

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FÁBIO AUGUSTO DE FARIA  
ISABELLA NOLETO BOCATO**

**AVALIAÇÃO DE ASPECTOS METROLÓGICOS DA RETIFICAÇÃO  
SOBRE A QUALIDADE SUPERFICIAL DE LIGA DE TITÂNIO**

**Uberlândia  
2024**

FÁBIO AUGUSTO DE FARIA  
ISABELLA NOLETO BOCATO

**AVALIAÇÃO DE ASPECTOS METROLÓGICOS DA RETIFICAÇÃO  
SOBRE A QUALIDADE SUPERFICIAL DE LIGA DE TITÂNIO**

**Projeto de fim de curso** apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Área de concentração:** Metrologia

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mayara Fernanda Pereira

Uberlândia

2024

FÁBIO AUGUSTO DE FARIA  
ISABELLA NOLETO BOCATO

**AVALIAÇÃO DE ASPECTOS METROLÓGICOS DA RETIFICAÇÃO  
SOBRE A QUALIDADE SUPERFICIAL DE LIGA DE TITÂNIO**

**Projeto de fim de curso** apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Área de concentração:** Metrologia

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mayara Fernanda Pereira

**Banca examinadora:**

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mayara Fernanda Pereira

---

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

---

Me. Josenilton dos Santos Lopes

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus por ter abençoado a nossa jornada e aos nossos familiares pelo apoio ao longo dos nossos estudos.

À nossa orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mayara Fernanda Pereira, pela orientação, incentivo, ensinamentos e amizade, que foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), ao Laboratório de Ensino em Metrologia (LEMETRO) e Laboratório de Usinagem Convencional pela oportunidade de estudo concedida.

A todos os professores, técnicos e alunos do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e do Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) pela amizade, apoio e contribuição ao longo do desenvolvimento do trabalho, em especial ao Dr. Alcione e ao Doutorando Josenilton, que nos auxiliaram nos ensaios experimentais e análises de MEV.

DE FARIA, F. A.; BOCATO, N. I. **Avaliação de aspectos metrológicos sobre a qualidade superficial de liga de titânio**. 2024. 83f. Monografia de Projeto de Fim de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

As ligas de titânio são materiais que possuem uma vasta aplicação na indústria aeroespacial, assim como em componentes biomédicos, em função de uma combinação única de propriedades, como baixa densidade, alta resistência mecânica e à corrosão e biocompatibilidade com o corpo humano. Contudo, esses materiais possuem uma baixa usinabilidade, em decorrência de sua alta resistência mecânica, baixa condutividade térmica e reatividade química com materiais cerâmicos, que compõem as ferramentas de corte. Em especial na retificação das ligas de titânio, é fundamental que seja desenvolvida uma efetiva análise dos efeitos que parâmetros de corte do processo podem exercer sobre a qualidade superficial das peças usinadas. Para tanto, faz-se necessária a análise metrológica do acabamento das superfícies em termos das tolerâncias dimensionais e geométricas, requisitos dos projetos de engenharia, que devem ser plenamente atendidos a fim de que a funcionalidade e a intercambiabilidade entre os elementos usinados possa ser garantida. E a aplicação dos conceitos de incerteza de medição é essencial para uma análise confiável e rastreável dos resultados mensurados. Sob essa perspectiva, o presente trabalho tem por finalidade apresentar os efeitos gerados por duas distintas condições de penetrações de trabalho ( $a_e = 10 \mu\text{m}$  e  $a_e = 30 \mu\text{m}$ ) na qualidade superficial de amostras da liga Ti-6Al-4V, retificadas com rebolo de carbetto de silício (SiC), em termos da rugosidade média ( $R_a$ ), de imagens das superfícies retificadas (MEV), das diferenças dimensionais e dos desvios de planeza. A partir da aplicação da incerteza de medição nos resultados alcançados, foi possível verificar que a mudança na penetração de trabalho de uma condição branda ( $a_e = 10 \mu\text{m}$ ) para uma condição mais severa ( $a_e = 30 \mu\text{m}$ ), gerou um aumento de 34,62 % no parâmetro  $R_a$  de rugosidade das superfícies, as quais apresentaram maiores evidências de deformação plástica, em termos de deslocamento de material. As diferenças dimensionais e os desvios de planeza, aumentaram em 164,10 % e 143,48 %, respectivamente, o que evidenciou a influência da condição de penetração de trabalho do rebolo na peça, sobre a qualidade das amostras de Ti-6Al-4V retificadas.

**Palavras-chave:** Ligas de titânio, análise metrológica, tolerâncias dimensionais e geométricas, incerteza de medição, qualidade superficial.

DE FARIA, F. A.; BOCATO, N. I. **Evaluation of metrological aspects on the surface quality of titanium alloy.** 2024. 83p. Final Course Project Monograph, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

## ABSTRACT

Titanium alloys are materials that have wide applications in the aerospace industry, as well as in biomedical components, due to a unique combination of properties, such as low density, high mechanical and corrosion resistance and biocompatibility with the human body. However, these materials have low machinability, due to their high mechanical resistance, low thermal conductivity and chemical reactivity with ceramic materials, which make up the cutting tools. Particularly in the grinding of titanium alloys, it is essential that an effective analysis be developed of the effects that process cutting parameters can have on the surface quality of ground surfaces. Thereby, a metrological analysis of the surface finish is necessary in terms of dimensional and geometric tolerances, and requirements of engineering projects, to ensure functionality and interchangeability between machined components. The application of measurement uncertainty concepts is essential for a reliable and traceable analysis of measured results. From this perspective, the purpose of the project is to present the effects generated by two different radial depths of cut conditions ( $a_e = 10 \mu\text{m}$  and  $a_e = 30 \mu\text{m}$ ) on the surface quality of samples of the Ti 6Al 4V alloy, ground with a carbide grinding wheel. silicon (SiC), in terms of average roughness (Ra), images of ground surfaces (SEM), dimensional deviations and flatness deviations. From the application of measurement uncertainty in the results achieved, it was possible to verify that the change in radial depth of cut value from a soft condition ( $a_e = 10 \mu\text{m}$ ) to a more severe condition ( $a_e = 30 \mu\text{m}$ ), generated an increase of 34, 62% in the surface roughness parameter Ra, which showed greater evidence of plastic deformation, in terms of material displacement. Dimensional deviations and flatness deviations increased by 164.10% and 143.48%, respectively, which highlighted the influence of radial depth of cut conditions in the workpiece, on the quality of the Ti-6Al-4V ground samples.

**Keywords:** Titanium alloy, metrological analysis, dimensional and geometrical tolerances, measurement uncertainty, surface quality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1- Esquema referente à estrutura molecular do titânio (Leyens; Peters, 2003). .....	7
Figura 2. 2 - Influência da adição de elementos no diagrama de fases em ligas de titânio (Leyens; Peters, 2003).....	7
Figura 2. 3 - Principais elementos do processo de retificação (Pereira et al., 2023). ..	10
Figura 2. 4 – Esquema ilustrativo acerca do mecanismo de ação da partícula abrasiva do rebolo sobre materiais dúcteis (Adaptado de Klocke (2009)). .....	12
Figura 2. 5 - Parâmetros de corte do processo de retificação plana tangencial (ROWE; Andrew, 2014).....	13
Figura 2. 6 - Ilustração acerca de tolerância dimensional, dimensão máxima e mínima de um elemento mecânico (Material de aula <a href="https://slideplayer.com.br/slide/13191252/">https://slideplayer.com.br/slide/13191252/</a> ). .....	17
Figura 2. 7 - Representação das tolerâncias macrogeométricas no desenho (Adaptado de ABNT NBR ISO 6409, 1997).....	22
Figura 2. 8 - Definição esquemática da tolerância de planeza (Adaptado de (ABNT NBR ISO 6409, 1997) e site: <a href="https://www.kreometrology.com/medicao-tridimensional-planicidade.html">https://www.kreometrology.com/medicao-tridimensional-planicidade.html</a> - Acesso em abril de 2024). .....	24
Figura 2. 9 - Características de transmissão dos perfis de rugosidade e de ondulação (ABNT NBR ISO 4287, 2002). .....	28
Figura 2. 10 – Perfil real da superfície, no qual são definidos os parâmetros de rugosidade (ABNT NBR ISO 4287, 2002). .....	29
Figura 3. 1 – Fluxograma que contempla as etapas desenvolvidas ao longo dos ensaios experimentais de retificação. ....	35
Figura 3. 2 – Retificadora plana tangencial P36 MELLO S.A, disponível no Laboratório de Usinagem Convencional (LUC-UFU). ....	36
Figura 3. 3 – Posicionamento do rebolo abrasivo de SiC junto a máquina retificadora. .....	36
Figura 3. 4 – Posicionamento do dressador ponta única de diamante junto ao rebolo de SiC.....	37
Figura 3. 5 – Posicionamento de cada amostra na morsa de precisão, sobre a mesa da retificadora plana tangencial. ....	38
Figura 3. 6 – Posicionamento das amostras fixadas na morsa de precisão e posicionadas sobre o desempenho, para a medição de rugosidade. ....	41
Figura 3. 7 – Vista frontal da máquina de medir por coordenadas BR-M443 (a), vista aproximada da máquina (b). ....	43
Figura 3. 8 – Apalpador com ponta de rubi (a). Haste com esfera de cerâmica, para calibração da ponta do apalpador. ....	44
Figura 4. 1 – Valores de rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ ) das amostras de Ti-6Al-4V retificadas em função da penetração de trabalho $a_e$ ( $\mu\text{m}$ ) do rebolo sobre a peça. ....	49
Figura 4. 2 - Imagens das texturas das superfícies de Ti-6Al-4V retificadas na região central da peça, a uma penetração de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$ (a), na extremidade da peça	

a um $a_e = 10 \mu\text{m}$ (b); na região central da peça, a uma penetração de trabalho $a_e = 30 \mu\text{m}$ (c) e na extremidade da peça, a uma penetração de trabalho $a_e = 30 \mu\text{m}$ . .....	53
Figura 4. 3 – Diferenças dimensionais nas amostras retificadas de Ti-6Al-4V (em mm) após a retificação, em função das condições de penetração de trabalho $a_e$ ( $\mu\text{m}$ ). .....	57
Figura 4. 4 – Desvios de planeza (mm) das amostras de Ti-6Al-4V retificadas, em função das condições de penetração de trabalho $a_e$ ( $\mu\text{m}$ ). .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Graus de tolerância padrão em função das dimensões nominais (ABNT NBR 6158, 1995; De Oliveira; Da Silva; Arencibia, 2019). .....	18
Tabela 2. 2 – Principais tolerâncias macrogeométricas (ABNT NBR ISO 6409, 1997; Agostinho; Rodrigues; Lirani, 1977). .....	23
Tabela 3. 1 – Composição química e propriedades mecânicas e térmicas da liga Ti-6Al-4V (Adaptado de (Leyens; Peters, 2003; Pereira et al., 2023). .....	38
Tabela 3. 2 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de retificação de amostras da liga Ti-6Al-4V, com rebolo de SiC. ....	39
Tabela 3. 3 – Estimativas e cálculos para a incerteza de medição associada à rugosidade Ra. ....	42
Figura 4. 1 – Valores de rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ ) das amostras de Ti-6Al-4V retificadas em função da penetração de trabalho $a_e$ ( $\mu\text{m}$ ) do rebolo sobre a peça. ....	49
Figura 4. 2 - Imagens das texturas das superfícies de Ti-6Al-4V retificadas na região central da peça, a uma penetração de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$ (a), na extremidade da peça a um $a_e = 10 \mu\text{m}$ (b); na região central da peça, a uma penetração de trabalho $a_e = 30 \mu\text{m}$ (c) e na extremidade da peça, a uma penetração de trabalho $a_e = 30 \mu\text{m}$ . ....	53
Figura 4. 3 – Diferenças dimensionais nas amostras retificadas de Ti-6Al-4V (em mm) após a retificação, em função das condições de penetração de trabalho $a_e$ ( $\mu\text{m}$ ). .....	57
Figura 4. 4 – Desvios de planeza (mm) das amostras de Ti-6Al-4V retificadas, em função das condições de penetração de trabalho $a_e$ ( $\mu\text{m}$ ). .....	61
Tabela 4. 1 - Incerteza de medição associada ao parâmetro Ra, na condição de penetração de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$ . .....	48
Tabela 4. 2 - Incerteza de medição associada ao parâmetro Ra, na condição de penetração de trabalho $a_e = 30 \mu\text{m}$ . .....	48
Tabela 4. 3 - Incerteza de medição associada ao diferença dimensional ( $D_d$ ), na condição de penetração de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$ . .....	56
Tabela 4. 4 - Incerteza de medição associada ao diferença dimensional ( $D_d$ ), na condição de penetração de trabalho $a_e = 30 \mu\text{m}$ . .....	56
Tabela 4. 5 – Incerteza de medição associada ao desvio de planeza ( $D_p$ ), na condição de penetração de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$ . .....	60
Tabela 4. 6 – Incerteza de medição associada ao desvio de planeza ( $D_p$ ), na condição de penetração de trabalho $a_e = 30 \mu\text{m}$ . .....	60

## Sumário

<b>CAPÍTULO I</b> .....	2
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	2
<b>1.1 Objetivo principal</b> .....	3
<b>1.2 Objetivos secundários</b> .....	4
<b>1.3 Contribuição</b> .....	4
<b>1.4 Estrutura do Projeto de Fim de Curso</b> .....	4
<b>CAPÍTULO II</b> .....	6
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	6
<b>2.1 Retificabilidade da liga Ti-6Al-4V</b> .....	6
<b>2.2 Processo de retificação</b> .....	9
<b>2.3 Principais Parâmetros de Retificação</b> .....	12
2.3.1 <i>Velocidade de Corte (<math>V_s</math>)</i> .....	13
2.3.2 <i>Velocidade da Peça (<math>V_w</math>)</i> .....	14
2.3.3 <i>Penetração de Trabalho (<math>ae</math>)</i> .....	15
2.3.4 <i>Profundidade de Corte (<math>ap</math>)</i> .....	15
2.3.5 <i>Taxa de Remoção de Material (<math>Q_w</math>)</i> .....	15
<b>2.4 Qualidade superficial após a retificação</b> .....	16
2.4.1 <i>Tolerâncias dimensionais</i> .....	16
2.4.2 <i>Tolerâncias macrogeométricas</i> .....	20
2.4.3 <i>Rugosidade superficial</i> .....	26
<b>2.5 Incerteza de medição</b> .....	30
<b>CAPÍTULO III</b> .....	34
<b>METODOLOGIA</b> .....	34
<b>3.1 Máquina ferramenta</b> .....	35
<b>3.2 Rebolo abrasivo</b> .....	36
<b>3.3 Material da peça</b> .....	37
<b>3.4 Fluido de corte</b> .....	39
<b>3.5 Planejamento experimental</b> .....	39
<b>3.6 Parâmetros de saída</b> .....	40
3.6.1 <i>Rugosidade</i> .....	40
3.6.2 <i>Textura das superfícies retificadas</i> .....	42
3.6.3 <i>Desvio dimensional</i> .....	43
3.6.4 <i>Desvio de Planeza</i> .....	45
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	47
<b>Resultados e discussões</b> .....	47

<b>4.1</b>	<b>Rugosidade das superfícies</b> .....	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b>Textura das superfícies (MEV)</b> .....	<b>51</b>
<b>4.3</b>	<b>Desvios dimensionais</b> .....	<b>55</b>
<b>4.4</b>	<b>Desvios de planeza</b> .....	<b>59</b>
<b>CAPÍTULO V</b> .....		<b>63</b>
<b>CONCLUSÕES</b> .....		<b>63</b>
<b>CAPÍTULO VI</b> .....		<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....		<b>65</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

As ligas de titânio são materiais que possuem uma combinação muito específica de propriedades e características, que fazem com que essas ligas possuam uma ampla margem de aplicação em diferentes setores da indústria, como o aeroespacial, bem como na fabricação de componentes para implantes odontológicos e próteses biocompatíveis com o corpo humano (Hoque et al., 2022; Nosenko; Nosenko; Koryazhkin, 2018).

Nesse sentido, é essencial avaliar a qualidade superficial dos componentes fabricados, a partir dessas ligas especiais, a fim de assegurar que as condições especificadas em projeto mantidas ao longo da cadeia produtiva (Raj Rai et al., 2019; D. Zhao et al., 2018).

Com destaque para a liga Ti-6Al-4V, que possui vasta aplicação em componentes da fuselagem de aviões e em palhetas do motor aeronáutico, assim como na fabricação de parafusos para fixação dentária e próteses para reabilitação humana (ex: próteses da rótula do joelho e da bacia) (PEREIRA et al., 2023). Sob essas condições, é essencial que as tolerâncias dimensionais e geométricas, geradas pelos processos de fabricação, atendam aos requisitos especificados no desenho projetivo, com o objetivo de garantir a correta funcionalidade e intercambiabilidade entre os componentes (Agostinho et al., 1977; Marinescu, 2016).

Todavia, as ligas de titânio são materiais que possuem uma baixa usinabilidade, de um modo geral, em função de algumas características intrínsecas aos elementos que as compõem (Mukhopadhyay et al., 2019). A exemplo da liga Ti-6Al-4V, a mais comumente empregada na indústria aeroespacial, que possui uma alta resistência mecânica, mesmo em condições adversas (1 600 MPa), uma baixa condutividade térmica ( $6.6 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K}^{-1})$ , a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), o que dificulta a dissipação de calor ao longo da usinagem e compromete a qualidade superficial da liga e, principalmente, a alta reatividade química do seu principal elemento de liga - o titânio - com materiais cerâmicos, haja vista que, a maior parte das ferramentas em usinagem são de materiais cerâmicos, o que contribui para uma difícil usinabilidade deste material (DE MELLO et al., 2017; LEYENS; PETERS, 2003).

Em especial, no que diz respeito à retificação, um processo convencional de usinagem por abrasão, em que a ferramenta de corte, ou rebolo abrasivo, é composta por inúmeros grãos abrasivos cerâmicos (aleatórios), de pequenas dimensões (quando comparados com

processos convencionais de usinagem, como torneamento e fresamento), multiformes e multicortantes (Malkin & Guo, 2008).

