titânio.

A presença de elementos de liga afeta fortemente a temperatura de transformação. Os elementos estabilizadores da fase α são: alumínio, carbono e oxigênio, esses são solúveis em α -titânio e aumentam a temperatura de transição. Existem dois tipos de β -estabilizadores, β -isomorfos e β -eutetóides, que reduzem a temperatura de transição. Dentre os estabilizadores β -isomorfos tem-se o vanádio e molibdênio, são igualmente solúveis em β -titânio. Já entre os β -eutetóides tem-se cobre e silício, forma compostos intersticiais com a fase β e, portanto, têm solubilidade restrita em β -titânio (ZHANG; CHEN; WANG, 2020). Conforme a figura 2, é possível verificar a influência dos elementos de liga na temperatura de mudança de fase $\alpha + \beta \rightarrow \beta$. Para uma mesma concentração os α -estabilizadores possuem uma temperatura de transição para fase β maior que os β -estabilizadores, ou seja, os α -estabilizadores estabilizam a fase α em temperaturas mais elevadas, por tanto eles aumentam a temperatura β -transição.



Fonte: Lütjering e Willians (2007).

A maioria das ligas de titânio utilizadas em aplicações estruturais nas indústrias aeroespacial, energética e química consistem em misturas bifásicas de fases α e β combinadas em diferentes morfologias e frações volumétricas relativas. As ligas $\alpha + \beta$ bifásicas oferecem diversas combinações de resistência, tenacidade e boas propriedades mecânicas em altas temperaturas, até aproximadamente 600°C. As transformações de fase no estado sólido são os principais fatores que determinam as características funcionais dessas ligas. A manipulação das propriedades mecânicas depende do efeito das adições de liga e do processamento termomecânico na estabilidade e comportamento físico e mecânico das duas fases, tanto individualmente quanto em uma variedade de combinações microestruturais (MA et al, 2020).

As ligas de titânio são materiais difíceis de usar devido à sua baixa condutividade térmica, módulo de elasticidade, alta reatividade química e resistência a altas temperaturas (KOSEKI et al, 2017). A baixa condutividade térmica implica que o calor gerado conduz lentamente através do material, ficando, portanto, retido na ferramenta de corte. O módulo de elasticidade (E), é definido como a relação entre tensão e deformação, e E para ligas de titânio é aproximadamente metade da maioria dos aços (YANG et al, 2021). As ligas de titânio são quimicamente estáveis em baixas temperaturas, mas se a temperatura ultrapassar 500°C, tornam-se altamente reativo com materiais de ferramenta de corte (NANDY; GOWRISHANKAR; PAUL, 2009). A resistência a altas temperaturas significa que o material tem alta resistência à fratura por falha em temperaturas elevadas. Na tabela 1 é possível verificar as propriedades mecânica da liga de Ti-6Al-4V.

Tabela 1: Propriedades mecânica da liga de Ti-6Al-4V

Propriedades mecânica	Ti-6Al-4V
Tensão de escoamento (MPa)	800-1100
Resistência à tração (MPa)	900-1200
Modulo de elasticidade (GPa)	105-140
Dureza Vickers (HV)	300-400

Fonte: Liu; Chu e Ding (2004).

2.2 USINAGEM

Usinagem é um termo usado para descrever a remoção de material em qualquer forma. Alguns exemplos de processos de corte convencionais usados na usinagem de ligas de titânio são torneamento, fresamento, perfuração, rosqueamento e mandrilamento (NANDY; GOWRISHANKAR; PAUL, 2009). Um dos processos de usinagem mais comuns é o torneamento, que pode ser separado em torneamento externo e interno, e ainda dividido em longitudinal torneamento, perfilagem e faceamento, dependendo da aplicação. Este trabalho incidirá sobre o exterior em um torneamento longitudinal.

Existem muitas variáveis envolvidas na usinagem de metais. Condições da peça de trabalho (por exemplo, composição química, dureza, microestrutura), propriedades físicas (por exemplo, amolecimento térmico, condutividade térmica, endurecimento do trabalho) e condições de corte (por exemplo, parâmetros de corte, ferramenta geometria, material da ferramenta) afetam a usinabilidade do material da peça, em combinação ou independentemente (FERRARESI, 2018). O amolecimento térmico é um processo em que o material perde sua resistência temperaturas elevadas, e endurecimento por trabalho (ou seja, endurecimento por deformação) é o processo de endurecimento que ocorre no material usinado quando este é plasticamente deformado. Amolecimento térmico e encruamento operam simultaneamente no material da peça, e foi relatado que o encruamento reduz o efeito de amolecimento térmico (COSTA et al, 2010).

2.2.1 TORNEAMENTO

O torneamento é um processo de corte no qual o material é removido por uma peça rotativa através da qual uma ferramenta de corte pontual remove o material, normalmente auxiliado por fluidos de corte. A peça de trabalho geralmente é mantida em um dispositivo de fixação, como um mandril, e a ferramenta é montada em um porta ferramenta (SHIVADE et al, 2014).

No torneamento, a ferramenta gera progressivamente uma superfície removendo cavacos de uma peça girada e alimentada em uma ferramenta de corte e esses cavacos são varridos pela rotação da peça. O processo de torneamento é usado para produzir superfícies externas cilíndricas e superfícies planas durante a operação de faceamento. Existem dois tipos de operações de torneamento: desbaste e acabamento. O desbaste caracteriza-se por ser um processo de máxima eficiência, com alta profundidade de corte e com um alto avanço, no qual acarreta em um maior desbaste na ferramenta de corte. Já o acabamento caracteriza-se pelas baixas forças de corte, com pequenas profundidades de corte e com um pequeno avanço (FERRARESI, 2018).

O processo de torneamento requer uma máquina de torneamento ou torno, peça de trabalho, dispositivo de fixação e ferramenta de corte. O torneamento também é comumente usado como um processo secundário para adicionar ou refinar recursos em peças que foram fabricadas usando um processo diferente. Conseqüentemente, o descarte de cavacos no torneamento e a eficácia dos fluidos de corte são importantes (FERRARESI, 2018).

Como a maioria das operações de usinagem, o torneamento é feito manualmente ou automaticamente. A desvantagem do torneamento manual é que requer supervisão contínua. Diferentemente do torneamento com controle numérico computadorizado (CNC), você programa todos os movimentos, velocidades e mudanças de ferramentas em um computador. Essas instruções são enviadas para o torno para execução. O CNC permite uma eficiência de alta produção (WANG; ZHANG; YANG, 2018). As ferramentas de corte de ponto único usadas no torneamento vêm em várias formas.

O torneamento longitudinal é uma operação de usinagem contínua e a usinagem industrial é hoje realizado em grandes centros de torneamento com técnica CNC, como mostra a figura 3. A taxa de remoção de material (Q) é uma boa medida

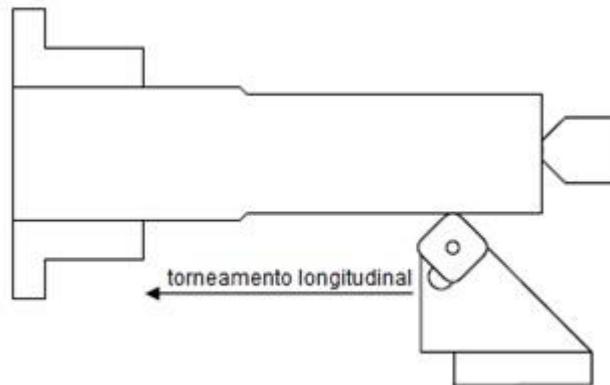
de quão rápido a operação de usinagem remove o material da peça de trabalho. A taxa de remoção de material é calculada com a equação 1.

$$Q = v_c * f * a_p \quad (1)$$

Onde,

- Q representa a taxa de remoção de material (m^3/min);
- v_c representa a velocidade de corte (m/min);
- f representa o avanço (mm/rev);
- a_p representa a profundidade de corte (mm).

Figura 3: Torneamento longitudinal



Fonte: O autor (2022).

Atualmente, a seleção dos parâmetros de usinagem está na primeira etapa com base nos parâmetros sugeridos pelos fornecedores de ferramentas de corte. No caso de materiais difíceis de cortar, deve-se também basear o estudo em pesquisas para determinar os parâmetros ideais. O critério primordial de otimização é o custo de usinagem (ABDULKAREEM; RUMAH; ADAOKOMA, 2011). Na usinagem de materiais difíceis de cortar, o período de vida útil da ferramenta, bem como o tempo da máquina principal, são os critérios básicos para a otimização. Contudo, alguns materiais são utilizados em estruturas que requerem um alto acabamento superficial. Nesses casos, o custo pode não ser o critério primordial.

2.2.2 Velocidade de corte (V_c)

A velocidade de corte é geralmente definida como a velocidade relativa entre a superfície da peça e a ferramenta de corte. Alguns especialistas também a definem como a rapidez com que a peça de trabalho passa pela aresta de corte da ferramenta (FERRARESI, 2018). A sua unidade de medida é em metros por minuto (m/min) ou pés por minuto (ft/min). A velocidade de corte é um fator bastante importante na determinação de outros parâmetros da usinagem CNC, como temperatura de corte, consumo de energia, vida útil da ferramenta e entre outros. A equação da velocidade de corte é dada por:

$$v_c = \frac{\pi * D * n}{1000} \quad (2)$$

Onde:

- D representa o diâmetro da peça (mm);
- n representa a rotação do torno (rpm).

A partir desta equação é possível analisar a vantagem do torneamento automático em relação ao manual, pois o torno CNC é capaz de variar sua rotação para manter a velocidade de corte constante. Já o torno manual possui uma quantidade limitada de rotações a serem empregadas. Além disso, no torno manual o operador deve ficar mudando manualmente a rotação caso necessário. No processo de faceamento a rotação máxima deve ser determinada no torno CNC, pois por meio da equação percebe-se que quando o diâmetro tende a zero a rotação tende ao infinito, extrapolando o limite do torno.

Para determinar a velocidade de corte ideal para o seu projeto de usinagem, você precisa considerar a dureza da peça e a resistência da ferramenta de corte. A dureza descreve a resistência de um material à deformação induzida por abrasão, penetração ou arranhões (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000). Materiais de peças mais duras exigem atenção especial durante a usinagem, pois podem reduzir facilmente a vida útil das ferramentas de corte. Como regra, quanto mais duro o material da peça, mais lenta a velocidade de corte que você deve implementar durante a usinagem. Por exemplo, materiais como o titânio exigirão uma velocidade de corte menor em comparação com o aço.

2.2.3 Tempo de corte (t_c)

A importância de um bom planejamento de experimentos está diretamente ligada ao tempo de corte, no qual quando bem empregado é possível diminuir o tempo homem-máquina. Portanto, essa redução causa diminuição do custo operacional, aumento da vida útil da ferramenta, maior produtividade, entre outros fatores. Para calcular o tempo de corte, é possível utilizar uma expressão simples:

$$t_c = \frac{\pi * D * l_f}{1000 * f * v_c} \quad (3)$$

Onde:

- t_c representa o tempo de corte (min);
- D representa a diâmetro da peça ou ferramenta (mm);
- l_f representa a comprimento de corte (mm);
- f representa o avanço (mm/rev);
- v_c representa a velocidade de corte (m/min).

2.2.4 Avanço

A taxa de avanço é definida como a distância que a ferramenta percorre durante uma revolução da peça. O principal fator na escolha do avanço e da velocidade é o material a ser cortado. No entanto, deve-se considerar também o material da ferramenta, rigidez da peça, tamanho e condição do torno e profundidade de corte (FERRARESI, 2018).

Segundo Ferraresi (2018), o avanço afeta o desempenho da usinagem de várias maneiras, como acabamento superficial e a vida útil da ferramenta. Os efeitos da taxa de avanço no desempenho da usinagem são:

- Uma taxa de alimentação mais alta indica uma taxa de remoção de material mais alta, pois a taxa de remoção de material é diretamente proporcional ao avanço. Assim, a produtividade pode ser aumentada usando uma taxa de alimentação mais alta;

- Um avanço mais alto resulta em acabamento superficial ruim, ou seja, o valor da rugosidade da superfície será maior. Para obter uma superfície lisa, uma taxa de alimentação mais baixa deve ser usada.
- O avanço também acelera o desgaste da ferramenta e, portanto, diminui a vida útil da ferramenta.

Taxas de avanço mais altas causam alta força de corte e vibração. Dependendo da capacidade da máquina-ferramenta de absorver e transmitir tais forças e vibrações, a taxa de avanço deve ser escolhida.

2.2.5 Profundidade de corte (a_p)

O termo profundidade de corte é a medida distância perpendicular da superfície da máquina acabada até a superfície áspera da peça de trabalho em milímetros (FERRARESI, 2018).

2.2.6 Fluido refrigerante

Existe uma variedade de métodos para afastar o calor gerado do processo de corte, por exemplo uso de fluido de corte externo com o objetivo de resfriar a haste e o suporte da ferramenta internamente. Corte com emulsão proporciona maior vida útil da ferramenta, mas a depender do fluido empregado o processo pode ser menos ecologicamente correto (MIA; KHAN; DHAR, 2017). No entanto, a usinagem a seco só é eficaz em baixas velocidades de corte para usinagem contínua de ligas de titânio. Segundo Ferraresi (2018), o emprego do fluido de corte possui diversas funções:

- Resfriamento: durante os processos de usinagem de corte de metal, o calor é gerado na peça de trabalho, cavacos e ferramenta de corte devido ao atrito entre a ferramenta de corte e a superfície da peça. O calor tem uma série de efeitos indesejáveis, incluindo expansão térmica, reações químicas como oxidação, soldagem de superfície e muito mais. Um fluido de corte serve para resfriar a ferramenta e a peça de trabalho, evitando assim esses efeitos.
- Lubrificação: a principal causa do aquecimento durante a usinagem é o atrito. A combinação de calor e atrito tende a soldar as superfícies. Os fluidos de corte reduzem o atrito criando uma fina camada entre o cavaco e a ferramenta,

reduzindo efetivamente o contato entre eles. A lubrificação também reduz a abrasão da ferramenta de corte e reduz o consumo de energia de um processo de usinagem.

- Prevenção da corrosão: os inibidores de ferrugem e corrosão presentes nos fluidos de corte evitam a corrosão das peças da máquina e da superfície usinada. Os fluidos de corte de óleos minerais evitam a oxidação formando uma camada protetora muito fina sobre as superfícies expostas.
- Melhoria da vida útil da ferramenta: ao dissipar o calor, reduzir o atrito e a abrasão e prevenir a corrosão e a ferrugem, os fluidos de corte reduzem muito o desgaste da ferramenta, melhorando a vida útil da ferramenta.
- Remoção de cavacos: durante certos processos de usinagem, como fresamento e furação, os cavacos tendem a se acumular ao redor da zona de corte. Um acúmulo desses cavacos pode inibir o corte. Os fluidos de corte também servem para remover os cavacos da zona de corte.
- Aprimoramento do acabamento superficial: ao evitar a expansão térmica e alterações de propriedades em uma peça de trabalho, os fluidos de corte contribuem para um bom acabamento superficial das peças usinadas.