Esse processo possui uma combinação muito específica de variáveis, sendo que, o movimento de rotação e alta velocidade de corte do rebolo, sua baixa penetração sobre a peça e a velocidade desta conferem uma combinação cinemática única, a qual é capaz de proporcionar superfícies com alta qualidade superficial, no que tange a baixos valores de rugosidade média (abaixo de  $1,60 \mu\text{m}$ ), bem como tolerâncias dimensionais (IT 3 à IT 6) e tolerâncias de forma macrogeométricas estreitas (Chen & Rowe, 1996a; Klocke, 2009).

Contudo, ao longo do processo de retificação, mesmo na presença de condição lubrificante, as temperaturas desenvolvidas na zona de contato rebolo – peça são muito elevadas e, uma expressiva parcela desse calor é direcionado à peça (até 85 %), o que em materiais com baixa condutividade térmica, como é o caso da liga Ti-6Al-4V, geralmente proporciona danos de origem térmica, deformações plásticas expressivas e deslocamento lateral de material comprometendo, assim, o qualidade superficial do elemento retificado (Klocke & Linke, 2008; Linke & Klocke, 2010)

Portanto, a análise aprofundada acerca dos efeitos que variáveis de entrada, ou parâmetros de corte do processo, exercem sobre integridade de peças de ligas de titânio retificadas é fundamental, tendo em vista os requerimentos de projetos e as aplicações desses materiais especiais (Marinescu, 2016; Rowe & Andrew, 2014).

Dessa maneira, o presente trabalho tem por finalidade avaliar os efeitos que duas diferentes condições de penetrações de trabalho ( $a_e = 10 \mu\text{m}$  e  $a_e = 30 \mu\text{m}$ ) exercem sobre a qualidade superficial de uma liga (Ti-6Al-4V), em termos da rugosidade média das superfícies (parâmetro Ra), imagens das superfícies retificadas (obtidas via Microscopia Eletrônica de Varredura), diferenças dimensionais (diferença entre as alturas das peças, antes e após a retificação) e desvios de planeza.

A fim de que os dados mensurados pudessem ser analisados com maior confiabilidade e rastreabilidade, a incerteza de medição foi aplicada para avaliar metrologicamente, os efeitos do processo de retificação sobre a qualidade superficial de amostras da liga Ti-6Al-4V.

## 1.1 Objetivo principal

O referido projeto de fim de curso tem como objetivo principal aplicar conceitos de Metrologia na avaliação de efeitos do processo de retificação sobre a qualidade superficial de amostras da liga Ti-6Al-4V. Para o desenvolvimento do estudo, foram realizados ensaios experimentais de retificação plana superficial em amostras da liga aeronáutica Ti-6Al-4V e,

posteriormente, foram feitas medições nas superfícies usinadas em termos de rugosidade superficial, imagens via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), diferenças dimensionais e desvios de planeza.

## **1.2 Objetivos secundários**

Como objetivos secundários do projeto de fim de curso, pode-se citar:

- Contribuir para uma análise mais aprofundada acerca da influência que parâmetros de corte exercem sobre superfícies usinadas;
- Comprovar que o processo de retificação é eficaz ao produzir peças com desvios macrogeométricos estreitos;
- Aprimorar a avaliação de diferenças dimensionais e geométricas em superfícies retificadas;
- Contribuir para a popularização do cálculo da incerteza de medição em usinagem.

## **1.3 Contribuição**

Ao longo da medição dos desvios dimensionais, dos desvios macrogeométricos e da rugosidade das amostras de Ti-6Al-4V foram implementados sistemas de medição como a máquina de medir por três coordenadas (MM3C) e um rugosímetro portátil, cujos resultados alcançados foram analisados através da aplicação da incerteza de medição.

Por meio da aplicação desse conceito metrológico é possível uma avaliação dos resultados com maior confiabilidade e qualidade, dos efeitos das condições de penetração de trabalho sobre a integridade superficial de amostras da liga de titânio retificadas.

## **1.4 Estrutura do Projeto de Fim de Curso**

O referido projeto de fim de curso é desenvolvido e organizado em cinco capítulos, sendo que o Capítulo I compreende a introdução do trabalho, os objetivos principais e secundários da pesquisa, assim como a contribuição deste trabalho. O Capítulo II abrange a revisão bibliográfica elaborada com base em livros, teses, dissertações, normas técnicas bem como artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, a fim de fundamentar o estudo sobre a retificação das ligas de titânio, os principais parâmetros de retificação que

influenciam no processo, tolerâncias dimensionais e macrogeométricas, rugosidade e incerteza de medição.

Nesse seguimento, o Capítulo III compreende a metodologia empregada desde a realização de ensaios experimentais de retificação na liga Ti-6Al-4V até a análise de parâmetros de saída do processo, como rugosidade das superfícies, imagens de MEV, diferenças dimensionais e desvios de planeza, bem como a aplicação da incerteza de medição para avaliação metrológica dos resultados, os quais são apresentados, analisados e discutidos, posteriormente, no Capítulo IV. No Capítulo V são apresentadas as conclusões obtidas. E, no Capítulo VI, as referências bibliográficas.

Ainda ao final do trabalho, encontra-se o ANEXO I contendo o certificado de calibração da máquina de medir por coordenadas (MMC) empregada nas medições de diferenças dimensionais e de planeza e na análise de incerteza de medição.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo deste segundo capítulo do trabalho, são abordados temas que fundamentaram a presente pesquisa, a saber: retificabilidade da liga Ti-6Al-4V, processo de retificação, principais parâmetros de retificação, qualidade superficial após a retificação e incerteza de medição.

#### 2.1 Retificabilidade da liga Ti-6Al-4V

Na indústria aeroespacial, há uma demanda pela aplicação de ligas de alto desempenho para a fabricação de peças e componentes do motor aeronáutico e da fuselagem (Anand et al., 2019; Mukhopadhyay & Kundu, 2019c). Alguns dos materiais usualmente empregados, em componentes de aeronaves, são as ligas titânio sendo que, dentre essas, a liga Ti-6Al-4V é a que mais se destaca por ter uma específica combinação propriedades, como baixa densidade ( $4,42 \text{ g.cm}^{-3}$ ), resistência à corrosão, em condições adversas, resistência mecânica (1 600 Mpa) e biocompatibilidade com o corpo humano (Kacalak et al., 2018).

A liga aeronáutica em questão possui uma microestrutura composta por uma fase  $\alpha/\beta$  e diferentes tratamentos térmicos podem gerar diferentes microestruturas, Fig. 2. 1. Após o resfriamento da fase  $\beta$  do campo de fase do titânio, os planos mais densamente compactados da fase  $\beta$   $\{110\}$  são transformados em planos basais  $\{0001\}$  da fase  $\alpha$  hexagonal (LEYENS; PETERS, 2003). A distância entre os planos basais em  $\alpha$  é ligeiramente maior que a distância correspondente entre os planos da fase  $\beta$   $\{110\}$  conforme observado na Fig. 2. 2 (LEYENS; PETERS, 2003).

Portanto, a transformação  $\alpha/\beta$  gera uma pequena distorção atômica, a qual leva a uma ligeira contração dos eixos e reduz a taxa  $c/a$  para valores abaixo de estruturas atômicas hexagonais compactadas. Por fim, um pequeno aumento no volume é observado macroscopicamente durante o resfriamento através da temperatura de transformação  $\alpha/\beta$  (LEYENS; PETERS, 2003).

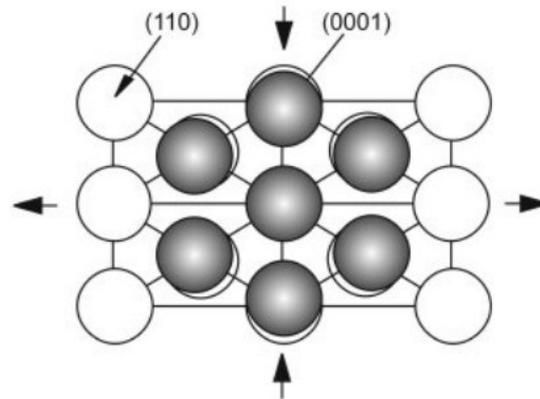


Figura 2. 1- Esquema referente à estrutura molecular do titânio (Leyens; Peters, 2003).

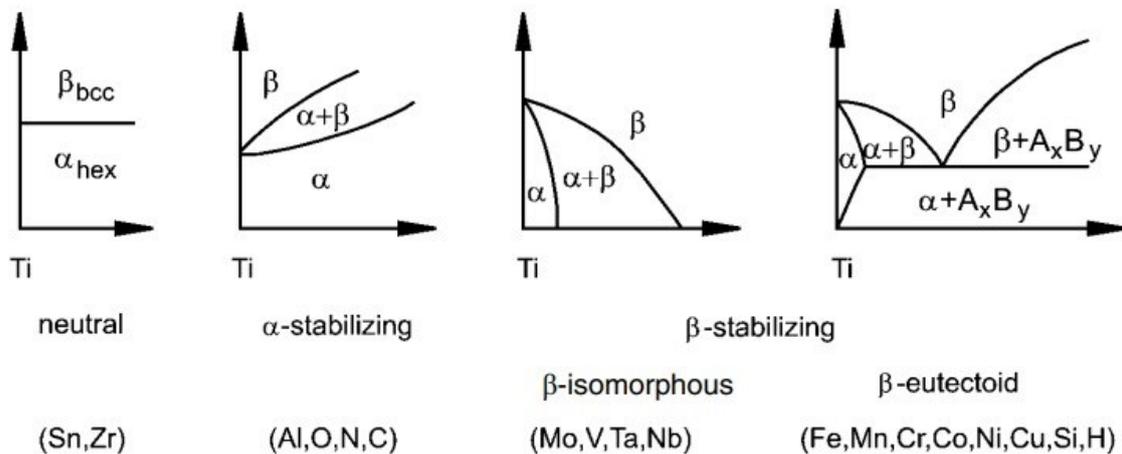


Figura 2. 2 - Influência da adição de elementos no diagrama de fases em ligas de titânio (Leyens; Peters, 2003).

No seguimento aeroespacial, algumas características e propriedades dessa liga são determinantes para a sua aplicabilidade em palhetas do motor aeronáutico assim como em partes estruturais da fuselagem de aeronaves (Bai et al., 2019). As principais propriedades da liga Ti-6Al-4V são: elevada resistência à corrosão, baixa densidade ( $4,42 \text{ g.cm}^{-3}$ ), e estabilidade em altas temperaturas a tornam ideal para componentes estruturais, como fuselagens e asas. Na área biomédica, sua compatibilidade biológica e resistência à corrosão a tornam uma escolha comum em implantes médicos (Singh et al., 2020).

Em aplicações de alto desempenho, seu baixo módulo de elasticidade ( $105 - 120 \text{ kN.mm}^{-2}$ ), e baixa densidade ( $4,42 \text{ g.cm}^{-3}$ ), quase metade da densidade das ligas de níquel) são vantajosos em componentes como quadros de bicicletas e sistemas de exaustão de alto rendimento. Diante dessas propriedades e características, a liga Ti-6Al-4V é considerada

como material versátil, que a demandas de durabilidade e ambientais em diferentes setores (Mukhopadhyay & Kundu, 2018).

No que tange à aplicabilidade, peças e componentes fabricados a partir de ligas de titânio precisam ser submetidos a processos de fabricação que permitam assegurar, a esses elementos, tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas, a fim de que atendem os requisitos de projeto (Klocke, 2009; Mukhopadhyay & Kundu, 2019a). Nesse sentido, a retificação de materiais que apresentam baixa usinabilidade surge como melhor opção, sendo um método ideal para produzir peças com um acabamento superficial de qualidade, bem como tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas (Hou & Komanduri, 2003; Kadivar et al., 2020).

No entanto, a retificabilidade das ligas de titânio é comprometida em razão de algumas características do próprio material, tais como a baixa condutividade térmica (6,6 W/mK), e em função de sua alta resistência à tração, em altas temperaturas (acima de 566 °C) (LEYENS; PETERS, 2003 ; PEREIRA et al., 2023). Além disso, as ligas de titânio apresentam elevada afinidade química com todos os materiais comumente utilizados para ferramentas, já que a maior parte desses materiais também possuem o elemento titânio em sua estrutura, o que estimula o desgaste por difusão (Hou & Komanduri, 2003; Kadivar et al., 2020).

Em um estudo desenvolvido por Pereira et al. (2023) a influência de diferentes condições de dressagem do rebolo de SiC sobre a retificabilidade da liga Ti-6Al-4V foi avaliada, em termos da rugosidade das superfícies, imagens de MEV, microestrutura abaixo da superfície usinada e relação G. A análise dos resultados possibilitou verificar que, ao mudar o condicionamento do rebolo de uma condição de desbaste ( $U_d = 3$ ) para uma condição de acabamento ( $U_d = 12$ ) gerou um aumento de 53,74 % na rugosidade Ra, sulcos mais orientados nas superfícies retificadas, bem como uma redução nos danos térmicos abaixo das superfícies retificadas e um aumento de 65,93 % na relação G, indicando uma melhora na retificabilidade desta liga (PEREIRA et al., 2023).

A escolha do fluido de corte influencia diretamente na retificação do material. Sob essa perspectiva, MUKHOPADHYAY e KUNDU, (2019) desenvolveram um estudo sobre uso de fluidos de corte não convencionais, como água com sabão, nitrito de sódio e propilenoglicol, durante a retificação da liga Ti-6Al-4V com um rebolo de carbetto de silício, os resultados mostraram que esses fluidos não convencionais superaram o desempenho do fluido sintético tradicional e da retificação a seco. Em particular, o propilenoglicol destacou-se, na redução das forças de retificação, a energia específica e a rugosidade superficial, além de melhorar a relação G, proporcionando uma qualidade superficial superior às peças usinadas (MUKHOPADHYAY; KUNDU, 2019).

Em outro estudo desenvolvido por De Mello et al. (2017), os autores buscaram avaliar a influência que diferentes condições de corte operacionais podem exercer sobre a qualidade

superficial da liga Ti-6Al-4V, após a retificação com rebolo de carbeto de silício (SiC). Os ensaios foram desenvolvidos sob diferentes condições de penetração de trabalho,  $a_e = 10 \mu\text{m}$  e  $a_e = 20 \mu\text{m}$ , na condição de lubrificação jorro abundante e MQL.

A partir da análise da rugosidade das superfícies da liga aeronáutica, foi constatado que os parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  são diretamente influenciados pela combinação das condições de penetração de trabalho e atmosfera de lubrificação. De maneira geral, os valores de rugosidade  $R_a$  alcançados foram inferiores a  $1 \mu\text{m}$ , em especial sob a condição de  $a_e = 10 \mu\text{m}$  e MQL, a rugosidade  $R_a$  oscilou entre  $0,5 \mu\text{m}$  e  $0,6 \mu\text{m}$ , enquanto o  $R_t$  variou de  $4,20 \mu\text{m}$  e  $5,50 \mu\text{m}$  (de Mello et al., 2017).

Em termos da textura das superfícies, os autores observam, via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que sob a condição mais branda de penetração de trabalho e MQL, as superfícies usinadas apresentaram sulcos mais orientados, com poucas deformações laterais de material. Todavia, sob a condição de jorro abundante e  $a_e = 10 \mu\text{m}$ , foram detectados sulcos profundos e marcas de arrancamento de material, indicando que sob essa condição houve muita deformação plástica do material (de Mello et al., 2017).

Sob essa perspectiva, é possível afirmar que para a retificação da liga Ti-6Al-4V, é necessária uma adequada escolha dos parâmetros de corte e rebolo abrasivo, tendo em vista as características dessa liga aeronáutica, como baixa condutividade térmica, elevada resistência mecânica, em altas temperaturas, e reatividade química com materiais cerâmicos.

Em suma, as propriedades do material em questão assim como as variáveis de entrada do processo, influenciam sobremaneira na qualidade superficial, no que diz respeito às tolerâncias microgeométricas (rugosidade) e acabamento após retificação. Na literatura, ainda são escassos os estudos acerca de diferenças dimensionais macrogeométricos, os quais se mostram fundamentais para a análise da qualidade da liga Ti-6Al-4V, dadas as suas principais aplicações.

## 2.2 Processo de retificação

A retificação é um processo de usinagem por abrasão, no qual uma ferramenta abrasiva de revolução atua sobre a peça no sentido de promover a remoção de material, sob a forma de cavacos com pequenas dimensões (Malkin & Guo, 2008). Nesse processo, o rebolo ou ferramenta de corte, é composto por inúmeras partículas cerâmicas abrasivas, multiformes, de arestas afiadas, as quais são interligadas por um material aglomerante; além disso, existem poros na estrutura do rebolo, com a finalidade que alojar fluido de corte ou mesmo cavacos, a serem expelidos para fora da zona de corte, pelo movimento de revolução do rebolo, Fig. 2. 3 (Marinescu, 2016).

Em razão da combinação cinemática entre o movimento de avanço da peça, a rotação e velocidade de corte do rebolo e pequenos valores de penetração de trabalho (quando comparado com processos convencionais de usinagem com ferramentas de geometria definida) a retificação é um processo que possibilita a geração de superfícies com baixos valores de rugosidade média  $R_a$  (em geral, abaixo de  $1,60 \mu\text{m}$ ), tolerâncias macrogeométricas de forma estreitas e tolerâncias dimensionais que variam de IT 3 a IT 6 (Klocke, 2009; Klocke & Linke, 2008). Esse processo é amplamente utilizado na indústria para produzir peças com alta qualidade superficial, como engrenagens, eixos, cilindros, rolamentos e outras peças mecânicas (MALKIN; GUO, 2008).