Segundo Ferraresi (2018), a escolha correta do fluido de corte é essencial no processo de usinagem, portanto é necessário analisar as propriedades dos fluidos refrigerantes:

- Alta condutividade térmica: é uma medida de quão bem uma substância pode conduzir calor. No caso de fluido de corte, quão bem ele pode conduzir o calor para longe da peça de trabalho e da ferramenta.
- Alta capacidade calorífica: quanto maior a capacidade calorífica do fluido de corte, mais calor ele pode absorver antes de esquentar ou ferver.
- Baixa viscosidade: a baixa viscosidade de um fluido de corte permite um fluxo fácil. Também previne a formação de lodo pela mistura de cavacos com o fluido.
- Não corrosivo: um bom fluido de corte não deve atacar a peça ou ferramenta.
- Resistente à corrosão e oxidação: além de não ser corrosivo, um bom fluido de corte também deve prevenir a corrosão e oxidação das peças.

- Não tóxico: considerando o fato de que é provável que entre em contato com humanos ou com o meio ambiente, um bom fluido de corte não deve ser tóxico para ambos.
- Quimicamente não reativo: os fluidos de corte não devem realizar reações químicas com as superfícies com as quais entram em contato. Isso não apenas danifica essas superfícies, mas também degrada o fluido.
- Inodoro: para evitar qualquer cheiro persistente na máquina ou na peça usinada, um bom fluido de corte deve ser inodoro.
- Suficientemente claro (transparente): um bom fluido de corte deve ser suficientemente claro para não inibir a visão da peça.
- Estabilidade: um bom fluido de corte não deve se degradar rapidamente com o uso ou quando armazenado.

O processo de torneamento ocorre, normalmente, em velocidades muito altas, portanto, o resfriamento é crucial. Considerando que a peça gira. A aplicação a jato do fluido de corte é essencial. Em tais velocidades, é necessário um alto nível de resfriamento. Como tal, os fluidos sintéticos são mais adequados para tais operações.

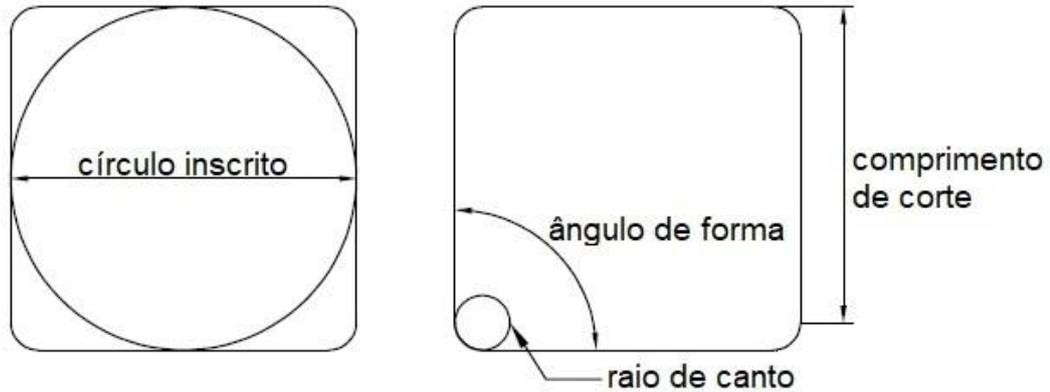
2.2.7 Ferramenta de corte

Os processos de torneamento geralmente exigem a substituição regular das ferramentas de corte. A vida útil da ferramenta é um tempo para uma ferramenta recém-afiada, que corta satisfatoriamente, até que seja necessário removê-la para reafiação ou substituição. Ferramentas desgastadas contribuem significativamente para o desperdício na forma de partículas de desgaste. As partículas de desgaste geralmente são levadas pelo fluido de corte. Do ponto de vista ambiental, as ferramentas de corte que possuem uma longa vida útil são importantes, pois muitas vezes são descartadas e, portanto, são um fardo para o meio ambiente. A ferramenta desgastada pode ser identificada pelo desempenho do processo em termos de forças de corte, energia consumida e acabamento superficial (FERRARESI, 2018).

Segundo Ferraresi (2018), uma pastilha de corte varia de acordo com sua geometria, forma e composição de materiais. Assim, é possível aplicar um grupo específico de pastilhas de corte a uma aplicação de torneamento, material de trabalho e condições de trabalho. Em geral, um inserto de ferramenta pode ser definido por

suas características geométricas e composição do material. Conforme a figura 4, as características mais notáveis do inserto de ferramenta são o círculo inscrito, ângulo de incidência, comprimento de corte, raio de canto, ângulo de forma e espessura.

Figura 4: Característica da ferramenta de corte



Fonte: O autor (2022).

2.3 RUGOSIDADE

É componente da textura da superfície, é a quantidade de desvio na direção do vetor normal da superfície real de sua forma ideal. Quanto maior o desvio, mais é a superfície áspera, e quanto menos é o desvio a superfície média é lisa. Sobre a superfície áspera o coeficiente de atrito será alto e sobre a superfície lisa o coeficiente de atrito será menor. Isso também é fato, as superfícies que apresentam irregularidades enferrujam facilmente. Manter um bom acabamento superficial sobre a superfície também é caro (GADELMAWLA et al, 2002).

2.3.1 Rugosidade R_a

A rugosidade R_a é dada pela média aritmética do valor absoluto das alturas do perfil ao longo do comprimento de avaliação (GADELMAWLA et al, 2002).

2.3.2 Rugosidade R_z

A rugosidade R_z é o valor médio dos valores absolutos das alturas de cinco picos de perfil mais alto e as profundidades de cinco vales mais profundos dentro do comprimento de avaliação (GADELMAWLA et al, 2002).

2.4 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO

O *design of experiments* (DOE) é um método sistemático e eficiente que permite que cientistas e engenheiros estudem a relação entre várias variáveis de entrada (também conhecidas como fatores) e as principais variáveis de saída (também conhecidas como respostas). É uma abordagem estruturada para coletar dados e fazer descobertas. Ele permite que vários fatores de entrada sejam manipulados, determinando seu efeito em uma saída desejada (resposta). Ao manipular várias entradas ao mesmo tempo, o DOE pode identificar interações importantes que podem ser perdidas ao experimentar um fator de cada vez. Todas as combinações possíveis podem ser investigadas ou apenas uma parte das combinações possíveis (MANDENIUS; BRUNDIN, 2008).

Um experimento estrategicamente planejado e executado pode fornecer muitas informações sobre o efeito em uma variável de resposta devido a um ou mais fatores. Muitos experimentos envolvem manter certos fatores constantes e alterar os níveis de outra variável. Essa abordagem um fator de cada vez para o conhecimento do processo é, no entanto, ineficiente quando comparada com a mudança dos níveis de fatores simultaneamente (FIDÉLIS; PAGOTTO; BORATTO, 2021).

O projeto experimental pode ser usado no ponto de maior alavancagem para reduzir os custos do projeto, acelerando o processo de projeto, reduzindo as alterações tardias do projeto de engenharia e reduzindo a complexidade do material do produto e da mão de obra (MANDENIUS; BRUNDIN, 2008). Os experimentos projetados também são ferramentas poderosas para obter economia nos custos de fabricação, minimizando a variação do processo e reduzindo o retrabalho, e a necessidade de inspeção. A maioria dos projetos envolve apenas 2 níveis de cada fator. Os fatores podem ser quantitativos ou categóricos. No processo de torneamento os fatores quantitativos seriam: velocidade de corte, avanço, temperatura do fluido, rotação, profundidade, entre outros. Já os categóricos seriam: tipo de fluido de corte, tipo de material a ser usinado, tipo de ferramenta de corte, entre outros.

Segundo Fidélis; Pagotto e Boratto (2021), existem quatro áreas de problemas gerais de engenharia nas quais o DOE pode ser aplicado:

- Comparativo: neste caso, o engenheiro está interessado em avaliar se uma mudança em um único fator resultou de fato em uma mudança/melhoria do processo como um todo.