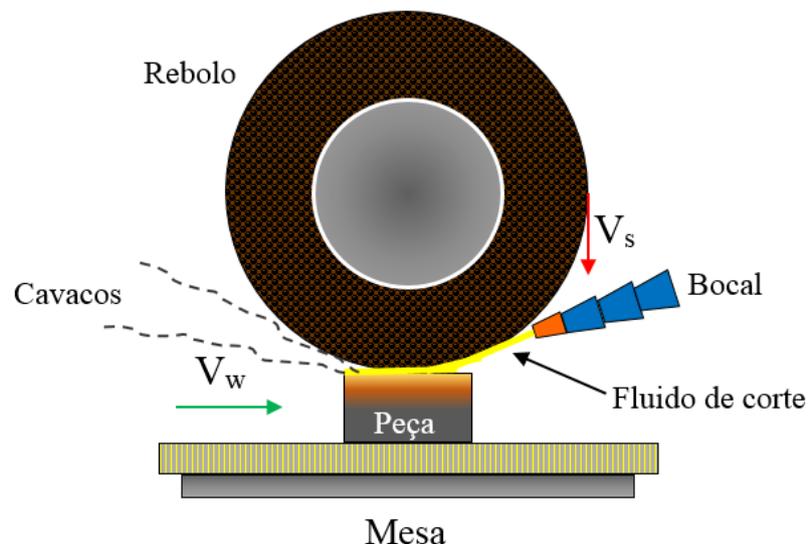


Figura 2. 3 - Principais elementos do processo de retificação (PEREIRA et al., 2023).

Conforme abordado por Malkin e Guo (2008), a retificação é um processo que demanda uma quantidade considerável de energia para a remoção eficiente do material.

O calor gerado pelo processo é um dos aspectos críticos a serem considerados durante a operação, uma vez que pode afetar significativamente a integridade dimensional e a qualidade superficial das peças (Chen & Rowe, 1996b; Malkin & Guo, 2008). Em razão da natureza das ferramentas de retificação, em particular os rebolos de cerâmica de baixa condutividade térmica, grande parte desse calor é transferida para a peça sendo usinada (Rowe & Andrew, 2014). Essa transferência térmica pode causar um aumento na temperatura da peça, facilitando processos de dilatação e deformação térmica (Rowe & Andrew, 2014). A concentração de calor é mais intensa na zona de contato entre a peça e o rebolo, e a dificuldade do fluido de corte em penetrar nessa região pode exacerbar esse efeito térmico (Rowe & Andrew, 2014). Portanto, a gestão eficaz do calor durante a retificação é crucial para garantir a precisão dimensional e a qualidade da superfície das peças usinadas (MALKIN; GUO, 2008; VANRUSSELT et al., 2022).

Durante o processo de usinagem, as altas temperaturas geradas podem desencadear danos substanciais nas superfícies das peças, incluindo a queima e outras alterações microestruturais. Para mitigar esses comportamentos, diversas pesquisas estão em curso, focando na determinação de parâmetros de corte mais adequados, como a velocidade da mesa, penetração de trabalho, seleção do rebolo e, especialmente, o uso do fluido de corte.

A aplicação de fluidos com alta capacidade de refrigeração tem sido amplamente preferida, uma vez que não só influencia na força de corte e na integridade superficial da peça, mas também minimiza diferenças dimensionais frequentemente observados na retificação. Além disso, a função de lubrificação do fluido é crucial, pois contribui para reduzir o atrito entre o rebolo e a peça, garantindo assim um acabamento mais brando e preciso (Mukhopadhyay & Kundu, 2019c, 2019a). A qualidade e a quantidade adequadas do fluido de corte também desempenham um papel fundamental, influenciando diretamente na qualidade da peça usinada, tanto na superfície quanto na subsuperfície (Marinescu, 2016).

No processo de retificação, os mecanismos envolvidos no corte, como atrito, cisalhamento e remoção do cavaco, apresentam desafios particulares de avaliação devido à natureza irregular dos grãos abrasivos, às altas velocidades de corte empregadas e às dimensões do corte (Malkin & Guo, 2008; Marinescu, 2016). Além disso, os abrasivos convencionais, como alumina e carbetos de silício, possuem características refratárias que contribuem para a complexidade do processo (Malkin & Guo, 2008).

Enquanto em usinagem com ferramenta de geometria definida, a formação do cavaco é mais acessível para observação devido ao tamanho dos cavacos formados e à técnica de quick-stop, ele não se aplica facilmente à retificação devido às velocidades de corte muito elevadas (Marinescu, 2016). Em operações que empregam a usinagem com ferramenta de

geometria definida, esta avança sobre o material da peça, induzindo deformações que resultam na formação de cavacos que deslizam sobre a superfície de saída da ferramenta (Marinescu, 2016). A dinâmica da usinagem pode gerar cavacos longos e contínuos em materiais dúcteis, tornando o processo notoriamente cíclico (Marinescu, 2016).

No contexto de materiais dúcteis, a remoção de material durante o processo de retificação ocorre em três estágios distintos, como mostra a Fig. 2. 4 (Klocke, 2009). Inicialmente, a aresta cortante do grão abrasivo penetra na peça com uma profundidade mínima, causando apenas deformação elástica no material (Klocke, 2009).

À medida que o grão abrasivo continua a penetrar na peça, o material é empurrado e deslocado lateralmente pela aresta cortante, resultando em deformação plástica sem remoção de material. Somente quando a penetração de trabalho do grão abrasivo atinge um valor crítico, garantindo a remoção efetiva do material da peça, é que o cavaco é formado (Klocke, 2009; Linke & Klocke, 2010).

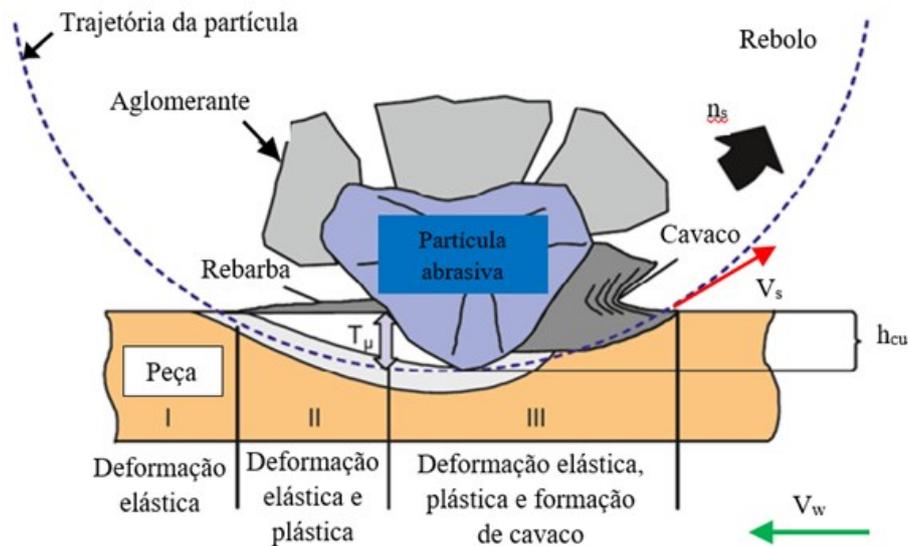


Figura 2. 4 – Esquema ilustrativo acerca do mecanismo de ação da partícula abrasiva do rebolo sobre materiais dúcteis (Adaptado de KLOCKE (2009)).

### 2.3 Principais Parâmetros de Retificação

O processo de retificação é complexo e exige o entendimento de diversos fatores que podem estar presentes e causar alterações no processo em questão, Fig. 2. 5 (Malkin & Guo, 2008). Dessa maneira, o controle e a seleção correta dos parâmetros do processo de retificação são necessários para o adequado entendimento acerca da influência desses parâmetros sobre a qualidade superficial das amostras, sendo que para a completa análise são empregados conceitos de metrologia. (PALMER et al., 2018; PUERTO et al., 2013). Ao longo da seção 2. 3 tópicos serão apresentados e descritos os principais parâmetros de retificação.

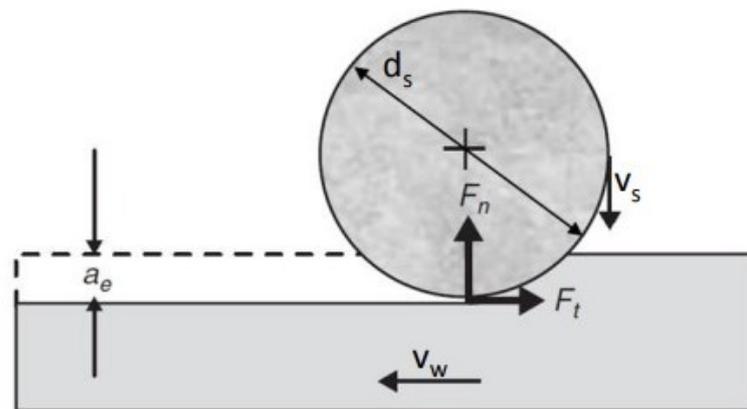


Figura 2. 5 - Parâmetros de corte do processo de retificação plana tangencial (Rowe & Andrew, 2014).

### 2.3.1 Velocidade de Corte ( $V_s$ )

A velocidade de corte está relacionada à velocidade do rebolo e pode ser calculada a partir de Eq. 2. 1 (Chen & Rowe, 1996a; Malkin & Guo, 2008)

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \text{ [m/s]} \quad \text{Eq.2. 1}$$

Em que:

$n_s$  representa a rotação em rpm (rotações por minuto);

$d_s$  representa o diâmetro do rebolo, em mm.

Com o aumento na velocidade de corte, a frequência de contato do rebolo com a peça aumenta progressivamente, o que proporciona uma menor remoção de cavaco por uma mesma partícula abrasiva (Malkin & Guo, 2008). Por conseguinte, a espessura dos cavacos removidos é reduzida e resulta na redução da força de corte. A partir de tais reações, a rugosidade da peça usinada é aprimorada e o desgaste do rebolo torna-se menor (Malkin & Guo, 2008; Marinescu, 2016).

Todavia, é necessário que se tenha atenção em relação a temperatura na região de contato, visto que com aumento da intensidade de contato dos grãos com a peça, a temperatura se eleva. Caso a mesma não venha a ser controlada a partir de um fluido de corte refrigerante, a peça usinada poderá sofrer queima de retificação. (LIMA, 2016; (MALKIN; GUO, 2008)

### 2.3.2 *Velocidade da Peça ( $V_w$ )*

A velocidade da peça corresponde à velocidade de avanço e está diretamente relacionada à rugosidade da superfície da peça usinada. De acordo com a literatura, quando há um aumento expressivo nos valores referentes à velocidade de corte, o tempo de contato da peça/rebolo tende a diminuir o que proporciona, maior retirada de material pelos abrasivos do rebolo, posto que as tensões de corte durante a usinagem aumentam (Malkin & Guo, 2008). É importante ressaltar também que a relação de  $V_s/V_w$ , em valores mais comumente utilizados, está presente nas faixas de 100 a 200 (Malkin & Guo, 2008).

A experiência em retificação mostra que a combinação de valores mais baixos de velocidade da peça com valores mais elevados de penetração de trabalho resulta em menores impactos dos grãos abrasivos na peça. Esse fenômeno ocorre pois o tempo de contato peça/rebolo aumenta, o que promove uma menor força por grão agindo sobre a amostra e uma maior taxa de desgaste (Malkin & Guo, 2008).

Quando o contrário ocorre, ou seja, uma maior velocidade da peça com uma menor penetração de trabalho, evidencia-se um aumento do impacto dos grãos abrasivos sobre a peça, fazendo com que o rebolo se desgaste mais rapidamente. Apesar da força suportada por cada grão se tornar maior devido ao tempo de contato grão/peça ser menor, os grãos abrasivos tendem a desprender-se da superfície gerando uma constante renovação de grãos o que pode acelerar desgaste do rebolo (Rowe & Andrew, 2014).

### 2.3.3 Penetração de Trabalho ( $a_e$ )

A penetração de trabalho representa a profundidade de penetração do rebolo na peça, ou seja, está relacionada à profundidade de material removido a cada transição do rebolo pela peça. O aumento desse parâmetro acarreta o aumento das tensões de corte, ocasionando em um pior acabamento superficial (Malkin & Guo, 2008).

Tal consequência ocorre, pois aumentando o parâmetro em questão, o número de grãos ativos e o tempo de contato é maior. Com isso, haverá uma maior parcela de atrito desde o início do cavaco até o mesmo ser descartado, elevando assim, a temperatura e tensão de corte (Klocke, 2009). Além disso, vale ressaltar que a penetração de corte sempre será menor do que a ajustada na máquina devido a desgastes do rebolo (Rowe & Andrew, 2014).

### 2.3.4 Profundidade de Corte ( $a_p$ )

A profundidade de corte está relacionada com a profundidade axial, isto é, a penetração do rebolo na peça em uma direção perpendicular ao plano de trabalho. (RUZZI, 2022; MARINESCU et al., 2016).

Além disso, é também conhecida como a medida da espessura de material removido a cada revolução do rebolo. Esse parâmetro, geralmente se encontra na faixa de milésimos de milímetros a décimos de milímetros, tendo assim, tolerâncias estreitas. (MELLO, 2015; MACHADO et al., 2015).

### 2.3.5 Taxa de Remoção de Material ( $Q_w$ )

A taxa de remoção de material está relacionada ao volume de material removido por unidade de tempo. Ao elevar esse parâmetro, o acabamento da superfície da peça será afetado negativamente. A grandeza em questão pode ser determinada a partir da Eq. 2. 2 (RUZZI, 2022; MALKIN; GUO, 2008)

$$Q_w = a_p \cdot a_e \cdot V_w \quad \text{Eq. 2.2}$$

Onde:

$Q_w$  - taxa de remoção de material ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )

$a_p$  - profundidade de corte (mm);

$a_e$  - penetração de trabalho (mm);

$V_w$  - velocidade da peça (mm/min).

## 2.4 Qualidade superficial após a retificação

Dentre as várias possibilidades de avaliação da qualidade superficial de amostras submetidas ao processo de retificação, algumas variáveis se destacam, tais como: os desvios dimensionais, desvios geométricos e textura superficial. No que diz respeito aos desvios geométricos, existem duas categorias: os desvios macrogeométricos (desvios de forma, orientação, posição e batimento) e os desvios microgeométricos (rugosidade superficial) (ABNT NBR 6158, 1995; ABNT NBR ISO 6409, 1997).

Nos tópicos seguintes, serão abordados os conceitos relativos ao acabamento de superfícies retificadas, a exemplos das tolerâncias dimensionais, tolerâncias macrogeométricas, tolerâncias microgeométricas e textura superficial.

### 2.4.1 Tolerâncias dimensionais

Nos processos de fabricação em série, é fundamental que cada peça ou conjunto final de um produto seja especificado em termos de dimensões, forma ou acabamento a fim de que haja intercambiabilidade entre os componentes do sistema mecânico (Agostinho et al., 1977).

Nesse sentido, o conhecimento acerca das tolerâncias dimensionais é essencial, em especial nos componentes submetidos a processos que conferem alta qualidade superficial, como a retificação (Lv et al., 2022).

Tolerância dimensional, ou desvio dimensional, é um importante conceito metrológico definido como a diferença entre dimensões limites, isto é, entre os valores máximo e mínimo de um elemento, Fig. 2. 6. Dessa forma, quando as dimensões e as tolerâncias dimensionais permitidas são representadas, a intercambiabilidade é assegurada, sendo está definida como a possibilidade de que um item, componente ou elemento seja utilizado no lugar de outro (s) sem a necessidade de adaptação ou ajuste para atender aos requisitos básicos.

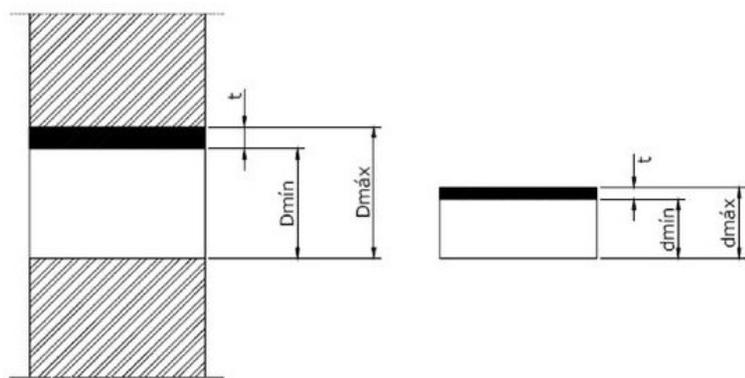


Figura 2. 6 - Ilustração acerca de tolerância dimensional, dimensão máxima e mínima de um elemento mecânico (Material de aula <https://slideplayer.com.br/slide/13191252/>).

Alguns conceitos fundamentais determinados pela norma ABNT NBR 6158, (1995) são essenciais para sistemas mecânicos que envolvem acoplamento entre peças. Inicialmente, eixo é um termo usado para descrever uma característica externa de uma peça, incluindo elementos não cilíndricos. Quando o eixo possui afastamento superior igual a zero, é denominado eixo base. Na mesma proporção, o furo é uma terminologia utilizada para descrever uma característica externa de uma peça, inclusive em elementos não cilíndricos, sendo que quando o afastamento inferior equivale a zero, é denominado furo base (ABNT NBR 6158, 1995; INMETRO, 2012b).

Outro importante conceito é o da dimensão, um número que expressa em uma unidade particular o valor de uma dimensão linear, podendo ser classificado como dimensão nominal, efetiva ou limite (Agostinho et al., 1977).

A dimensão nominal é aquela a partir da qual são derivadas as dimensões limites, pela aplicação dos afastamentos superior e inferior. A dimensão efetiva, por sua vez, é obtida por um processo de medição, enquanto a dimensão limite é a diferença verificada entre duas dimensões extremas permissíveis, sendo que a maior diferença permissível é a dimensão máxima e a menor permissível, é a diferença mínima (Agostinho et al., 1977).

Cabe ressaltar que o elemento é a parte da peça a ser analisada e a linha zero é a que representa a dimensão nominal e serve de origem para os afastamentos em uma representação gráfica das tolerâncias e ajustes (ABNT NBR 6158, 1995).

No que diz respeito aos afastamentos, esses indicam a diferença algébrica entre uma dimensão e a sua correspondente dimensão nominal. Quando designados para furos são escritos com letra maiúscula e, para eixos, letras minúsculas. Podem ser classificados em afastamento superior, inferior e zero. O afastamento superior é a diferença algébrica entre a dimensão máxima e sua correspondente nominal, sendo utilizadas as letras “ES” para furos e “es” para eixos (Agostinho et al., 1977).

Por outro lado, o afastamento inferior representa a diferença algébrica entre a dimensão mínima e a sua correspondente nominal, sendo as letras “EI” designadas para furos e “ei” para eixos. Já o afastamento fundamental define a posição do campo de tolerância em relação à linha zero, podendo ser ou o superior ou o inferior (ABNT NBR 6158, 1995; Agostinho et al., 1977).

Na mesma proporção, a tolerância é um valor absoluto que expressa a diferença entre os afastamentos superior e inferior, a qual pode ser estabelecida por meio das tolerâncias padrões, graus de tolerância padrão, campo de tolerância, classe de tolerância e unidade de tolerância. No que tange à tolerância padrão é qualquer tolerância que integre o *International Tolerance* ISO (1988) (ABNT NBR 6158, 1995; Agostinho et al., 1977).

Os graus de tolerância padrão ou qualidade de trabalho IT é o grupo de tolerâncias correspondente ao mesmo nível de precisão para todas as dimensões nominais, Tab. 2. 1, sendo que tais grupos são designados pelas letras “IT” associadas a um número que varia de 0 a 20 (ex: IT1, IT2, IT3 – mecânica extra precisa) (ABNT NBR 6158, 1995; Agostinho et al., 1977).

Tabela 2. 1 - Graus de tolerância padrão em função das dimensões nominais (ABNT NBR 6158, 1995; DE OLIVEIRA; DA SILVA; ARENCIBIA, 2019).

DIMENSÃO NOMINAL (MM)		GRAU DE TOLERÂNCIA PADRÃO						
		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7
Acima	Até e inclusive	Tolerância ( $\mu\text{m}$ )						
3	6	1	1,5	2,5	4	5	8	12
6	10	1	1,5	2,5	4	6	9	15
10	18	1,2	2	3	5	8	11	18
18	30	1,5	2,5	4	6	9	13	21
30	30	1,5	2,5	4	7	11	16	25

Em uma representação gráfica, os campos de tolerância definem o campo entre duas linhas o que identifica as dimensões máxima e mínima, sendo sua magnitude expressa pela tolerância e a sua posição é relativa à linha zero, Fig. 3. A classe de tolerância é uma combinação de letras que representa o afastamento fundamental seguido de um número que indica o grau de tolerância (ex: H7 – furo, h7 – eixo).

É importante enfatizar que, a depender da variação dimensional entre as peças que se acoplam é possível obter um sistema de ajustes, sendo que este é definido como a variação resultante da diferença, antes da montagem, entre as dimensões dos elementos que se acoplam, os quais possuem a mesma dimensão nominal. Existem alguns tipos de ajustes que são definidos em classes, a saber: ajuste com folga, ajuste com interferência e ajuste incerto (Agostinho et al., 1977; D. Zhao et al., 2018).

Portanto, para o adequado funcionamento entre elementos mecânicos que se acoplam é indispensável o conhecimento acerca dos conceitos que fundamentam as tolerâncias dimensionais e a sua adequada especificação em termos dos sistemas e classes de ajustes (Agostinho et al., 1977; D. Zhao et al., 2018).

Com a finalidade de desenvolver uma metodologia para avaliar diferenças dimensionais em peças submetidas a processos de usinagem, LV et al. (2022) desenvolveram um estudo para avaliação do controle dimensional e geométrico em peças do material Mesto MP 1250 submetidas a furação, em diferentes condições operacionais. De acordo com os resultados alcançados, foi possível mensurar que a elevação de apenas 1 °C na temperatura de usinagem ocasionou um diferença dimensional de 8,503 µm no material, um indicativo de que o controle da temperatura ao longo da usinagem é fundamental para minimizar assegurar diferenças dimensionais dentro das condições especificadas em projeto.

No que diz respeito a retificação, ainda são poucos os trabalhos desenvolvidos no sentido de analisar os efeitos que os parâmetros de corte podem exercer em termos das diferenças dimensionais nas peças.

Em um estudo desenvolvido por De Oliveira; Da Silva; Arencibia (2019), foi avaliado o diferença dimensional em peças da liga aeronáutica Inconel 718, as quais foram submetidas a diferentes atmosferas de lubrificação/refrigeração ao longo da retificação plana tangencial, com rebolo de carbeto de silício. Além disso, a influência de duas diferentes condições de penetração de trabalho,  $a_e = 20 \mu\text{m}$  e  $a_e = 40 \mu\text{m}$ , foram mensuradas. A partir dos dados mensurados, foi constatado que o aumento na penetração de trabalho, do rebolo sobre a peça, proporcionou um aumento nos desvios dimensionais, sendo que sob a condição a seco de retificação, a qualidade de trabalho variou de IT 5 para IT 8.

Já sob a condição de fluido abundante, o emprego de um alto valor de penetração de trabalho, ao longo da retificação, gerou superfícies com qualidade IT 9. Os resultados obtidos foram compatíveis com a literatura, apenas quando foi utilizada uma condição entre penetração de trabalho,  $a_e = 20 \mu\text{m}$ , e técnica MQL de aplicação do fluido de corte; situação na qual a qualidade de trabalho das amostras de Inconel 718 oscilaram de IT 5 a IT 6 (de Oliveira et al., 2019).

### 2.4.2 Tolerâncias macrogeométricas

As tolerâncias geométricas são especificações que definem a variação permitida nas formas e dimensões de peças e componentes mecânicos e desempenham um papel crucial na garantia da qualidade e na funcionalidade dos produtos (ABNT NBR ISO 6409, 1997; Agostinho et al., 1977) Alguns conceitos importantes relacionados às tolerâncias geométricas incluem (ABNT NBR ISO 6409, 1997):

- Tolerância de forma: Consiste na variação permitida na forma de uma característica, como retitude, circularidade ou cilindridade. Por exemplo, a tolerância de retitude especifica o desvio máximo permitido em relação a uma linha reta ideal.
- Tolerância de orientação: Estabelece a variação permitida na orientação de uma característica em relação a um sistema de coordenadas de referência. Isso inclui ângulos, paralelismo e perpendicularidade.
- Tolerância de posição: Define a variação permitida na localização de uma característica em relação a um ponto de referência. Ela inclui a zona de tolerância dentro da qual a característica deve estar contida.
- Tolerância de batimento: Refere-se à variação permitida na forma de ondulação ou batimento de uma superfície. É comumente definida em aplicações de alta precisão, como rolamentos e engrenagens.

As tolerâncias geométricas são essenciais para garantir a intercambiabilidade e a montagem adequada de componentes mecânicos, bem como para controlar a qualidade e o desempenho dos produtos, visto que auxiliam a evitar problemas de montagem, a garantir a funcionalidade dos sistemas e atender aos requisitos de projeto e especificações técnicas (X. Zhao et al., 2006).

É muito comum na indústria a aplicação e definição de tolerâncias geométricas no desenho projetivo de componentes e sistemas mecânicos, visto que desempenham um papel essencial em diferentes etapas da cadeia produtiva (X. Zhao et al., 2006).

Em maio de 1997, foi estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) uma norma para o estabelecimento de um sistema padronizado de tolerâncias macrogeométricas, para os projetos de peças e componentes (Martins & Único, 2019).

Essa norma, conhecida como ABNT NBR 6409 (1997), foi baseada em outra norma internacional, a ISO 1101 (1983), a fim de que os conceitos a serem aplicados aqui no Brasil fossem pautados em padronizações internacionais (Martins & Único, 2019).

É importante enfatizar que o conceito de tolerâncias geométricas é muito amplo e envolve tanto as tolerâncias macrogeométricas quanto as tolerâncias microgeométricas. Estas compreendem os parâmetros de rugosidade superficial, definidos pela norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), enquanto aquelas contemplam as tolerâncias de: forma, orientação, posição e batimento (ABNT NBR ISO 6409, 1997).

A norma ABNT NBR 6409, intitulada “Tolerâncias Geométricas – tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações no desenho”, abrange conceitos fundamentais que todo profissional de engenharia deve levar em consideração ao desenvolver o projeto de componentes, tendo como referência a cadeia produtiva necessária à concepção do produto (ABNT NBR ISO 6409, 1997).

Dentre esses conceitos, a norma ABNT NBR 6409 define dois que são fundamentais para o estabelecimento das tolerâncias geométricas. O primeiro é o elemento de referência, definido por essa norma como o elemento físico a partir do qual todas as tolerâncias geométricas são determinadas. O segundo conceito envolve a definição de elemento tolerado, o qual é definido como sendo o elemento físico em que são aplicadas as tolerâncias geométricas (ABNT NBR ISO 6409, 1997).

É importante ressaltar que são estabelecidas como tolerâncias geométricas (em escala macrogeométrica) todas aquelas cujo objetivo consiste em descrever geometricamente um componente, com base em faixas de especificação ou limites para a aceitação do referido produto, a fim de assegurar a funcionalidade do componente no sistema mecânico e a sua intercambiabilidade (ABNT NBR ISO 6409, 1997).

O estudo das tolerâncias macrogeométricas envolve a análise de critérios como retitude, concentricidade, posição de superfícies planas, entre outros, e sua correta aplicação durante o processo de fabricação é essencial para assegurar a conformidade das peças com as especificações dimensionais e geométricas (ABNT NBR ISO 6409, 1997).

Em termos gerais, as definições das tolerâncias geométricas são fundamentadas na comparação entre a forma de um elemento real com um elemento teórico, sendo que a diferença entre ambos, configura o desvio geométrico, o qual pode ser representado, no desenho projetivo, por meio de uma simbologia normatizada. Além disso, é representada a faixa numérica que limita os desvios geométricos, bem como indicações complementares (ABNT NBR ISO 6409, 1997).

Segundo a norma ABNT NBR 6409 (1997), a representação esquemática das tolerâncias geométricas deve seguir uma padronização sequencial de informações, tal como

representado na Fig. 2. 7. Em um retângulo associado ao elemento tolerado por meio de uma seta, a primeira divisória deve conter o símbolo da tolerância a ser especificada, enquanto na divisória seguinte deve constar o valor numérico da referida tolerância (ISO 1101, 1983; Martins & Único, 2019).

A critério do projetista, em divisões subsequentes no mesmo retângulo é muito comum a especificação de uma letra para designar o elemento de referência para a tolerância, bem como informações adicionais necessárias ao completo entendimento acerca da geometria e desvios do componente (Agostinho et al., 1977).

Na Tabela 2. 2 estão resumidas as principais tolerâncias geométricas de forma, de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6409 (1997).

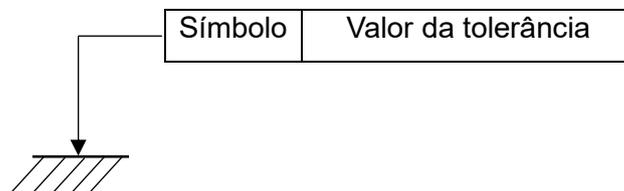


Figura 2. 7 - Representação das tolerâncias macrogeométricas no desenho (Adaptado de ABNT NBR ISO 6409, 1997)).

Em diversas situações, não há necessidade de indicar todas as tolerâncias macrogeométricas, descritas na Tab. 2.2 pois muitas vezes uma característica pode ser especificada por uma tolerância mais completa, por exemplo, ao descrever o furo em um componente, a tolerância de cilindricidade é suficiente, do que descrever a circularidade e a retitude do furo, em questão, visto que a cilindricidade é uma composição da circularidade ao longo de uma retitude (Agostinho et al., 1977; Martins & Único, 2019).

Tabela 2. 2 – Principais tolerâncias macrogeométricas (ABNT NBR ISO 6409, 1997; Agostinho et al., 1977).

Características		Símbolo
FORMA PARA ELEMENTOS ISOLADOS	Retilidade	
	Planicidade (planeza)	
	Circularidade	
	Cilindricidade	
	Forma de uma linha qualquer	
	Forma de uma Superfície qualquer	
ORIENTAÇÃO PARA ELEMENTOS ASSOCIADOS	Paralelismo	
	Perpendicularidade	
	Inclinação	
POSIÇÃO PARA ELEMENTOS ASSOCIADOS	Localização de um elemento	
	Concentricidade e Coaxialidade	
	Simetria	
BATIMENTO	Superfície indicada	
	Total	
Condição de máximo Material		

Particularmente no que diz respeito a processos de usinagem, como a retificação, umas das tolerâncias macrogeométricas mais importantes para a especificação da topografia e avaliação da qualidade de um elemento é a tolerância de planeza, caracterizada por ser uma tolerância de forma (NADOLNY; KAPŁONEK, 2014).

De acordo com a norma ABNT NBR 6409 (1997), a superfície considerada para a avaliação do desvio de planeza deve estar contida entre dois planos paralelos entre si e distantes de um valor numérico “t”, sendo que este é o valor da tolerância ou do desvio de

planeza especificado. Os dois planos imaginários configuram o campo de tolerância e a distância entre esses planos configura o valor da tolerância a ser especificado no projeto do componente mecânico, Figura 2.8.

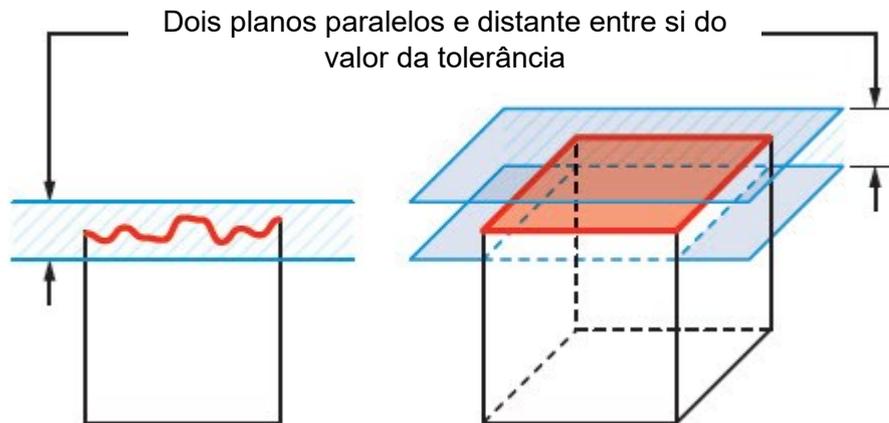


Figura 2. 8 - Definição esquemática da tolerância de planeza (Adaptado de (ABNT NBR ISO 6409, 1997).

Por conseguinte, a avaliação do desvio de planeza em uma peça consiste em verificar o quanto que a superfície real da peça se difere de uma superfície ideal, contida entre dois planos imaginários paralelos e distantes entre si, de um valor pré-definido ( $t$ ). Se a superfície real possuir desvios que variam dentro desse valor tolerado ( $t$ ) no desenho projetivo, a peça estará aprovada.

Caso contrário, se esses desvios estiverem fora das especificações de projeto, a peça precisará ser reavaliada, se for o caso, ser usinada novamente, até atender as especificações previstas.

Todavia, cada processo de fabricação tem suas características sendo que a retificação é um processo de usinagem por abrasão que tem como, uma de suas finalidades, proporcionar peças com baixos valores de diferenças dimensionais geométricos, dentre os quais destacam os desvios de forma, como o desvio de planeza.

De acordo com Nadolny e Kapłonek (2014) a tolerância de planeza é uma característica essencial para avaliar a topografia de uma superfície usinada. Pode ser igualmente definida como a distância entre dois planos imaginários paralelos e equidistantes que envolvem o pico mais elevado e o valor mais profundo do perfil de ondulação de uma superfície, ou perfil  $W$ , o qual é mensurado a partir da aplicação de um filtro que elimina dos sinais de rugosidade e mantém apenas os sinais correspondentes à ondulação da superfície.

Nesse sentido, o perfil  $W$  que caracteriza o desvio de planeza de uma superfície pode ser definido em função de alguns parâmetros (ISO/TS 12781-1, 2003):

- a)  $FLT_t$  – desvio de planeza pico ao vale: parâmetro que quantifica o valor do maior desvio de planeza local adicionado ao valor absoluto do maior valor negativo de desvio de planeza local, Eq. 2. 3.
- b)  $FLT_p$  – desvio de planeza pico ao valor de referência: parâmetro correspondente ao valor do maior desvio de planeza local com relação ao plano de referência dos quadrados mínimos, Eq. 2. 3.
- c)  $FLT_v$ , desvio de planeza do valor de referência ao vale: parâmetro que determina valor absoluto do maior desvio de planeza local do vale mais profundo ao plano de referência dos quadrados mínimos, Eq. 2. 3.
- d)  $FLT_q$ , desvio médio quadrático de planeza – parâmetro que abrange a raiz quadrada da soma dos quadrados dos desvios de planeza locais a partir do plano de referência dos quadrados mínimos.

Conseqüentemente, a partir dos parâmetros definidos pela norma tem-se que:

$$FLT_t = FLT_p + FLT_v \quad \text{Eq. 2. 3}$$

Logo, o desvio de planeza da superfície real pode ser definido e calculado como a soma do desvio de planeza do valor de referência ao pico e o valor correspondente ao desvio do vale até o valor de referência (ISO/TS 12781-1, 2003).

Alguns trabalhos na literatura foram desenvolvidos no sentido de medir e analisar o desvio de planeza em peças e componentes submetidos a diferentes processos de fabricação.

A fim de um maior entendimento acerca de desvio de planeza, um estudo desenvolvido por Arencibia et al. (2011) abordou a medição dos desvios de planeza dos corpos de prova do cordão de solda, utilizando uma Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) com alta resolução. Os desvios de planeza foram medidos três vezes em cada corpo de prova, e os resultados mostraram valores mínimos e não influenciaram significativamente os resultados das medições (Valdés Arencibia et al., 2011).

Foi destacada a importância de prestar atenção ao posicionamento e à fixação das placas durante o corte para evitar desvios de perpendicularidade significativos, que poderiam afetar as medições e a incerteza final. Além disso, a incerteza associada à medição dos desvios de planeza foi estimada, considerando variáveis como indicação ou leitura, resolução, erro de apalpamento e calibração da MMC. Os valores de incerteza expandida para os desvios

de planeza variaram entre 5,3  $\mu\text{m}$  e 6,8  $\mu\text{m}$  para os diferentes corpos de prova, demonstrando a importância de considerar e controlar esses desvios durante as medições geométricas do cordão de solda (Valdés Arencibia et al., 2011).

Além disso, em uma pesquisa realizada por Nadolny e Kapłonek (2014) foram avaliados os desvios de planeza em peças de aço inoxidável austenítico após usinagem eficiente da superfície. Foram utilizadas técnicas de usinagem como fresamento, retificação e polimento. Após a usinagem, todas as superfícies foram submetidas a medições de planeza e parâmetros de rugosidade. Os resultados mostraram uma correlação entre os parâmetros de planeza e rugosidade, permitindo uma análise abrangente das mudanças desses parâmetros ao longo das etapas de usinagem (Nadolny & Kapłonek, 2014).