- Triagem: o engenheiro está interessado em compreender o processo como um todo no sentido de que deseja (após projeto e análise) ter em mãos uma lista ordenada de fatores importantes a não importantes, que afetam o processo.
- Modelagem: o engenheiro está interessado em modelar funcionalmente o processo com a saída sendo uma função matemática de bom ajuste (alto poder preditivo) e ter boas estimativas (precisão máxima) dos coeficientes nessa função.
- Otimização: o engenheiro está interessado em determinar as configurações ideais dos fatores do processo; isto é, determinar para cada fator o nível do fator que otimiza a resposta do processo.

O presente trabalho foca na terceira área de atuação (modelagem), contudo para tal é necessário conhecer o processo e identificar os fatores mais importantes. Os modelos empíricos mais comuns que se ajustam aos dados experimentais assumem uma forma linear ou quadrática. A obtenção de bons resultados de um DOE envolve estas sete etapas:

- Definir objetivos;
- Selecione as variáveis do processo;
- Selecione um projeto experimental;
- Execute o projeto;
- Verifique se os dados são consistentes com as suposições experimentais;
- Analise e interprete os resultados;
- Use/apresente os resultados (pode levar a outras execuções ou DOE).

3 METODOLOGIA

Os experimentos foram executados no laboratório de mecânica aplicada do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

3.1 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL

A composição química da liga de titânio empregada nesta pesquisa está representada na tabela 2. Além disto, a liga de Ti-6Al-4V sofreu o tratamento térmico de recozimento, por conta disto o material possui 979MPa de limite de resistência a

tração, 904MPa de limite de escoamento, 18% de alongamento e 41% de redução de área.

Tabela 2: Composição química da liga de Ti-6Al-4V

Composição química (%)								
Ti	Al	V	C	Fe	N	O	H	Outros
89,2384	6,1400	3,8000	0,0200	0,2300	0,0300	0,1400	0,0016	0,4000

Fonte: O autor (2022).

3.2 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA

A fase inicial do projeto incide na preparação dos corpos de prova da liga de Ti-6Al-4V. Nessa fase, conforme a figura 5, utilizou-se o processo de fabricação por usinagem de serramento, com a serra fita, e o torneamento manual com o torno Romi Mascote, para o faceamento e elaboração do furo de centro. Ao final desta etapa cada corpo de prova possuía 51,20mm de diâmetro e 124,00mm de comprimento.

Figura 5: (a) Processo de usinagem por serramento. (b) Processo de usinagem por torneamento



Fonte: O autor (2022).

As etapas posteriores foram realizadas no Laboratório de Usinagem CNC do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco. O processo de usinagem executado foi o torneamento automático, com o emprego do torno CNC Romi Centur 30D. As ferramentas de corte usadas no processo foram insertos intercambiáveis de metal duro, marca Sandvik, referência SNMG 120416SMR H13A e o porta ferramenta do mesmo fabricante modelo SNMG 120408, conforme a figura 6. Cada ferramenta de corte contém oito posições possíveis de corte, contudo utilizou-se apenas quatro posições para cada ferramenta, conforme a figura 7. O

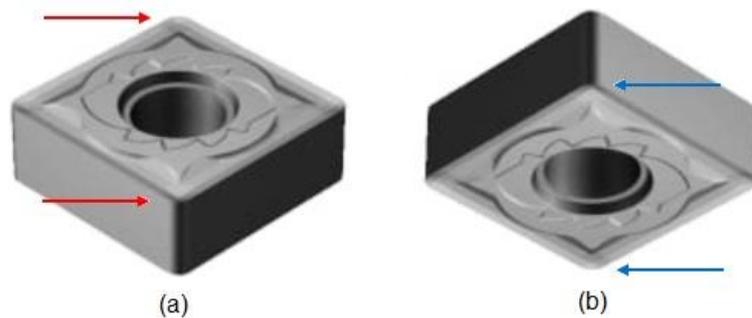
inserto de ferramenta possui 12,7mm de círculo inscrito, 8,5mm de comprimento de corte, 1,6mm de raio de canto e 4,763mm de espessura.

Figura 6: Porta ferramenta (em preto) e do inserto para corte de material



Fonte: O autor (2022).

Figura 7: (a) As duas arestas de corte utilizadas da vista superior. (b) As duas arestas de corte utilizadas da vista inferior



Fonte: O autor (2022).

3.3 PREPARAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Adaptou-se o sistema de refrigeração no torno CNC para controlar a temperatura do fluido de corte. Esse equipamento contém um tanque de fluido de corte com capacidade de 56 litros, com divisão de três seções, conforme a figura 8. O torno é constituído por uma bomba hidráulica, no qual desloca o fluido de corte do tanque (seção 1) para a região de corte realizando do método de usinagem úmida. A troca calor entre o fluido e o conjunto ferramenta/peça é dada principalmente pela convecção. Em seguida, ao retornar ao reservatório (seção 3) o fluido diminui sua temperatura ao trocar calor com os já existentes no reservatório. Realizando um ciclo

fechado. Portanto cabe ao sistema de refrigeração manter a temperatura do fluido do reservatório no valor desejado.

Figura 8: Seções do reservatório



Fonte: Adaptado de ARAÚJO et al, 2019.

O sistema de refrigeração é constituído por: compressor, gás refrigerante, condensador, ventilador, válvula de expansão, controlador de temperatura e evaporador. A figura 9 mostra o sistema de refrigeração por compressão utilizado.

Figura 9: Componentes do sistema de refrigeração

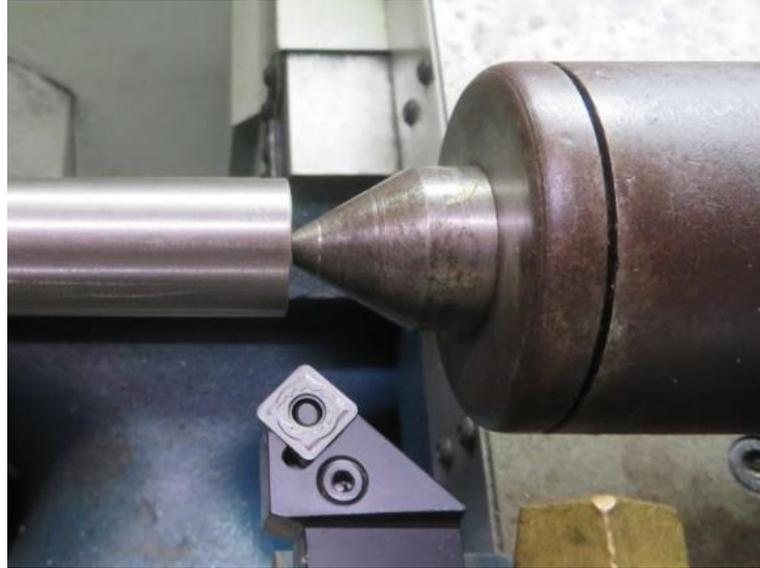


Fonte: Adaptado de ARAÚJO et al, 2019.

Para realizar as medições da rugosidade dos corpos de prova foi utilizado um rugosímetro Instrutherm modelo RP-200. A concentricidade foi garantida através das três castanhas recém torneadas, utilização do contraponto (figura 10) e pela verificação no relógio comparador, ilustrado pela figura 11, no qual demonstrou uma variação de cinco centésimos. O desgaste da ferramenta foi analisado utilizando-se

um microscópio óptico Olympus BX51M com câmera digital, com ampliação de 50 vezes.

Figura 10: Concentricidade garantida pelo contraponto



Fonte: O autor (2022).

Figura 11: Medição da concentricidade com emprego do relógio comparador

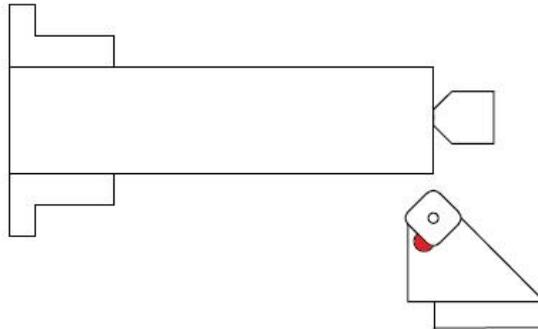


Fonte: O autor (2022).

O método utilizado para medir a temperatura do reservatório e da ferramenta de corte foi o método do termopar. Esse método utiliza o efeito termopar, no qual ocorre na junção de dois materiais condutores distintos produzindo uma tensão elétrica proporcional a temperatura aplicada. Foram introduzidos três termopares no reservatório, sendo fixado um em cada seção. O quarto termopar foi fixado na junção

porta-ferramenta e ferramenta de corte, conforme a figura 12, já que devido à baixa condutividade térmica da liga de Ti-6Al-4V o calor fica retido no inserto, caso não for aplicado fluido refrigerante.

Figura 12: Região de fixação do termopar (em vermelho)



Fonte: O autor (2022).

3.4 DESIGN OF EXPERIMENTS

Para os ensaios realizados utilizou-se três níveis de variação para cada parâmetro de usinagem adotado, conforme a tabela 3. O nível inferior é representado pelo DOE como -1, o nível central é o 0 e o superior +1. A leitura de diversos artigos precedeu a escolha da velocidade de corte e avanço (BERMINGHAM; PALANISAMY; DARGUSCH, 2012; CAROU et al, 2017; D'MELLO; PAI; PUNEET, 2017; UPADHYAY; JAIN; MEHTA, 2013). Além disso, a profundidade de corte foi fixada em 0,3mm e o comprimento útil de usinagem foi de 90mm.

Tabela 3: Valores utilizados para cada parâmetro de corte

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

Fonte: O autor (2022).

Os ensaios de torneamento foram executados a partir do planejamento fatorial 2^3 com cinco pontos centrais, conforme a tabela 4. A metodologia de planejamento de

experimentos foi empregada com o objetivo de permitir precisamente a análise das influências dos fatores estabelecidos na rugosidade (R_a e R_z). Conforme previsto pela metodologia DOE os experimentos foram executados em ordem aleatória, ilustrado a segunda coluna da tabela 4. Percebe-se que o modelo proposto simplifica o experimento, pois caso adotado o fatorial completo (2^3) seriam 27 corridas. Além disso, o emprego dos cinco pontos centrais minimiza a presença do erro experimental.

Tabela 4: As treze corridas realizadas no experimento.

Corridas	Ordem de execução	v_c (m/min)	f (mm/rev)	T (°C)	A	B	C
1	3	60	0,12	10	-1	-1	-1
2	9	100	0,12	10	1	-1	-1
3	4	60	0,20	10	-1	1	-1
4	8	100	0,20	10	1	1	-1
5	11	60	0,12	20	-1	-1	1
6	7	100	0,12	20	1	-1	1
7	1	60	0,20	20	-1	1	1
8	2	100	0,20	20	1	1	1
9	12	80	0,16	15	0	0	0
10	10	80	0,16	15	0	0	0
11	6	80	0,16	15	0	0	0
12	11	80	0,16	15	0	0	0
13	5	80	0,16	15	0	0	0

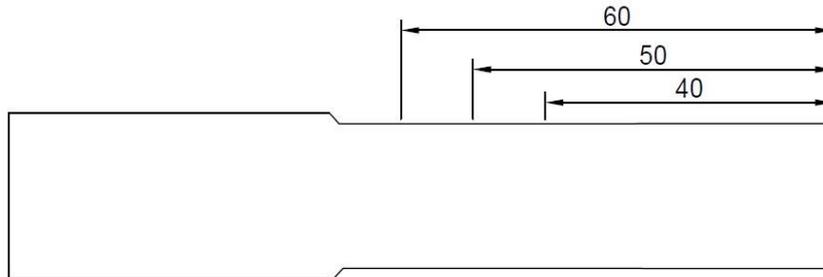
Fonte: O autor (2022).

3.4 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

A cada corrida realizada o corpo de prova era retirado para medição das rugosidades (R_a e R_z) e um novo corpo era fixado no torno. Neste momento o inserto também era retirado do suporte para modificação da aresta cortante, ou seja, cada uma das quatro posições possíveis de corte (figura 7) só eram expostas a uma única corrida. Assim, a rugosidade não será influenciada pelo desgaste do inserto das corridas anteriores. As medições de rugosidade foram realizadas três vezes em cada ponto de medição (40mm, 50mm e 60mm), conforme esquema ilustrado na figura 12.

Após as medições de rugosidade realizou-se a média aritmética dos valores das respostas.

Figura 13: Três pontos de medição da peça usinada



Fonte: O autor (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

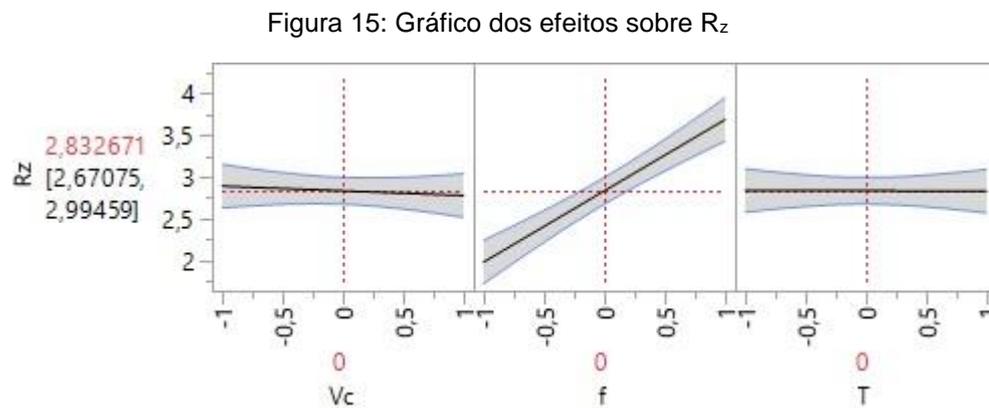
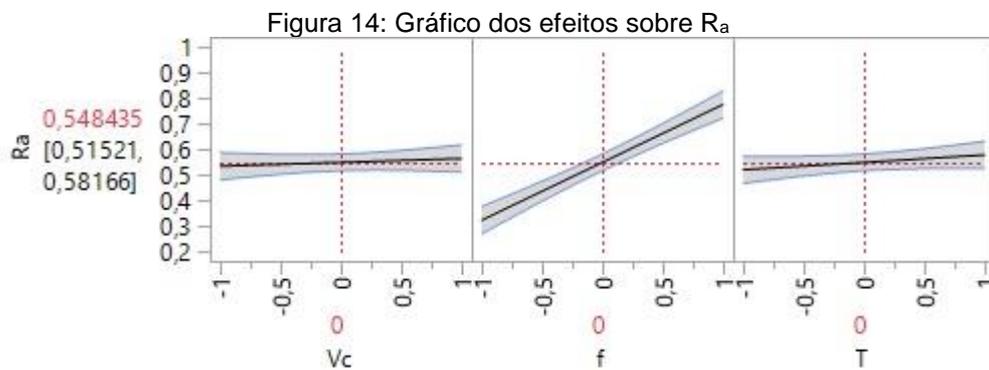
Os dados experimentais do projeto fatorial 2^2 com cinco pontos centrais com os resultados da rugosidade R_a e R_z são mostrados na tabela 5. É possível analisar que os parâmetros de rugosidades R_a obtidos nos ensaios para a liga de Ti-6Al-4V foram relativamente baixos, visto que o avanço variou de 0,12 a 0,20 mm/rev. A rugosidade média R_a ficou na faixa de 0,288-0,898 μm e a rugosidade R_z ficou na faixa de 1,793-3,998 μm .