O estudo destacou a importância da garantia da planeza adequada das superfícies usinadas e a necessidade de minimizar os desvios de planeza para garantir a qualidade dos produtos finais (Nadolny & Kapłonek, 2014).

Na literatura ainda são escassos os trabalhos realizados com a finalidade de avaliar desvios de forma macrogeométricos, em especial, nas ligas de titânio submetidas à retificação. A análise do desvio de planeza é um importante aspecto da avaliação topográfica em superfícies usinadas, pois permite avaliar a diferença entre a topográfica mensurada e uma superfície ideal, a partir de um plano de referência.

A importância dessa análise reside na sua capacidade de revelar vieses de medição, verificar o desempenho dos instrumentos e incorporar incertezas nos modelos de medição. Realizar a seleção adequada de condições de medição e artefatos, juntamente com a consideração de parâmetros de desvio de forma são essenciais para obter resultados significativos e comparáveis entre diferentes sistemas de medição (VANRUSSELT et al., 2022).

Além disso, a análise cuidadosa do desvio de planeza ajuda a identificar imperfeições, garantir a conformidade com padrões de qualidade e tolerâncias específicas, e otimizar o desempenho de sistemas mecânicos e ópticos. Diferentes métodos e referências, como o plano de mínima zona e o plano de mínimos quadrados, são utilizados para avaliar o desvio de planeza. A escolha do método e da referência adequados depende da aplicação específica e dos requisitos de precisão (VANRUSSELT et al., 2022).

Nesse sentido, a análise de desvio de planeza desempenha um papel crucial na garantia da qualidade e na otimização do desempenho de componentes e sistemas que dependem de superfícies planas (VANRUSSELT et al., 2022).

#### 2.4.3 *Rugosidade superficial*

A textura ou rugosidade superficial é o conjunto de irregularidades microgeométricas, definido pelas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície (ABNT NBR ISO 4287, 2002; Agostinho et al., 1977) .

As dimensões dessas irregularidades podem variar de  $10^{-10}$  a  $10^{-5}$  milímetros, dependendo da precisão do processo de fabricação e da qualidade do acabamento da superfície (Agostinho et al., 1977) . Geralmente, essas pequenas falhas são acompanhadas por outras irregularidades geométricas, que aumentam em escala, causadas pela vibração relativa entre a ferramenta de corte e a peça, além de outras irregularidades que contribuem para os erros de forma da superfície (ABNT NBR ISO 4287, 2002; Agostinho et al., 1977) .

A rugosidade de uma superfície é principalmente avaliada, por meio de parâmetros que se referem à altura (amplitude) e à largura (ou espaçamento) das imperfeições, ou uma combinação dessas características (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

Os parâmetros de rugosidade são definidos como medidas quantitativas que descrevem as irregularidades da superfície de um material (ABNT NBR ISO 4287, 2002). Alguns dos parâmetros de rugosidade mais comuns de serem avaliados em amostras submetidas ao processo de retificação são:

a.  $R_a$  (Desvio médio aritmético): É a média aritmética dos desvios absolutos de todos os pontos da superfície em relação a uma linha central. Quanto maior o valor de  $R_a$ , mais áspera é a superfície (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

b.  $R_t$  (Altura Total): Representa a diferença de altura entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo da superfície, dentro do comprimento de avaliação. É útil para avaliar a amplitude das irregularidades da superfície (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

c.  $R_z$  (Altura Máxima): Refere-se à altura máxima das irregularidades da superfície dentro de um comprimento de amostragem. É útil para identificar picos e vales extremos na superfície (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

d.  $R_q$  (Desvio médio quadrático): Também conhecido como Raiz Quadrada da Soma dos Quadrados, é uma medida da média quadrática dos desvios da superfície em relação a uma linha central. O  $R_q$  fornece uma avaliação mais equilibrada das irregularidades da superfície em comparação com o  $R_a$  (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

Esses parâmetros de rugosidade são essenciais para avaliar a qualidade e a textura da superfície de materiais após processos de fabricação, como retificação, polimento ou fresamento (Mukhopadhyay & Kundu, 2019d).

Existem diversos métodos e instrumentos empregados na avaliação da rugosidade de superfícies. Tradicionalmente, a medição da rugosidade é realizada com o uso de perfilômetros de contato mecânico (Agostinho et al., 1977). Nesses instrumentos, as imperfeições de uma superfície são identificadas pela passagem de uma agulha de ponta fina

sobre uma seção específica da superfície, considerada como representativa do restante da área em análise (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

A fim de tratar nesse estudo a rugosidade como um assunto de importância, será utilizada a norma para fins de representatividade (ABNT NBR ISO 4287, 2002). Primeiramente, será descrito três tipos de filtro de perfil para entendimento dos elementos de rugosidade: filtro de perfil  $\lambda_s$ , filtro de perfil  $\lambda_c$  e filtro de perfil  $\lambda_f$ , respectivamente (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

O filtro de perfil  $\lambda_s$  é um mecanismo que estabelece a distinção entre os elementos da rugosidade e os elementos de onda mais curtos encontrados na superfície, Fig. 2. 9 NBR ISO 4287). Por sua vez, o filtro de perfil  $\lambda_c$  é um dispositivo que determina a diferenciação entre os componentes da rugosidade e os componentes da ondulação presentes na superfície, Fig. 2. 9. Já o filtro de perfil  $\lambda_f$  é um mecanismo que estabelece a distinção entre os elementos da ondulação e os elementos das ondas mais longas encontrados na superfície.

O perfil da superfície é estabelecido como sendo a forma resultante da interação entre a superfície real e um plano particular. Isso é ilustrado na Fig. 2. 10, (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

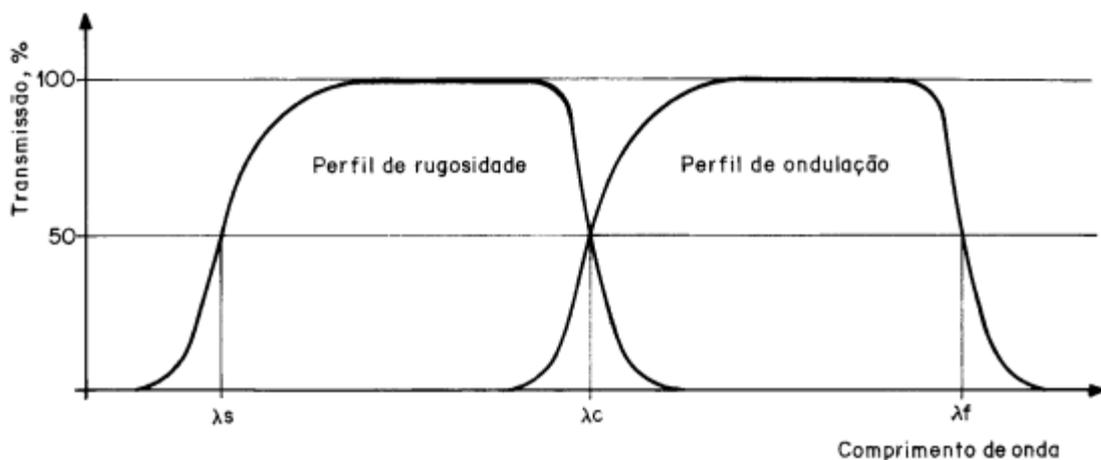


Figura 2. 9 - Características de transmissão dos perfis de rugosidade e de ondulação (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

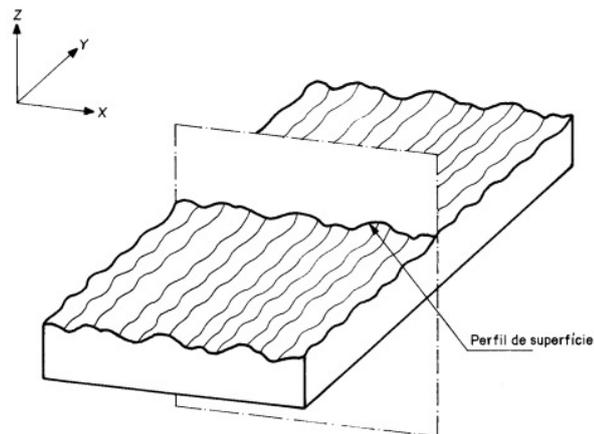


Figura 2. 10 – Perfil real da superfície, no qual são definidos os parâmetros de rugosidade (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

Com a finalidade de elucidar uma maior compreensão acerca da rugosidade de superfícies retificadas, é importante evidenciar o estudo desenvolvido por Mukhopadhyay, Kundu e Das (2018), que teve por finalidade investigar o efeito de diferentes valores de avanço de dressagem em rebolos de alumina para retificação de uma liga de titânio. Os experimentos foram realizados em uma retificadora de superfície horizontal, utilizando um rebole de alumina e um dressador de diamante de ponto único. Foram testados avanços de dressagem de 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  e 25  $\mu\text{m}$ . A topologia da superfície dos rebolos dressados foi observada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), revelando que valores mais altos de avanço resultaram em maior uniformidade na distribuição de bordas de corte (Mukhopadhyay et al., 2018)

Defeitos visuais foram observados em rebolos dressados com valores mais baixos de avanço, devido à deformação plástica durante a retificação (Mukhopadhyay et al., 2018). A rugosidade média da superfície retificada aumentou com valores mais baixos de avanço de dressagem, devido a menor espaçamento entre os grãos do rebole, resultando em maior carga no mesmo (Mukhopadhyay et al., 2018). No entanto, o uso de valores mais altos de avanço levou a uma redução na rugosidade devido a menor carga no rebole e ação de corte mais eficaz (Mukhopadhyay et al., 2018). Esses resultados destacam a importância da otimização do avanço de dressagem para melhorar a qualidade da superfície retificada de ligas de titânio (Mukhopadhyay et al., 2018)

Além disso, outro estudo realizado por Pereira et al. (2023) investigou o impacto da condição de dressagem do rebole de carbetto de silício na usinabilidade da liga Ti-6Al-4V, com foco na rugosidade superficial. Foram adotados quatro valores diferentes de avanço axial e diferentes condições de dressagem da roda abrasiva. Os resultados mostraram que as taxas

de avanço axial mais altas resultaram em menores valores de rugosidade superficial. (PEREIRA et al., 2023).

A mudança da condição de dressagem de severa para branda resultou em uma redução significativa na rugosidade Ra da liga Ti-6Al-4V (PEREIRA et al., 2023). Os parâmetros de dressagem, como a taxa de sobreposição e a profundidade de corte da dressagem, influenciaram a rugosidade superficial. Sob a condição de dressagem mais severa, a qualidade da superfície foi comprometida, resultando em sulcos irregulares, destacamento de material, rachaduras térmicas e pontas queimadas (PEREIRA et al., 2023). A análise estatística mostrou a influência dos parâmetros de dressagem na rugosidade superficial, destacando a importância da dressagem adequada para obter superfícies de alta qualidade em ligas de titânio. (PEREIRA et al., 2023).

A partir de outra pesquisa, realizada por Kadivar et al. (2020), foram analisadas diferentes velocidades de corte e razões de avanço em relação à profundidade de corte, mantendo a espessura de cavaco. Os resultados mostraram que a energia específica mínima de retificação foi praticamente a mesma em todas as velocidades de corte e razões de avanço testadas. No entanto, as tensões residuais na superfície retificada variaram com a velocidade de corte e a razão de avanço, sendo que velocidades de corte mais altas resultaram em menor tensão residual compressiva, enquanto razões de avanço maiores resultaram em maiores tensões compressivas. A rugosidade da superfície foi influenciada pelas condições de corte, com o aumento da velocidade de corte resultando em uma piora na qualidade da superfície da peça retificada (KADIVAR et al., 2020).

## **2.5 Incerteza de medição**

Todos os conceitos e definições associados a avaliação de dados de medição são abordados pelo GUM – Guia para expressão da incerteza de medição (INMETRO, 2012a), o qual define que incerteza de medição é um parâmetro não negativo, cuja finalidade consiste em caracterizar a dispersão de valores atribuídos a um mensurando, ou grandeza a ser medida, com base em informações estatísticas ou outras provenientes de certificados de calibração e normas técnicas- (INMETRO, 2012a).

Os principais conceitos e procedimentos para caracterizar a qualidade de um resultado de medição incluem a avaliação e expressão da incerteza de medição. Este procedimento envolve identificar e quantificar as fontes de incerteza que afetam o resultado da medição, considerando tanto os efeitos aleatórios quanto os sistemáticos (Senin et al., 2021).

Além disso, é importante realizar a análise das fontes de erro envolvidas no processo de medição, avaliando e corrigindo os efeitos sistemáticos reconhecidos. A incerteza de

medição é então expressa como um parâmetro que reflete a dispersão dos valores que podem ser atribuídos ao mensurando, contribuindo para uma melhor compreensão da confiabilidade do resultado obtido. Esses procedimentos visam garantir a transparência, comparabilidade e confiabilidade dos resultados de medição, permitindo uma interpretação adequada e uma avaliação correta da qualidade dos dados obtidos (Abrão et al., 2023; Senin et al., 2021).

Se faz necessário fornecer uma indicação quantitativa da qualidade dos resultados de medição para que sua confiabilidade possa ser avaliada. A falta dessa indicação dificulta a comparação de resultados entre si e com valores de referência. Portanto, é essencial ter um procedimento amplamente aceito para caracterizar a qualidade de um resultado de medição, incluindo a avaliação e expressão da incerteza (INMETRO, 2012a; Senin et al., 2021).

A presença da incerteza de medição pode impactar a confiabilidade dos resultados obtidos ao indicar a variação dos valores possíveis atribuídos ao mensurando (INMETRO, 2012a). Ao quantificar a incerteza associada a um resultado de medição, pode-se compreender a margem de erro envolvida na estimativa do valor da grandeza medida. Isso possibilita uma avaliação mais precisa da confiabilidade dos resultados, levando em consideração tanto os efeitos aleatórios quanto os sistemáticos presentes na medição. Dessa forma, a avaliação e comunicação da incerteza são fundamentais para assegurar a transparência, comparabilidade e confiabilidade dos resultados de medição (Abrão et al., 2023; Valdés Arencibia et al., 2011).

A incerteza de medição desempenha um papel crucial na avaliação da conformidade de equipamentos, influenciando diretamente as decisões tomadas nesse contexto, sendo que ao considerar a incerteza associada às medições, é possível avaliar com maior confiança a conformidade do equipamento com suas especificações (Senin et al., 2021; Valdés Arencibia et al., 2011).

Essa consideração permite estabelecer uma margem de tolerância em torno dos resultados da medição, levando em conta a variabilidade dos dados obtidos. Além disso, ao incorporar a incerteza de medição, os responsáveis pela avaliação da conformidade podem tomar decisões mais informadas, evitando conclusões precipitadas e mantendo padrões consistentes de qualidade (Abrão et al., 2023; Valdés Arencibia et al., 2011). Portanto, a consideração da incerteza de medição é essencial para garantir uma abordagem robusta e confiável na avaliação da conformidade dos equipamentos (INMETRO, 2012a).

Para atingir esse objetivo de maneira eficaz, é necessário que sejam obedecidas uma série de passos metodológicos, a saber (INMETRO, 2012a).

- Identificação das fontes de incerteza: Nesta etapa, todas as fontes de incerteza relevantes são listadas, abrangendo tanto os erros aleatórios quanto os sistemáticos que podem afetar a precisão do resultado da medição. A precisão, por sua vez, é um importante

parâmetro metrológico quantitativo que mede o grau de concordância entre os valores atribuídos a um mensurando, isto é, a congruência ou não entre valores medidos (Abrão et al., 2023; INMETRO, 2012a).

- Estimativa das incertezas individuais: Cada fonte de incerteza identificada é analisada individualmente para determinar sua contribuição para a incerteza total. Esta estimativa pode envolver diversos métodos, como cálculos teóricos, dados experimentais ou informações de calibração (Abrão et al., 2023; INMETRO, 2012a).

- Combinação das incertezas: As incertezas individuais são combinadas utilizando relações matemáticas adequadas que descrevem o processo de medição. Isso pode incluir a propagação de incertezas por meio de equações ou modelos estatísticos (Abrão et al., 2023; INMETRO, 2012a).

- Expressão da incerteza: Após a combinação das incertezas, a incerteza de medição resultante é expressa com um nível de confiança específico, frequentemente utilizando conceitos como desvio padrão ou intervalo de confiança (Abrão et al., 2023; INMETRO, 2012a).

- Documentação e comunicação: Todas as etapas do processo de avaliação da incerteza são registradas de forma clara e detalhada, incluindo as fontes identificadas, os métodos de estimativa utilizados e a incerteza final obtida. A incerteza associada ao resultado da medição é comunicada de maneira transparente, juntamente com o valor medido (Abrão et al., 2023; INMETRO, 2012a).

Ao seguir as etapas anteriormente descritas e levando-se em consideração, cuidadosamente, todas as fontes de incerteza relevantes, é possível realizar uma avaliação completa e confiável da incerteza de medição, o que contribui significativamente para a confiabilidade e qualidade dos resultados obtidos no contexto do trabalho de pesquisa ou experimentação (Leal et al., 2020).

Em suma, para assegurar a aceitabilidade analítica dos resultados de medição, considerando a incerteza associada, é fundamental seguir determinadas práticas e considerações cruciais, tais como anteriormente descritas, isto é, uma avaliação apropriada da incerteza de medição é essencial para a qualidade de um resultado, pois envolve a identificação e quantificação de todas as fontes de incerteza, as quais abrangem tanto os erros sistemáticos quanto os aleatórios (Valdés Arencibia et al., 2011).

Além disso, a padronização dos procedimentos de medição, a calibração e controle regular dos instrumentos, bem como o gerenciamento de riscos são medidas essenciais para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados. Uma comunicação transparente da incerteza de medição é vital para os usuários dos resultados, permitindo uma interpretação adequada e uma análise crítica dos mesmos (Leal et al., 2020). Ao seguir essas práticas e

considerações, é possível garantir a aceitabilidade analítica dos resultados de medição, contribuindo para a confiabilidade e qualidade dos resultados, e proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões informadas e fundamentadas (INMETRO, 2012a).