Tabela 5: Medição da rugosidade (R_a e R_z) pelo fatorial 2^2 com 5 pontos centrais

Corridas	v_c (m/min)	f (mm/rev)	T ($^{\circ}\text{C}$)	R_a (μm)	R_z (μm)
1	60	0,12	10	0,309	1,793
2	100	0,12	10	0,288	2,091
3	60	0,20	10	0,766	3,998
4	100	0,20	10	0,801	3,819
5	60	0,12	20	0,423	2,490
6	100	0,12	20	0,355	1,888
7	60	0,20	20	0,722	3,628
8	100	0,20	20	0,898	3,664
9	80	0,16	15	0,511	2,618
10	80	0,16	15	0,520	2,642
11	80	0,16	15	0,516	2,805
12	80	0,16	15	0,506	2,703
13	80	0,16	15	0,517	2,683

Fonte: O autor (2022).

Os resultados do DOE foram obtidos com o auxílio do *software* JMP. As figuras 14 e 15 mostram indícios de influência das condições de corte (velocidade de corte, avanço e temperatura do fluido) sobre as rugosidades que serão estudadas. Conforme as figuras 14 e 15, a partir da análise de variância (Anova) é verificado os possíveis indícios do efeito de cada fator, com a inclinação da reta, sobre a resposta. O avanço possui um efeito maior sobre a rugosidade R_a e R_z em comparação com o efeito da velocidade de corte e da temperatura do fluido. A baixa influência da temperatura do fluido se deve pela curta variação das temperaturas nos experimentos, gerada pelo controle do sistema de refrigeração adaptado.



O gráfico de Pareto permite analisar o real efeito dos principais parâmetros (avanço velocidade de corte, temperatura) e das suas interações sobre as rugosidades estabelecidas, ilustrado nas figuras 16 e 17. De acordo com este gráfico somente o avanço pode ser considerado influente sobre o sistema, 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 $P > 0,05$ nos dois casos.

Figura 16: Significância dos fatores e suas interações na resposta R_a

Fonte	Significância	Pvalor
f	4,910	0,00001
v_c*f	1,135	0,07323
T	0,843	0,14356
$f*T$	0,409	0,38976
v_c	0,384	0,41332
v_c*T	0,282	0,52200

Fonte: O autor (2022). Software JMP

Figura 17: Significância dos fatores e suas interações na resposta R_z

Fonte	Significância	Pvalor
f	4,273	0,00005
$f*T$	0,740	0,18184
v_c*T	0,457	0,34891
v_c	0,275	0,53109
v_c*f	0,086	0,81991
T	0,015	0,96505

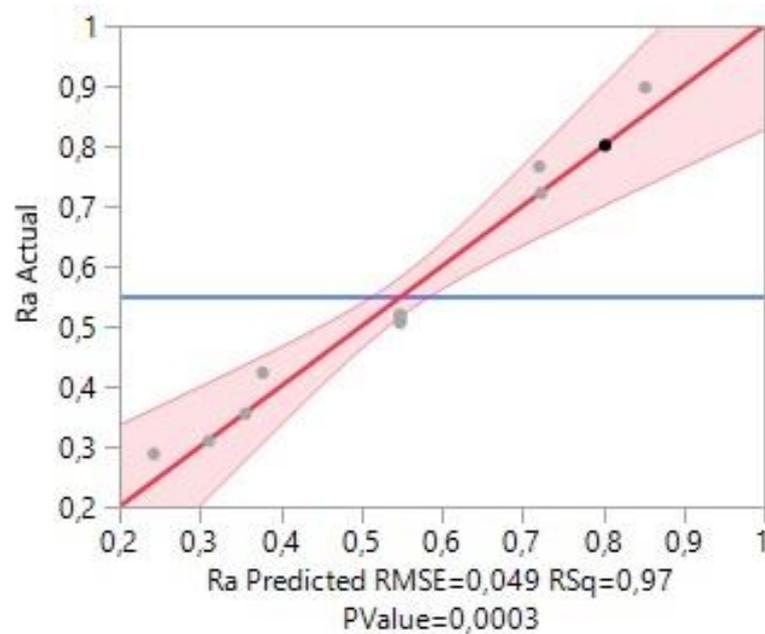
Fonte: O autor (2022). Software JMP

A figura 18 apresenta a estimativa dos parâmetros para todos os termos do modelo, utilizando a análise de variância (Anova) para a modelagem da rugosidade média R_a . Observa-se que os valores P são menores que 5% (nível de significância estatística) para o avanço. Em função da Anova percebe-se que a interação entre a velocidade de corte e o avanço quase obteve o nível de significância maior que 5%. Para demonstrar os desvios obtidos em cada corrida do experimento a figura 19 foi gerada. Além disso, esses ensaios foram realizados com uma boa confiabilidade (97%), pois os desvios se encontram próximo da linha normal.

Figura 18: Parâmetros estimados para R_a

Termo	Estimativa	Erro padrão	Razão T	Prob> t
Intercept	0,5484354	0,013576	40,40	<,0001*
V_c	0,0152089	0,017307	0,88	0,4133
f	0,2264034	0,017307	13,08	<,0001*
T	0,0291104	0,017307	1,68	0,1436
V_c*f	0,037527	0,017307	2,17	0,0732
V_c*T	0,0117645	0,017307	0,68	0,5220
$f*T$	-0,016041	0,017307	-0,93	0,3898

Fonte: O autor (2022). Software JMP

Figura 19: Gráfico da predição do R_a 

Fonte: O autor (2022). Software JMP

A equação 4 apresenta o modelo matemático linear para R_a , que foi obtida utilizando todos os fatores.

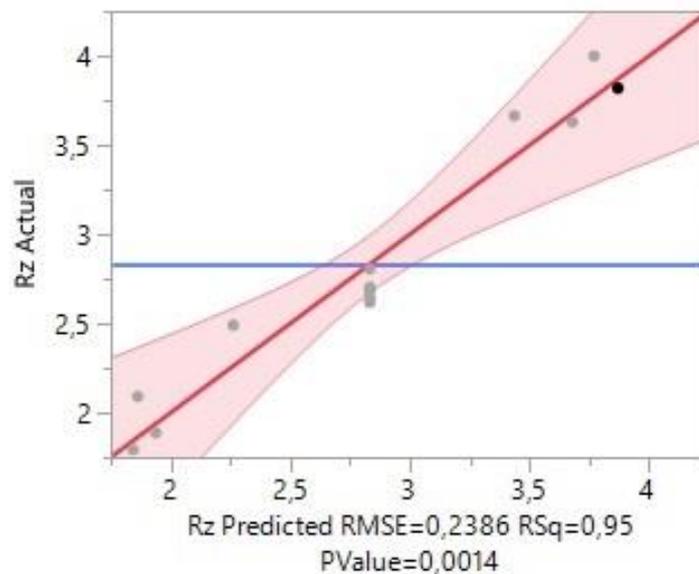
$$R_a = 0,548 + 0,015v_c + 0,226f + 0,029T + 0,037v_c f + 0,012v_c T - 0,016fT \quad (4)$$

Da mesma forma foi realizada a análise de variância para a rugosidade R_z , no qual apenas o avanço é classificado como variável significativa (figura 20). Os demais parâmetros obtiveram valores P relativamente maiores que 0,05. E através do gráfico de predição, figura 21, a confiabilidade encontrada é de 95%.