## CAPÍTULO III

### Metodologia

Ao longo deste terceiro capítulo do projeto de fim de curso, será apresentada a metodologia desenvolvida nos ensaios experimentais de retificação da liga Ti-6Al-4V, com rebolo abrasivo de carbetto de silício (SiC), assim como o detalhamento dos parâmetros de corte envolvidos no processo, e a consequente análise das variáveis de saída, em termos do parâmetro de rugosidade Ra, textura das superfícies retificadas (obtidas via Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV), diferenças dimensionais e desvios de planeza, nas amostras retificadas.

Na Figura 3. 1 é apresentado um fluxograma que resume as principais etapas envolvidas na metodologia do presente trabalho, desde os ensaios experimentais, materiais das amostras, máquina ferramenta, parâmetros de corte. Posteriormente aos ensaios experimentais, foi desenvolvida a análise dos resultados, com base em tratamento estatístico dos dados e aplicação da incerteza de medição para avaliação dos parâmetros de saída, a fim aprofundar metrologicamente a análise dos resultados e apresentá-los com confiabilidade e rastreabilidade.

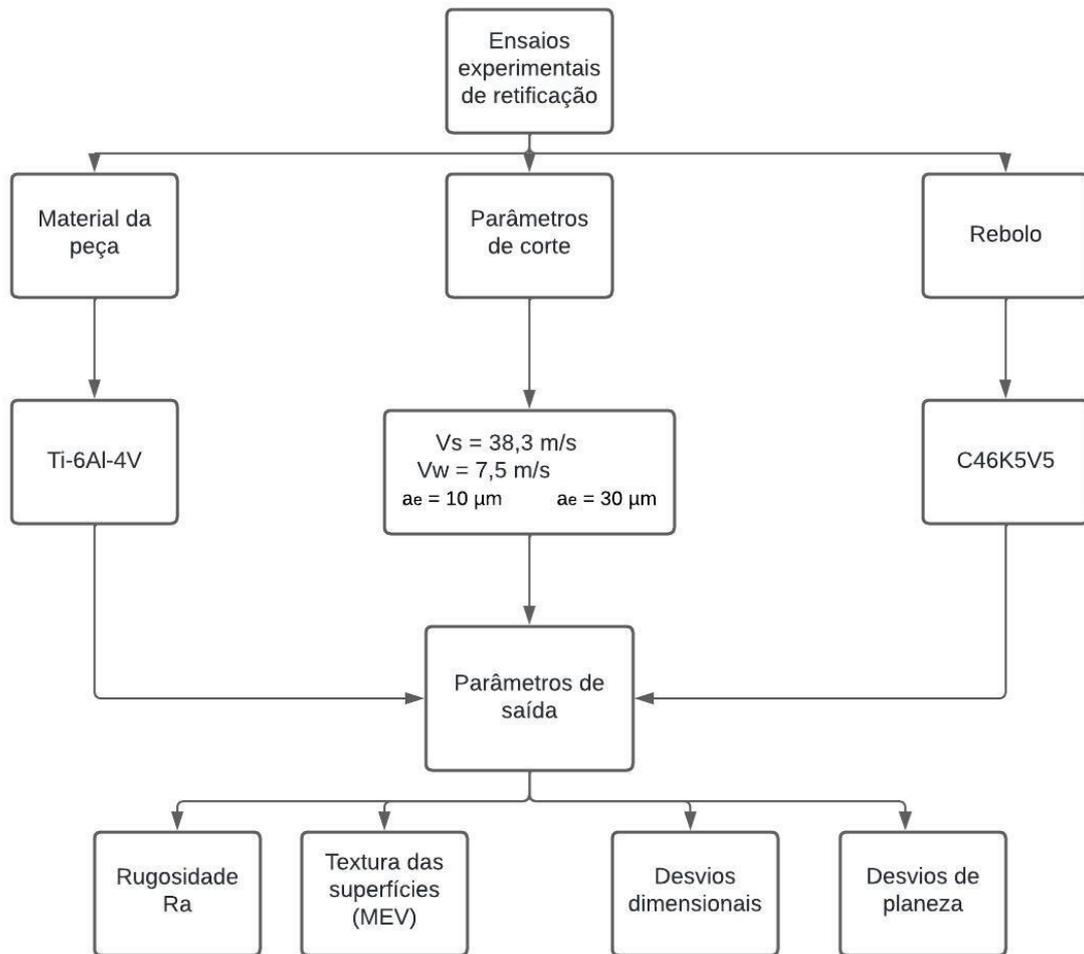


Figura 3. 1 – Fluxograma que contempla as etapas desenvolvidas ao longo dos ensaios experimentais de retificação.

### 3.1 Máquina ferramenta

Os experimentais de retificação foram desenvolvidos em uma máquina retificadora plana tangencial modelo P36, semiautomática, fabricada pela empresa Mello S.A Máquinas e Equipamentos. Esta máquina, localizada no Laboratório de Usinagem Convencional (LUC – FEMEC) possui como características operacionais uma rotação no eixo árvore principal constante e equivalente a  $251,3 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$  (2 400 rpm), uma potência de 2,2 kW (3 HP) e resolução de  $5 \mu\text{m}$  (nônio vertical), Figura. 3. 2.

Para a realização dos ensaios, cada uma das amostras da liga Ti-6Al-4V foi fixada junto a uma morsa de precisão, a qual foi posicionada sobre a mesa da máquina (de características magnéticas).



Figura 3. 2 – Retificadora plana tangencial P36 MELLO S.A, disponível no Laboratório de Usinagem Convencional (LUC-UFU).

### 3.2 Rebolo abrasivo

Ao longo dos ensaios experimentais de retificação, foi utilizado como ferramenta de corte um rebolo abrasivo de carbeto de silício (SiC), de especificação equivalente a C46K5V5 (granulometria #46), o qual possui 304,8 mm (diâmetro externo) x 25,4 mm (largura) x 76,2 mm (diâmetro interno) e foi disponibilizado ao laboratório pela empresa Alcar Abrasivos LTDA, Figura 3. 3.



Figura 3. 3 – Posicionamento do rebolo abrasivo de SiC junto a máquina retificadora.

A velocidade de corte deste rebolo de SiC, Fig. 3. 3 foi mantida constante ao longo dos ensaios de retificação e equivalente a 38,3 m/s. É válido destacar que, assim que o rebolo foi

balanceado e posicionado junto ao eixo principal da máquina, foi realizada a operação de dressagem, com um dressador ponta única de diamante, Fig. 3. 4, de tal modo a conferir ao rebolo um grau de recobrimento  $U_d = 3$ . Para tanto, a largura de atuação do dressador ( $b_d$ ) foi de 0,81 mm, e três passes consecutivos de profundidade de dressador,  $a_d = 20 \mu\text{m}$ .

A operação de dressagem foi realizada antes de cada ensaio experimental de retificação, fim de assegurar o condicionamento do rebolo abrasivo a um grau de recobrimento  $U_d = 3$ .



Figura 3. 4 – Posicionamento do dressador ponta única de diamante junto ao rebolo de SiC.

### 3.3 Material da peça

Os ensaios de retificação plana tangencial foram realizados em amostras da liga Ti-6Al-4V, todas de geometria prismática de seção retangular, cujas dimensões antes, dos ensaios eram iguais a 37 mm de comprimento X 15 mm de largura X 23 mm de altura.

Para o desenvolvimento dos testes, cada amostra foi fixada em uma morsa de precisão e essa foi posicionada sobre a mesa magnética da retificadora plana, a fim de o adequado posicionamento entre superfície a ser retificada e a superfície de corte do rebolo (largura do rebolo) fosse garantido, Fig. Na Tabela 3. 1 estão descritos os principais elementos químicos deste material, assim como propriedades mecânicas e térmicas.

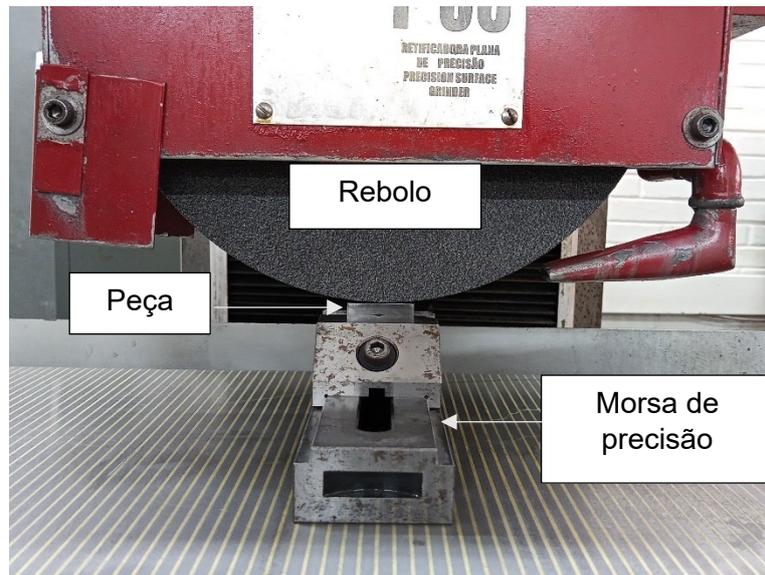


Figura 3. 5 – Posicionamento de cada amostra na morsa de precisão, sobre a mesa da retificadora plana tangencial.

Tabela 3. 1 – Composição química e propriedades mecânicas e térmicas da liga Ti-6Al-4V (Adaptado de (LEYENS; PETERS, 2003; PEREIRA et al., 2023)).

	<b>Material</b>					
<b>Elemento químico</b>	Ti	Al	V	C	Fe	N
<b>Composição química (%wt)</b>	90	6	4	0,10	0,30	0,05
<b>Propriedades mecânicas e térmicas</b>						
Ponto de Fusão (°C)	1 650	1 540	1 649	1 336	1 400	1 290
Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	4	4,37	4,54	8,19	8	7,15
Condutividade térmica a 20 °C (W.(m.K) <sup>-1</sup> )	6,6	6	6,6	11,4	16,3	48
Dureza (HV)	381	349	367	535	152	246
Resistência à tração (MPa)	1 600	910	980	1 100	290	276
Alongamento (%)	8	18	14	25	50	0

### 3.4 Fluido de corte

Todos os ensaios experimentais de retificação foram conduzidos mediante o emprego de fluido de corte diluído em água e aplicado na zona de corte, via técnica convencional de lubrificação (jorro abundante). O fluido selecionado para os ensaios é um óleo de base vegetal, semissintético, de designação VASCO 7000, o qual foi diluído em água a uma proporção de 1:19, de maneira que a sua concentração fosse equivalente a 3,2 BRIX, conforme registrado pelo refratômetro N1, ATAGO.

Esse fluido diluído em água foi aplicado junto a zona de contato rebolo – peça, por meio de um bocal do tipo sapata a uma velocidade constante de 9 L/min.

### 3.5 Planejamento experimental

Os ensaios experimentais de retificação foram realizados de acordo com o planejamento experimental representado na Tab. 3. 4. A velocidade de corte do rebolo ( $V_s$ ) e a velocidade da peça ( $V_w$ ) foram mantidas constantes ao longo dos ensaios e equivalentes a 38,3 m/s e 7,5 m/min, respectivamente.

Foram empregadas duas diferentes condições de penetração de trabalho  $a_e = 10 \mu\text{m}$  e  $a_e = 30 \mu\text{m}$ , a fim de que a influência dessas variáveis, sobre a qualidade das peças, pudesse ser avaliada, sendo que para cada condição o rebolo usinou a peça em 5 passes. Para cada teste de retificação, foi desenvolvida a respectiva réplica e tréplica, que um conjunto robusto de dados fosse adquirido a fim de realizar a análise da incerteza de medição nas variáveis de saída.

Tabela 3. 2 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de retificação de amostras da liga Ti-6Al-4V, com rebolo de SiC.

<b>Parâmetros de corte do processo de retificação</b>	
Velocidade de corte do rebolo de SiC (m/s) - $V_s$	38,3
Velocidade da peça de Ti-6Al-4V (m/min) – $V_w$	7,5
Penetração de trabalho ( $\mu\text{m}$ ) – $a_e$	10 e 30
Número de passes	5
Grau de recobrimento do rebolo – $U_d$	3
Dressador	Ponta única de diamante
Vazão de fluido de corte (L/min) - $V_j$	9

### 3.6 Parâmetros de saída

Ao longo desta seção será apresentada a metodologia empregada na análise metrológica dos parâmetros de saída: rugosidade, textura das superfícies, diferenças dimensionais e desvios de planeza.

#### 3.6.1 Rugosidade

A rugosidade da superfície foi analisada por meio do parâmetro  $R_a$  de rugosidade média, igualmente definido como média ou desvio aritmético dos valores absolutos das ordenadas  $Z(x)$  no comprimento de amostragem (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

Para a realização das medições, foi utilizado um rugosímetro portátil SurfTest modelo SJ201P, fabricado pela empresa Mitutoyo, o qual possui uma resolução de  $0,01 \mu\text{m}$ , cujo raio de ponta é de  $2 \mu\text{m}$ . O comprimento de amostragem utilizado (cut-off) foi de  $0,8 \text{ mm}$ , com um comprimento de avaliação de  $4,0 \text{ mm}$ .

Previamente às medições, cada amostra foi fixada junto a uma morsa de precisão, a qual foi posicionada sobre a mesa de desempenho, no Laboratório de Ensino em Metrologia (LEMETRO – UFU), a uma temperatura controlada de  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ .

O rugosímetro foi colocado sobre uma superfície de apoio, nivelada com os corpos de prova, para minimizar o desvio de paralelismo entre o sensor e a superfície da peça, garantindo uma melhor utilização do sensor, Fig. 3. 6.

Todas as medições foram desenvolvidas com o apalpador do rugosímetro avançando perpendicularmente à direção dos sulcos gerados pela retificação, em 5 diferentes regiões da peça, Fig. 3. 6. Como foram realizadas réplicas e tréplicas, para cada condição de penetração de trabalho, foram efetuadas 15 medições de rugosidade.

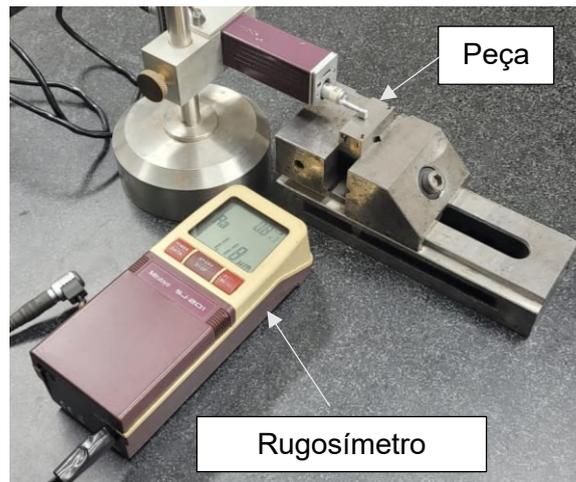


Figura 3. 6 – Posicionamento das amostras fixadas na morsa de precisão e posicionadas sobre o desempenho, para a medição de rugosidade.

Após as medições do parâmetro Ra de rugosidade, nas amostras de Ti-6Al-4V retificadas, os valores mensurados foram analisados em termos de média ( $\bar{X}$ ) e desvio padrão amostral ( $s$ ).

Em seguida, foi desenvolvida a análise da incerteza de medição associada ao parâmetro Ra de rugosidade, a fim de que fossem levantadas todas as fontes que contribuem para a incerteza de medição, e a contribuição de cada uma delas, a fim de apresentar o resultado de medição com confiabilidade e rastreabilidade metrológica.

Os cálculos necessários para a incerteza de medição foram desenvolvidos conforme especificado no Guia para Expressão da Incerteza de Medição (INMETRO, 2012a). Para tanto, algumas etapas foram seguidas, a saber (Abrão et al., 2023):

1. Definição do mensurando (variável de saída): rugosidade Ra;
2. Identificação das variáveis que afetam no resultado de medição (variáveis de saída): Variabilidade das leituras indicadas pelo rugosímetro ( $\bar{x}$ ); resolução finita do rugosímetro ( $R$ ); incerteza associada à calibração do rugosímetro ( $C$ ); Incerteza associada ao raio de ponta do apalpador ( $R_p$ ) e a incerteza associada à deformação do material ( $D$ ).
3. Modelo matemático;
4. Cálculo das incertezas padrão associadas a cada uma das variáveis de entrada ( $u$ );
5. Cálculo da incerteza combinada referente à rugosidade Ra ( $u_c$ )
6. Cálculo dos coeficientes de sensibilidade;
7. Avaliação da incerteza expandida ( $U$ );

### 8. Resultado de Medição.

O modelo matemático para o cálculo da incerteza de medição associada à rugosidade  $R_a$  é:

$$R_a = \bar{x} + \Delta R + \Delta C + \Delta R_p + \Delta D. \quad (3.1)$$

A fim de que fossem calculadas as incertezas padrão ( $u$ ) relativas à cada uma das variáveis de entrada, foram necessárias informações acerca do tipo de avaliação da incerteza (T.A), o tipo de distribuição de probabilidades (D.P), os graus de liberdade (G.L), o coeficiente de sensibilidade (C.S), os quais estão resumidos na Tab. 3. 3.

Tabela 3. 3 – Estimativas e cálculos para a incerteza de medição associada à rugosidade  $R_a$ .

Grandeza	Estimativa	T. A.	D.P.	G.L.	C.S.	Incerteza-padrão
$\bar{x}$	$\bar{x}$	A	T-Student	n-1	1	$u(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{3}}$
$\Delta R$	$R_{rug}$	B	Retangular	$\infty$	1	$u(\Delta R) = \frac{R_{rug}}{2 \cdot \sqrt{3}}$
$\Delta C$	$R_{rug}$	B	Normal	$\infty$	1	$u(\Delta C) = \frac{R_{rug}}{k(C)}$
$\Delta R_p$	$0,02 \cdot P_{rug}$	B	Retangular	$\infty$	1	$u(\Delta R_p) = \frac{0,02 \cdot Prug}{\sqrt{3}}$
$\Delta D$	D	B	Retangular	$\infty$	1	$u(D) = \frac{D}{\sqrt{3}}$

Onde  $s$  é o desvio padrão amostral,  $R_{rug}$  é a resolução do rugosímetro,  $P_{rug}$  é o valor do parâmetro de rugosidade avaliado e  $D$  é a deformação do material, que para o material em questão foi de 20 nm (Abrão et al., 2023). É importante ressaltar que a parcela de contribuição exercida pelo raio de ponta do apalpador é igual a 2 % do valor de rugosidade avaliado ( $Prug$ ) (Abrão et al., 2023). Em razão da ausência do certificado de calibração, as informações pertinentes e necessárias aos cálculos de incerteza foram buscadas na literatura.

#### 3.6.2 Textura das superfícies retificadas

Para a análise do acabamento superficial das amostras de Ti-6Al-4V, cada uma das peças foi levada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo TM 3000. Para tanto, foi aplicada uma ampliação de 1500 vezes, a fim de que a melhor visualização possível das superfícies e dos defeitos gerados pela retificação pudessem ser visualizados e, posteriormente, analisados.

### 3.6.3 Desvio dimensional

As medições dos desvios dimensionais, com relação a altura das peças, foram desenvolvidas em uma máquina de medir por coordenadas (MMC), modelo BR-M443, do fabricante Mitutoyo, a qual possui uma resolução de 0,0005 mm, e faixa nominal de 400 mm (eixo x) x 400 mm (eixo y) x 300 mm (eixo z), Fig. 3. 7 (a) e (b). Para a realização das medições e aquisição dos resultados, essa máquina acompanha um computador com o programa GEOPAK MANUAL. O certificado de calibração do equipamento encontra-se no ANEXO I deste trabalho. Tanto a máquina de medir por coordenadas (MMC) quanto o computador equipado com o programa para avaliação das diferenças dimensionais geométricos pertencem ao Laboratório de Ensino em Metrologia (LEMETRO – UFU).

a)



b)

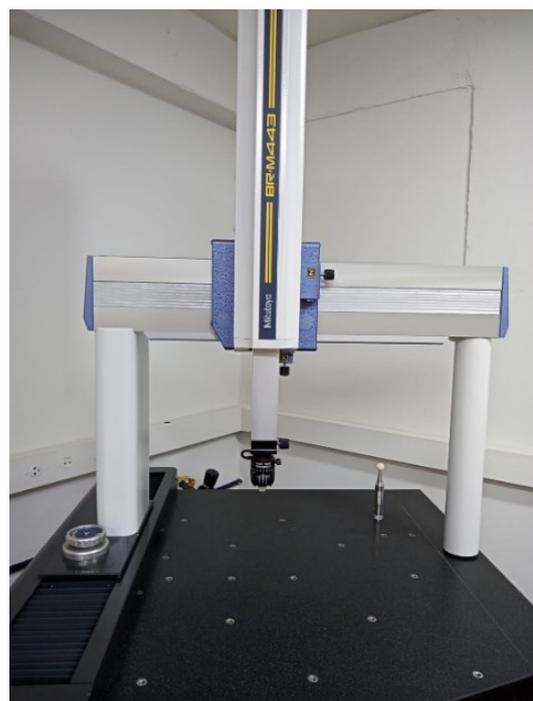


Figura 3. 7 – Vista frontal da máquina de medir por coordenadas BR-M443 (a), vista aproximada da máquina (b).

Previamente às medições, foi selecionado um apalpador de raio de ponta de rubi com diâmetro igual a 2 mm e comprimento de haste de 20 mm, o qual foi posicionado no cabeçote da máquina, Fig. 3. 8 (a) para inicialmente ser calibrado junto a uma haste com esfera cerâmica, Fig. 3. 8 (b), a qual possui um diâmetro de 19,9574 mm e um número de

identificação H6593. Esse procedimento é fundamental de ser realizado antes das medições. Durante o processo de calibração, o procedimento foi realizado colocando o pino de esfera de cerâmica e, com o apalpador, toca-se 1 ponto no polo (parte de cima) e 4 pontos em suas laterais (hemisfério).

a)



b)



Figura 3. 8 – Apalpador com ponta de rubi (a). Haste com esfera de cerâmica, para calibração da ponta do apalpador.

Após a calibração da ponta de rubi, cada amostra foi posicionada sobre o desempenho de granito da máquina MMC, e devidamente fixado. Em seguida, por meio do programa GEOPAK MANUAL, foi definida a origem do sistema de referência, no canto inferior da peça (ponto 0,0,0).

Depois que a origem do sistema de referência foi designada no programa, procedeu-se para a parte das medições. Como, durante os ensaios experimentais, foi retificada apenas uma parte da superfície da peça, foi possível medir as regiões antes e depois da usinagem.

Para tanto, com o apalpador de rubi foram medidos 5 pontos ao longo do comprimento da peça, primeiramente na região antes de retificar e, depois, 5 pontos na região após retificar. Ou seja, foram feitas medições da altura das peças antes e depois da retificação, a fim de que fosse possível obter a média das alturas e os desvios dimensionais, associados à incerteza expandida do resultado de medição, nas duas condições de corte empregadas durante a retificação,  $a_e = 10 \mu\text{m}$  e  $a_e = 30 \mu\text{m}$ .

Com os valores das alturas, das superfícies de Ti-6Al-4V após a retificação, foram calculadas a média ( $\bar{x}$ ) e a incerteza expandida (U) associada aas diferenças dimensionais

alturas das peças usinadas para expressão do resultado de medição, tomando-se como referência o certificado de calibração da máquina (ANEXO I).

De acordo com o Guia para Expressão do Resultado de Medição, foi desenvolvido um passo a passo para o cálculo da incerteza de medição associada aos desvios dimensionais, nas alturas das peças após a retificação (INMETRO, 2012a) :

1. Definição do mensurando (variável de saída): diferença dimensional( $D_d$ );
2. Identificação das variáveis que afetam no resultado de medição (variáveis de saída): Variabilidade das leituras indicadas pela MMC ( $L_{MMC}$ ); resolução finita da MMC ( $\Delta R_{MMC}$ ); incerteza associada à calibração da MMC ( $\Delta C_{MMC}$ ); Incerteza associada ao erro de apalpamento da MMC (EA)
3. Modelo matemático;
4. Cálculo das incertezas padrão associadas a cada uma das variáveis de entrada (u);
5. Cálculo da incerteza combinada referente ao diferença dimensional( $u_c$ )
6. Cálculo dos coeficientes de sensibilidade;
7. Avaliação da incerteza expandida (U);
8. Resultado de Medição.

#### 3.6.4 Desvio de Planeza

Para as medições dos desvios de planeza nas amostras retificadas da liga Ti-6Al-4V foi empregada a máquina de medir por coordenadas (MMC) descrita na seção 3.4.3. O mesmo processo de calibração da ponta de rubi e de definição da origem do sistema de coordenadas foi realizado.

Dessa maneira, o plano de desempenho da máquina foi definido como o plano de referência. Assim, com o apalpador de rubi calibrado foram feitos 3 ciclos de medições. Em cada ciclo foram apalpados 9 pontos das superfícies retificadas e, com o programa GEOPAK MANUAL, foi possível calcular os valores de desvio de planeza nas superfícies retificadas. Esses valores concernentes ao número de ciclos e pontos de medição foram obtidos previamente a partir medições prévias e análise do desvio padrão amostral.

A partir dos dados mensurados, foi desenvolvida a análise da média e da incerteza de medição para expressão do resultado de medição, tomando-se como referência o certificado de calibração da máquina de medir por coordenadas (ANEXO I).

De acordo com o Guia para Expressão do Resultado de Medição, foi desenvolvido um passo a passo para o cálculo da incerteza de medição associada aos desvios de planeza das peças após a retificação (INMETRO, 2012a) :

1. Definição do mensurando (variável de saída): desvio de planeza ( $D_p$ );
2. Identificação das variáveis que afetam no resultado de medição (variáveis de saída): Variabilidade das leituras indicadas pela MMC ( $L_{MMC}$ ); resolução finita da MMC ( $\Delta R_{MMC}$ ); incerteza associada à calibração da MMC ( $\Delta C_{MMC}$ ); Incerteza associada ao erro de apalpamento da MMC (EA)
3. Modelo matemático;
4. Cálculo das incertezas padrão associadas a cada uma das variáveis de entrada ( $u$ );
5. Cálculo da incerteza combinada referente ao desvio de planeza ( $u_c$ )
6. Cálculo dos coeficientes de sensibilidade;
7. Avaliação da incerteza expandida ( $U$ );
8. Resultado de Medição.

# CAPÍTULO IV

## Resultados e discussões

Ao longo deste capítulo serão apresentados os resultados e as respectivas discussões a respeito dos parâmetros de saída analisados, em termos da rugosidade Ra, imagens das superfícies via microscopia eletrônica de varredura (MEV), diferenças dimensionais e desvios de planeza, após os ensaios experimentais de retificação plana tangencial, em amostras da liga Ti-6Al-4V.

### 4.1 Rugosidade das superfícies

A partir da medição da rugosidade Ra, ou desvio médio aritmético, em diferentes regiões das amostras de Ti-6Al-4V, perpendicularmente a direção de retificação, foi possível desenvolver um tratamento estatístico dos valores em termos da média ( $\bar{x}$ ), desvio padrão amostral (s) e da incerteza de medição, a fim de que todas as fontes que contribuíram para os erros envolvidos no processo de medição com o rugosímetro fossem avaliadas, de modo estatisticamente confiável, no que diz respeito à sua contribuição para o resultado de medição.

Desse modo, tanto na condição mais branda de penetração de trabalho, ( $a_e = 10 \mu\text{m}$ ), quanto na condição mais severa ( $a_e = 30 \mu\text{m}$ ) foi desenvolvida a análise da incerteza de medição, as quais encontram-se resumidamente dispostas nas Tabelas 4. 1 e 4. 2.

Com base no cálculo da média das leituras e, posteriormente, da incerteza de medição associada ao parâmetro desvio médio aritmético, ou rugosidade Ra, foi possível constatar que, na condição de penetração de trabalho mais branda ( $a_e = 10 \mu\text{m}$ ), o resultado de medição para o parâmetro de rugosidade Ra foi de  $(0,78 \pm 0,09) \mu\text{m}$  para um fator k de abrangência igual a 1,96 e uma probabilidade de abrangência de 95 %, Tabela 4. 1.

No caso em que a condição de penetração de trabalho empregada foi mais severa, isto é,  $a_e = 30 \mu\text{m}$ , o resultado de medição associado ao parâmetro Ra de rugosidade foi de  $(1,05 \pm 0,10) \mu\text{m}$  para um fator k de abrangência igual a 1,96 e uma probabilidade de abrangência de 95 %, Tabela 4. 2.

Tabela 4. 1 - Incerteza de medição associada ao parâmetro  $R_a$ , na condição de penetração de trabalho  $a_e = 10 \mu m$ .

<i>Grandeza</i>	<i>Estimativa (<math>\mu m</math>)</i>	<i>T. A.</i>	<i>D.P.</i>	<i>G.L.</i>	<i>C.S.</i>	<i>Incerteza-padrão (<math>\mu m</math>)</i>	<i>Cont. (%)</i>
$\bar{x}$	1,05	A	T-Student	14	1	0,04395	88,63
$\Delta R$	0,01	B	Retangular	$\infty$	1	0,00289	0,38
$\Delta C$	0,01	B	Normal	$\infty$	1	0,00500	1,15
$\Delta R_p$	0,01560	B	Retangular	$\infty$	1	0,00901	3,72
$\Delta D$	0,02	B	Retangular	$\infty$	1	0,01155	6,12
<i>Incerteza-padrão combinada <math>u_c (R_a)</math> – unidade em <math>\mu m</math></i>						0,04669	
<i>Graus de liberdade efetivos <math>\nu_{eff} (R_a)</math></i>						8176,35	
<i>Fator de abrangência <math>k (R_a)</math></i>						1,96	
<i>Incerteza expandida <math>U (R_a)</math> – unidade em <math>\mu m</math></i>						0,09151	

Tabela 4. 2 - Incerteza de medição associada ao parâmetro  $R_a$ , na condição de penetração de trabalho  $a_e = 30 \mu m$ .

<i>Grandeza</i>	<i>Estimativa (<math>\mu m</math>)</i>	<i>T. A.</i>	<i>D.P.</i>	<i>G.L.</i>	<i>C.S.</i>	<i>Incerteza-padrão (<math>\mu m</math>)</i>	<i>Cont. (%)</i>
$\bar{x}$	1,05	A	T-Student	14	1	0,04706	87,56
$\Delta R$	0,01	B	Retangular	$\infty$	1	0,00289	0,33
$\Delta C$	0,01	B	Normal	$\infty$	1	0,00500	0,99
$\Delta R_p$	0,02108	B	Retangular	$\infty$	1	0,01217	5,86
$\Delta D$	0,02	B	Retangular	$\infty$	1	0,01155	5,27
<i>Incerteza-padrão combinada <math>u_c (R_a)</math> – unidade em <math>\mu m</math></i>						0,05030	
<i>Graus de liberdade efetivos <math>\nu_{eff} (R_a)</math></i>						7218,62	
<i>Fator de abrangência <math>k (R_a)</math></i>						1,96	
<i>Incerteza expandida <math>U (R_a)</math> – unidade em <math>\mu m</math></i>						0,09858	

Nesse sentido, os resultados de medição da rugosidade  $R_a$  calculados foram representados de maneira gráfica na Figura 4. 1, para ambas as condições de penetração de

trabalho empregadas, nos ensaios de retificação, são apresentados graficamente. A partir da análise da incerteza de medição e do posterior resultado de medição, é possível afirmar que a mudança na penetração de trabalho de uma condição branda para uma condição severa resultou em um aumento percentual de 34,62 % na rugosidade média Ra das amostras de Ti-6Al-4V retificadas.

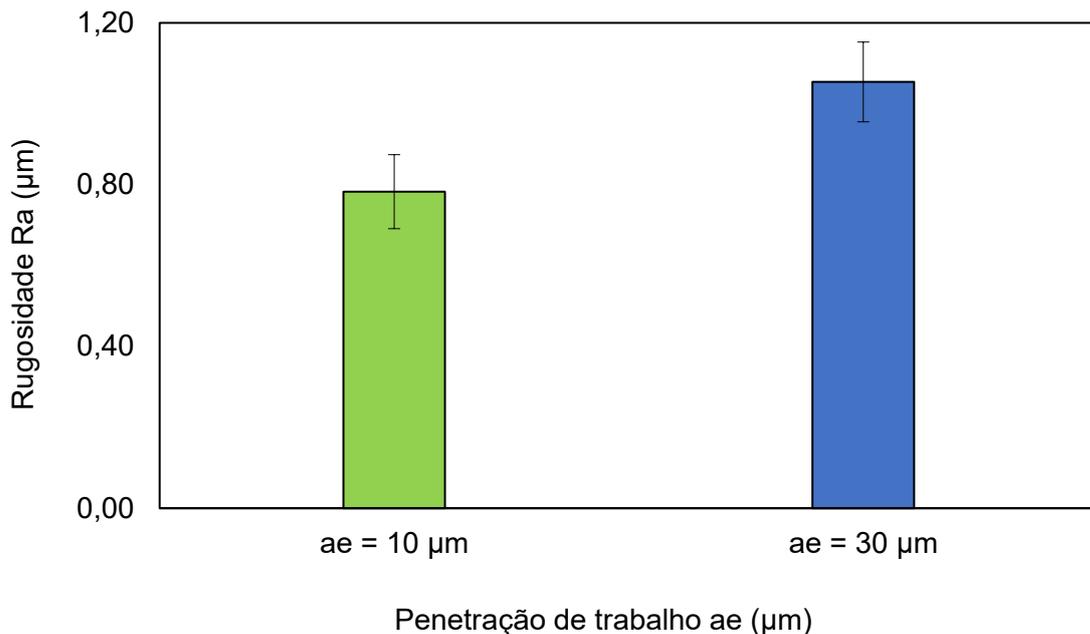


Figura 4. 1 – Valores de rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ ) das amostras de Ti-6Al-4V retificadas em função da penetração de trabalho  $a_e$  ( $\mu\text{m}$ ) do rebolo sobre a peça.

De acordo com Malkin e Guo (2008) com o aumento na penetração de trabalho ( $a_e$ ) do rebolo sobre a peça, no plano de trabalho, uma maior quantidade de abrasivos entra em contato com a peça, ou seja, a área de contato entre o rebolo e a peça tende a ser maior. Por conseguinte, os esforços de corte necessários para remover material aumentam, assim como a temperatura na região, visto que os abrasivos do rebolo adentram mais sobre a peça. Assim, os sulcos gerados pela abrasão dessas partículas sobre o material da peça são proporcionalmente maiores, influenciando diretamente no aumento do parâmetro Ra de rugosidade que, para o processo de retificação, varia de 0,02  $\mu\text{m}$  a 1,60  $\mu\text{m}$ , normalmente (MALKIN; GUO, 2008).

Em concordância com essa informação, Klocke (2009) afirma que a penetração de trabalho ( $a_e$ ) afeta diretamente o desvio médio aritmético da superfície (parâmetro de rugosidade Ra) visto que, quanto maior a profundidade com a qual os abrasivos do rebolo adentram sobre a peça, tanto a área quanto o comprimento de contato entre rebolo e peça aumentam, proporcionando um maior volume de material removido da peça e,

conseqüentemente, os sulcos gerados na superfície ficam mais evidentes em termos de picos e vales.

Em virtude de a rugosidade ou textura primária ser definida como o conjunto de irregularidades microgeométricas quantificado pelas saliências e reentrâncias existentes em uma superfície, a penetração de trabalho empregada ao longo do processo de retificação influencia diretamente na qualidade superficial das peças usinadas, especialmente em termos de desvios microgeométricos, como o parâmetro Ra de rugosidade (ABNT NBR ISO 4287, 2002; Klocke, 2009).

Nessa perspectiva, o desvio médio aritmético Ra é o principal parâmetro de rugosidade mensurado em peças submetidas a algum processo de usinagem, pois é diretamente influenciado pelos sulcos gerados pela interação ferramenta-peça (BHUSHAN, 2013; KARL-HEINZ ZUM GAHR, 1987). Esse parâmetro é definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

Ao retificar uma liga de titânio, como o Ti-6Al-4V, é comum observar uma tendência de aumento na rugosidade superficial ao longo do processo de retificação. Isso ocorre devido às características específicas do titânio, como baixa condutividade térmica, baixo módulo de elasticidade e alta afinidade química, que tornam o material desafiador de ser usinado. (NGUYEN et al., 2019).