Figura 20: Parâmetros estimados para R_z

Termo	Estimativa	Erro padrão	Razão T	Prob> t
Intercept	2,8326714	0,066172	42,81	<,0001*
V_c	-0,056049	0,084354	-0,66	0,5311
f	0,8559506	0,084354	10,15	<,0001*
T	-0,003853	0,084354	-0,05	0,9650
V_c*f	0,0200632	0,084354	0,24	0,8199
V_c*T	-0,085688	0,084354	-1,02	0,3489
$f*T$	-0,127355	0,084354	-1,51	0,1818

Fonte: O autor (2022). Software JMP

Figura 21: Gráfico da predição do R_z 

Fonte: O autor (2022). Software JMP

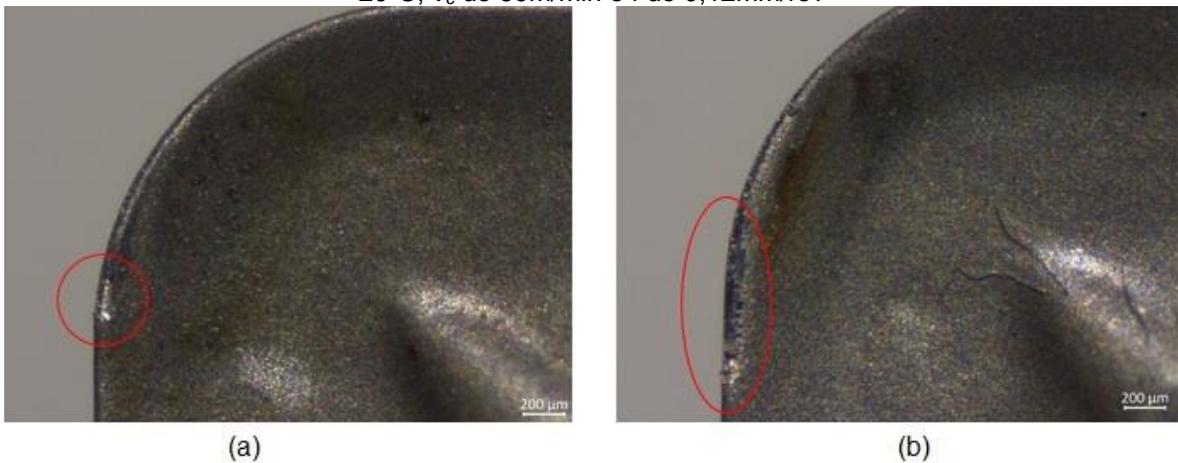
A equação 5 apresenta o modelo matemático linear para R_z , que foi obtida utilizando todos os fatores.

$$R_z = 2,833 - 0,056v_c + 0,856f - 0,004T + 0,020v_c f - 0,086v_c T - 0,127fT \quad (5)$$

A temperatura do fluido de corte não foi significativa em nenhum dos modelos. Contudo é de suma importância verificar como a refrigeração do fluido de corte contribuiu para evitar o desgaste da ferramenta. Tal análise é estudada com a fixação de dois parâmetros (velocidade de corte e avanço) e variando as temperaturas, por exemplo, as corridas 1 e 5, que teve a temperatura de 10°C e 20°C, velocidade de

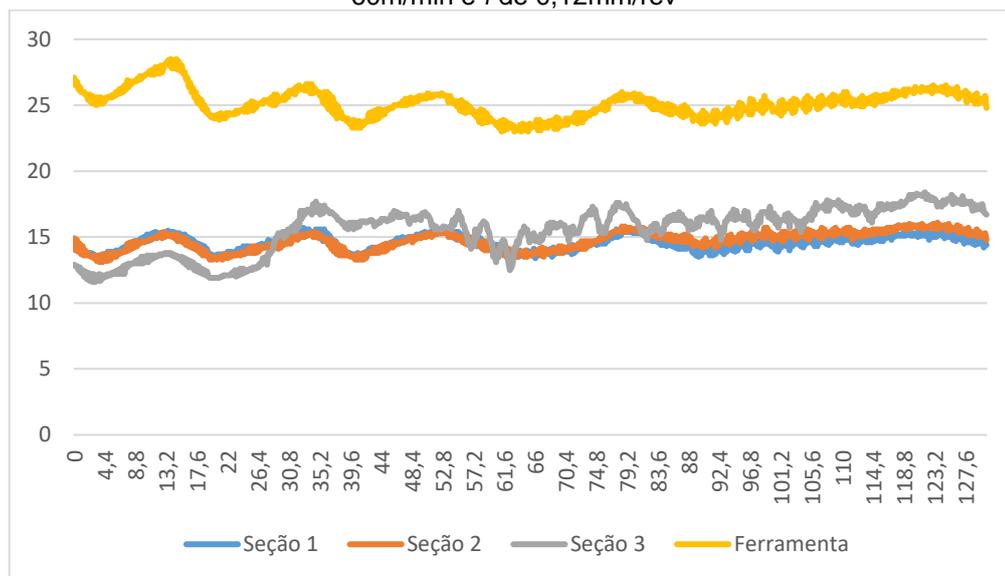
60m/min e avanço de 0,12mm/rev. A partir da figura 22, percebe-se que o desgaste na ferramenta de corte da corrida 1 foi menor que a da corrida 5. Portanto com um uso prolongado da mesma aresta de corte, a ferramenta lubrificada pelo fluido de 20°C se desgastará mais rapidamente que a ferramenta lubrificada pelo fluido de 10°C. Contudo o sistema de refrigeração utilizado não possui potência suficiente para manter a temperatura em 10°C a todo momento, figura 23. Em temperaturas mais elevadas, por exemplo 20°C o sistema se torna mais estável, figura 24.

Figura 22:(a) Desgaste com T de 10°C, v_c de 60m/min e f de 0,12mm/rev. (b) Desgaste com T de 20°C, v_c de 60m/min e f de 0,12mm/rev



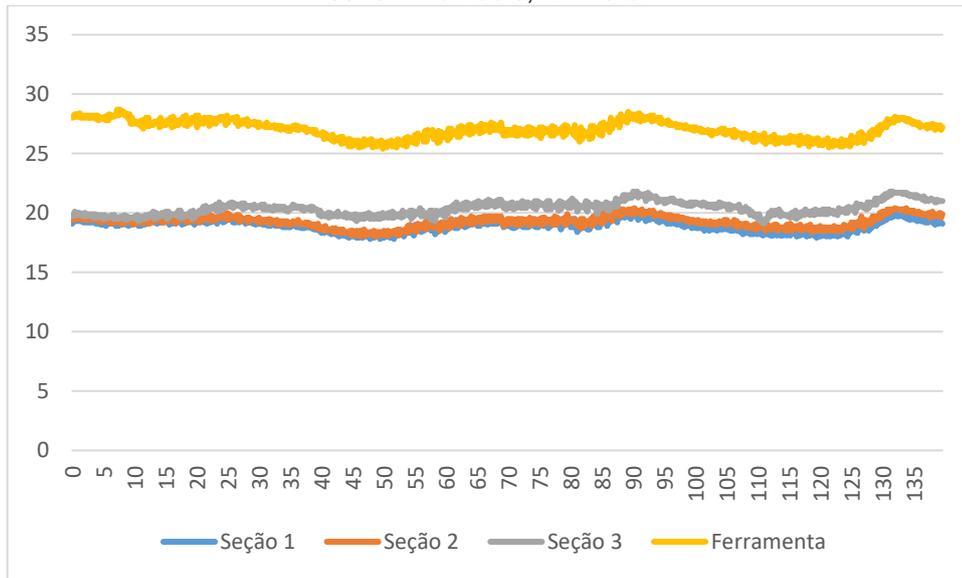
Fonte: O autor (2022).

Figura 23: Gráfico Tempo-Temperatura. Monitoramento dos termopares com T de 10°C, v_c de 60m/min e f de 0,12mm/rev



Fonte: O autor (2022).

Figura 24: Gráfico Tempo-Temperatura. Monitoramento dos termopares com T de 20°C , v_c de 60m/min e f de $0,12\text{mm/rev}$



Fonte: O autor (2022).

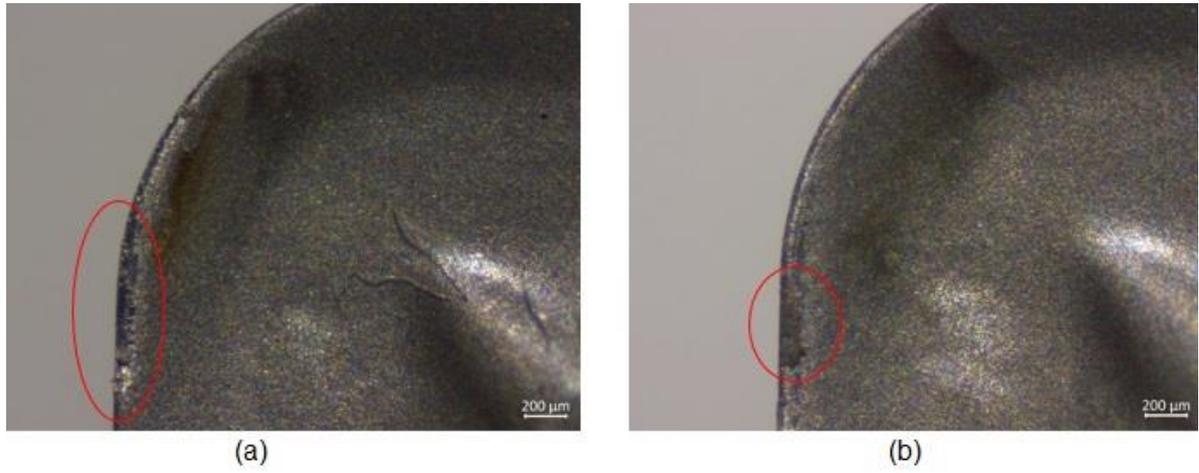
Fixando a temperatura (10°C), o avanço ($0,12\text{mm/rev}$) e variando a velocidade (de 60m/min para 100m/min) percebe-se que em baixa velocidades há o surgimento de aresta postiça de corte, que aumentam o desgaste da ferramenta, ilustrado na figura 25. Tal fenômeno não é encontrado nas velocidades de 80m/min e 100m/min , portanto para usinar as ligas de Ti-6Al-4V é necessário utilizar velocidades maiores que 60m/min . Contudo devido à baixa condutividade térmica deste material não é recomendado utilizar altas velocidades de corte. Esse aumento de desgaste também ocorre fixando a temperatura em 20°C , o avanço em $0,12\text{mm/rev}$ e variando a velocidade (60m/min e 100m/min), conforme a figura 26.

Figura 25: (a) Desgaste com v_c de 60m/min , T de 10°C e f de $0,12\text{mm/rev}$. (b) Desgaste com v_c de 100m/min , T de 10°C e f de $0,12\text{mm/rev}$.



Fonte: O autor (2022).

Figura 26: (a) Desgaste com v_c de 60m/min, T de 20°C e f de 0,12mm/rev. (b) Desgaste com v_c de 100m/min, T de 20°C e f de 0,12mm/rev.



Fonte: O autor (2022).

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos usando um *Design of Experiments* (DOE) para torneamento de ligas de Ti-6Al-4V com ferramentas de metal duro, pudemos elaborar um modelo matemático para prever a rugosidade R_a e R_z de modo que temos clareza de quais parâmetros de usinagem mais interferem na qualidade das peças. Além disso, as seguintes conclusões também podem ser tiradas:

- A geometria alisadora da ferramenta permite baixa rugosidade R_a na faixa de 0,288-0,898 μm e rugosidade R_z na faixa de 1,793-3,998 μm ;
- O avanço é o maior fator que afeta a rugosidade R_a , seguido interação da velocidade de corte com o avanço, parâmetros que não podem ser descartados durante a usinagem;
- O modelo linear resultante está bem ajustado para os parâmetros de rugosidade R_a e R_z , o que mostra que o avanço tem grande efeito sobre os parâmetros de rugosidade;
- A análise de variância mostra que o nível da variável experimental está na região ótima de rugosidade R_a e R_z , P-value da curvatura menor que 0,05, o que mostra a importância do avanço;
- A viabilidade de se trabalhar com os parâmetros indicados, pois houve um pequeno desgaste na ferramenta de corte, contudo deve-se ter cuidado na escolha da velocidade de corte.

REFERÊNCIAS

- ABDULKAREEM, Suleiman; RUMAH, Usman Jibrin; ADAOKOMA, Apasi. Optimizing machining parameters during Turning process. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 3, n. 1, p. 23-27, 2011.
- 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.
- 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, n. 8, 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.
- 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.
- CRUPI, Vincenzo et al. Influence of microstructure [alpha+ beta and beta] on very high cycle fatigue behaviour of Ti-6Al-4V alloy. **International Journal of Fatigue**, v. 95, p. 64-75, 2017.
- 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 COSTA, André Luiz V. et al. **Aços e ligas especiais**. Editora Blucher, 2010.
- 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.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Editora Blucher, 2018.
- FIDÉLIS, Pedro Henrique; PAGOTTO, Carlos Renato; DE AQUINO BORATTO, Tales Humberto. ANÁLISE DO EFEITO DOS PARÂMETROS DE CORTE NA RUGOSIDADE RA NO TORNEAMENTO DO AL6351-T6 ATRAVÉS DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS, 2021.
- GADELMAWLA, E. S. et al. Roughness parameters. **Journal of materials processing Technology**, v. 123, n. 1, p. 133-145, 2002.

GALARRAGA, Haize et al. Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). **Materials Science and Engineering: A**, v. 685, p. 417-428, 2017.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; DOS SANTOS, Carlos Alexandre. **Ensaio dos materiais**. Livros Técnicos e científicos, 2000.

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.

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.

KOSARAJU, Satyanarayana; ANNE, Venu Gopal. Optimal machining conditions for turning Ti-6Al-4V using response surface methodology. **Advances in Manufacturing**, v. 1, n. 4, p. 329-339, 2013.

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

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.

LÜTJERING, G.; WILLIAMS, J. C. **Titanium**. 2 ed, Berlim, Springer, 2007.

MA, X. Z. et al. Investigation of microstructures, textures, mechanical properties and fracture behaviors of a newly developed near α titanium alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 775, p. 138996, 2020.

MANDENIUS, Carl-Fredrik; BRUNDIN, Anders. Bioprocess optimization using design-of-experiments methodology. **Biotechnology progress**, v. 24, n. 6, p. 1191-1203, 2008.

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.

NANDY, A. K.; GOWRISHANKAR, M. C.; PAUL, S. Some studies on high-pressure cooling in turning of Ti-6Al-4V. **International journal of machine tools and manufacture**, v. 49, n. 2, p. 182-198, 2009.

NEWMAN, Stephen T. et al. Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using CNC technology. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 24, n. 6, p. 699-708, 2008.

NGUYEN, Dinh et al. Microstructural impact on flank wear during turning of various Ti-6Al-4V alloys. **Wear**, v. 384, p. 72-83, 2017.

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.

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.

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.

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.

WANG, Hao; ZHANG, Yi-Min; YANG, Zhou. A reliability allocation method of CNC lathes based on copula failure correlation model. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 31, n. 1, p. 1-9, 2018.

YANG, Zhijun et al. Effects of microstructure characteristics on the mechanical properties and elastic modulus of a new Ti-6Al-2Nb-2Zr-0.4 B alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 820, p. 141564, 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.