Além disso, durante a retificação, o acúmulo de calor na zona de usinagem pode resultar em danos na superfície usinada, como queima e incorporação de altas tensões residuais, levando a um aumento na rugosidade superficial (Malkin & Guo, 2008). Portanto, é esperado que a rugosidade aumente com o tempo de retificação de ligas de titânio, exigindo monitoramento constante e intervenções adequadas para manter a qualidade da superfície dentro dos padrões desejados. Para uma profundidade de corte menor, espera-se que a rugosidade superficial seja mais controlada e menor em comparação com profundidades de corte maiores (NGUYEN et al., 2019).

A rugosidade superficial ideal para uma profundidade de corte de 10  $\mu\text{m}$  pode variar, mas geralmente valores de Ra (rugosidade média) abaixo de 2  $\mu\text{m}$  podem ser considerados aceitáveis para aplicações de alta precisão (NGUYEN et al., 2019). Assim sendo, ao utilizar um maior valor de penetração de trabalho, é esperado que a rugosidade superficial aumente devido à maior remoção de material e possíveis efeitos térmicos, fazendo com que o valor de Ra aceitável seja na faixa de 2  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$ . (MARINESCU, 2016; NGUYEN et al., 2019).

Em outro estudo desenvolvido por Kacalak et al. (2018) o desvio médio aritmético, ou parâmetro Ra de rugosidade foi avaliado em superfícies retificadas da liga aeronáutica Ti-6Al-4V, em função da penetração de trabalho ( $a_e$ ) e do rebolo abrasivo. A partir dos resultados

analisados, foi possível verificar que o aumento no valor da penetração de trabalho, de  $a_e = 5$   $\mu\text{m}$  para  $a_e = 20$   $\mu\text{m}$ , resultou em um aumento de 0,4  $\mu\text{m}$  para 0,65  $\mu\text{m}$ , aproximadamente. De acordo com os autores, esse comportamento decorre do fato de que, com o aumento na penetração de trabalho, o abrasivo penetra ainda mais na peça, aumentando o sulcamento, deformando e deslocando à sua frente mais material da peça, o qual será posteriormente removido sob a forma de cavacos. Em decorrência dessa ação do rebolo, os sulcos gerados são mais profundos e impactam diretamente na medição da rugosidade Ra (KACALAK et al., 2018).

Segundo outro trabalho desenvolvido sobre retificação de ligas de titânio, especificamente a liga Ti-6Al-4V possui outro inconveniente durante a sua usinagem. Os cavacos gerados pelo processo aderem com maior facilidade nos poros do rebolo abrasivo, em razão de sua reatividade térmica com materiais cerâmicos. Como consequência, o rebolo tende a perder a sua capacidade de corte e as temperaturas desenvolvidas são maiores. Acrescenta-se a esse fato, a baixa condutividade térmica do material (Raj Rai et al., 2019).

Ainda de acordo com os autores, quando há um aumento na penetração de trabalho de  $a_e = 5$  para  $a_e = 20$ , mais cavacos tendem a aderir junto aos poros do rebolo, reduzindo a sua capacidade de corte, ou seja, os abrasivos mais atritam do que removem material da peça (Raj Rai et al., 2019).

Portanto, o parâmetro de rugosidade média Ra é diretamente afetado pelas condições de penetração de trabalho ( $a_e$ ) empregadas ao longo do processo de retificação, sobretudo, em materiais de difícil retificabilidade, como a liga Ti-6Al-4V.

#### **4.2 Textura das superfícies (MEV)**

Após os ensaios experimentais de retificação da liga Ti-6Al-4V foram obtidas imagens das superfícies das peças, via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em diferentes regiões das amostras. Na Figura 4. 2 (a) é possível observar uma das imagens extraídas da região central da peça, na condição de penetração de trabalho  $a_e = 10 \mu\text{m}$ . De acordo com a imagem foram constatadas deformações plásticas que resultaram em deslocamento de material da peça, assim como sulcos profundos. Na Fig. 4. 2 (b), em que é possível observar a textura retificada na extremidade da amostra, encontram-se presentes sulcos orientados e material deformado.

Todavia, na condição mais severa de penetração de trabalho ( $a_e = 30 \mu\text{m}$ ), os deslocamentos de material são mais evidentes tanto na região central da peça, Fig. 4. 2 (c), quanto na extremidade, Fig. 4. 2 (d), o que é um indicativo de alta deformação plástica do material.

Quando o abrasivo do rebolo atua sobre a peça, inicialmente há um atrito com a superfície da peça, resultando em deformações elásticas. Contudo, quando o abrasivo vai adentrando no material, ao longo da passagem do rebolo, essas deformações se intensificam e adquirem um comportamento plástico, o qual resulta na formação do cavaco (Klocke, 2009).

Dessa maneira, quanto maior a penetração de trabalho do rebolo sobre a peça, maiores são as deformações elásticas e plásticas que resultam, tanto no deslocamento de material da peça e sulcos profundos, quanto na própria formação de cavaco (Malkin & Guo, 2008).

Contudo, a retificação de materiais de difícil usinabilidade, como as ligas de titânio apresentam algumas peculiaridades. Em específico, a liga Ti-6Al-4V possui uma alta resistência mecânica em elevadas temperaturas (até 1 600 MPa), o que dificulta a formação do cavaco, uma baixa condutividade térmica,  $6,6 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K}^{-1})$ , a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , que faz com que a liga não dissipe com facilidade o calor gerado no processo, o que induz a formação de danos de origem térmica (HOQUE et al., 2022; ISHII; KANEKO; ODA, 2003).

Soma-se a isso a reatividade do elemento titânio com materiais cerâmicos (como o material carbetto de silício do qual os abrasivos do rebolo são constituídos), que provoca uma adesão de material da peça no rebolo, o que reduz a sua capacidade de corte, isto é, o rebolo apenas atrita e risca a peça sem efetivamente remover material, o que é facilmente verificado pela expressiva quantidade de deslocamento de material (Kadivar et al., 2018; Nosenko et al., 2018).

a)  $a_e = 10 \mu\text{m}$  – região central da peça      b)  $a_e = 10 \mu\text{m}$  – extremidade da peça

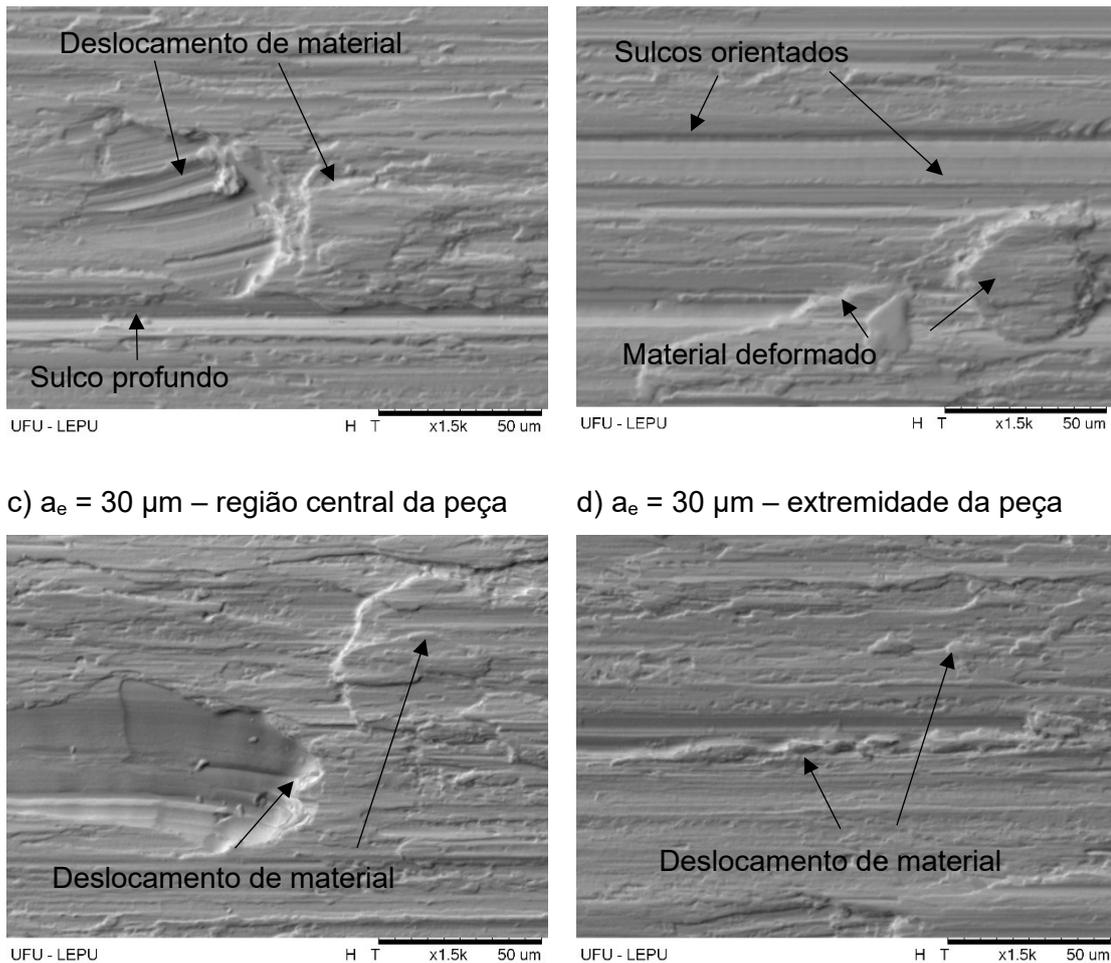


Figura 4. 2 - Imagens das texturas das superfícies de Ti-6Al-4V retificadas na região central da peça, a uma penetração de trabalho  $a_e = 10 \mu\text{m}$  (a), na extremidade da peça a um  $a_e = 10 \mu\text{m}$  (b); na região central da peça, a uma penetração de trabalho  $a_e = 30 \mu\text{m}$  (c) e na extremidade da peça, a uma penetração de trabalho  $a_e = 30 \mu\text{m}$ .

Em um estudo desenvolvido por Pereira et al. (2023) (PEREIRA et al., 2023) com a finalidade de avaliar os efeitos de diferentes condições de dressagem sobre a retificabilidade da liga Ti-6Al-4V, os autores puderam observar por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) que, na condição em que o grau de recobrimento do rebolo foi  $U_d = 3$  (condição severa) sulcos irregulares e trincas de origem térmica foram detectadas nas amostras, tanto na condição de profundidade de dressagem  $a_d = 20 \mu\text{m}$  quanto na condição  $a_d = 40 \mu\text{m}$ . Todavia, ao mudar o grau de recobrimento do rebolo para uma condição mais branda,  $U_d = 12$ , os sulcos gerados pela ação do rebolo abrasivo de carbeto de silício proporcionaram sulcos mais orientados, com regiões mais localizadas de deslocamento lateral de material.

Essa variação na textura das superfícies foi associada a cinemática do processo de dressagem, pois ao mudar o condicionamento do rebolo, de uma condição com altos macroefeitos e microefeitos, para uma condição mais branda, em que sobretudo os macroefeitos foram reduzidos, a qualidade das superfícies melhorou, em razão da diminuição na quantidade de material removido da peça (PEREIRA et al., 2023).

Um estudo desenvolvido por (Sinha et al., 2014) teve por objetivos avaliar o quanto que a adição de nanopartículas de óxido de alumínio no fluido de corte, aplicado via técnica MQL, poderia melhorar o acabamento superficial da liga Ti-6Al-4V submetida a retificação. De acordo com os autores, a dispersão de nanopartículas no fluido de corte, melhora as propriedades de lubrificação na zona de corte; com isso é gerada uma camada de tribofilme na entre abrasivos e a superfície da peça, a qual é responsável por minimizar a reatividade química entre o elemento titânio, presente na peça, e o material dos abrasivos, normalmente, cerâmico. Sobretudo em condição mais elevadas de penetração de trabalho,  $a_e = 30 \mu\text{m}$  essa característica das nanopartículas é evidenciada.

Mukhopadhyay, Kundu e Das (2018) desenvolveram uma análise na textura de amostras da liga Ti-6Al-4V, após a retificação em diferentes atmosferas de lubrificação e constataram que, ao retificar a liga na presença de fluido de corte de base alcalina, as superfícies usinadas apresentaram pontos de arrancamento e redeposição de material e sulcos profundos.

Esses defeitos superficiais foram atribuídos à baixa usinabilidade da liga de titânio, sua alta resistência mecânica e baixa condutividade térmica, que ocasionam uma reatividade química entre abrasivos do rebolo e a liga aeronáutica, e uma maior dificuldade em remover material da peça.

### 4.3 Desvios dimensionais

De acordo com as medições das alturas das amostras de Ti-6Al-4V, antes e após o processo de retificação, nas condições de corte mais branda ( $a_e = 10 \mu\text{m}$ ) e mais severa ( $a_e = 30 \mu\text{m}$ ) foi possível calcular os desvios dimensionais, a média dos desvios, assim como a incerteza associada à medição na Máquina de Medir por Coordenadas.

A partir desses dados, foram elaboradas as Tabelas 4. 3 e 4. 4 que apresentam a incerteza de medição associada a cada uma das variáveis de entrada associadas a este processo de medição, bem como a contribuição de cada parcela para a incerteza de medição, nas duas condições de penetração de trabalho adotadas durante os ensaios de retificação.

De acordo com os dados apresentados nas Tab. 4. 3 e 4. 4 foi possível verificar que, para a condição mais branda de penetração de trabalho ( $a_e = 10 \mu\text{m}$ ) o resultado de medição para a altura das amostras retificadas de Ti-6Al-4V foi de  $(13,9722 \pm 0,0117)$  mm, para um fator k de abrangência de 2,776 e uma probabilidade de abrangência de 95 %.

Na condição de penetração de trabalho mais severa ( $a_e = 30 \mu\text{m}$ ) o resultado de medição alcançado foi de  $(13,6666 \pm 0,0309)$  mm, para um fator k de abrangência de 2,776 e uma probabilidade de abrangência de 95 %.

As alturas das peças de Ti-6Al-4V retificadas e seus respectivos desvios dimensionais, em função da penetração de trabalho  $a_e$ , encontram-se representados graficamente na Fig. 4. 3. As barras verticais dizem respeito aos valores médios da altura das amostras, enquanto as variações em torno da média são as diferenças dimensionais associadas.

Sob a condição de penetração de trabalho mais branda,  $a_e = 10 \mu\text{m}$ , em que o resultado a altura das amostras foi de  $(13,9722 \pm 0,0117)$  mm para um fator **k de abrangência de 2,776, inédito na retificação**, e uma probabilidade de abrangência de 95 %. Ou seja, nesse caso, o diferença dimensional das amostras foi de  $23,4 \mu\text{m}$ , Fig. 4. 3, o que corresponde a uma qualidade de trabalho entre IT7 e IT8.

Todavia, para a condição,  $a_e = 30 \mu\text{m}$ , a altura final das peças foi de  $(13,6666 \pm 0,0309)$  mm para um fator k de abrangência de 2,776 e uma probabilidade de abrangência de 95 %. Nesse caso, o diferença dimensional foi de  $61,8 \mu\text{m}$ , Fig. 4. 3, o que representa uma qualidade de trabalho entre IT9 e IT10. Ou seja, embora de acordo com a literatura o grau de qualidade de trabalho para processos de retificação varie de IT3-IT6, nas condições de corte empregadas para a retificação da liga Ti-6Al-4V as diferenças dimensionais foram maiores, sobretudo, na condição de mais severa de penetração de trabalho ( $a_e = 30 \mu\text{m}$ ).

Tabela 4. 3 - Incerteza de medição associada ao diferença dimensional( $D_d$ ), na condição de penetração de trabalho  $a_e = 10 \mu\text{m}$ .

<b>Grandeza</b>	<b>Estimativa (em mm)</b>	<b>T.A.</b>	<b>D.P.</b>	<b>G.L.</b>	<b>C.S.</b>	<b>Incerteza padrão (em mm)</b>	<b>Cont. (%)</b>
<b>L<sub>MMC</sub></b>	13,9722	A	Normal	4	1	0,004127953	96,42
<b><math>\Delta R_{MMC}</math></b>	0,0005	B	Retangular	$\infty$	1	0,000288675	0,47
<b><math>\Delta C_{MMC}</math></b>	0,0006	B	Normal	100	1	0,000244949	0,34
<b>EA</b>	0,000702	B	Triangular	$\infty$	1	0,000701776	2,79
<b>Incerteza padrão combinada <math>u_c(D_d)</math> – unidade em mm</b>						0,004204262	
<b>Graus de liberdade efetivos <math>\nu_{eff}(D_d)</math></b>						4,303933878	
<b>Fator de abrangência <math>k(D_d)</math></b>						2,776	
<b>Incerteza expandida <math>U(D_d)</math> – unidade em mm</b>						0,01167	

Tabela 4. 4 - Incerteza de medição associada ao diferença dimensional( $D_d$ ), na condição de penetração de trabalho  $a_e = 30 \mu\text{m}$ .

<b>Grandeza</b>	<b>Estimativa (em mm)</b>	<b>T.A.</b>	<b>D.P.</b>	<b>G.L.</b>	<b>C.S.</b>	<b>Incerteza padrão (em mm)</b>	<b>Cont. (%)</b>
<b>L<sub>MMC</sub></b>	13,6666	A	Normal	4	1	0,011102252	99,49
<b><math>\Delta R_{MMC}</math></b>	0,0005	B	Retangular	$\infty$	1	0,000288675	0,07
<b><math>\Delta C_{MMC}</math></b>	0,0006	B	Normal	100	1	0,000244949	0,05
<b>EA</b>	0,000702	B	Triangular	$\infty$	1	0,000701662	0,40
<b>Incerteza padrão combinada <math>u_c(D_d)</math> – unidade em mm</b>						0,011130843	
<b>Graus de liberdade efetivos <math>\nu_{eff}(D_d)</math></b>						4,041360485	
<b>Fator de abrangência <math>k(D_d)</math></b>						2,776	
<b>Incerteza expandida <math>U(D_d)</math> – unidade em mm</b>						0,03090	

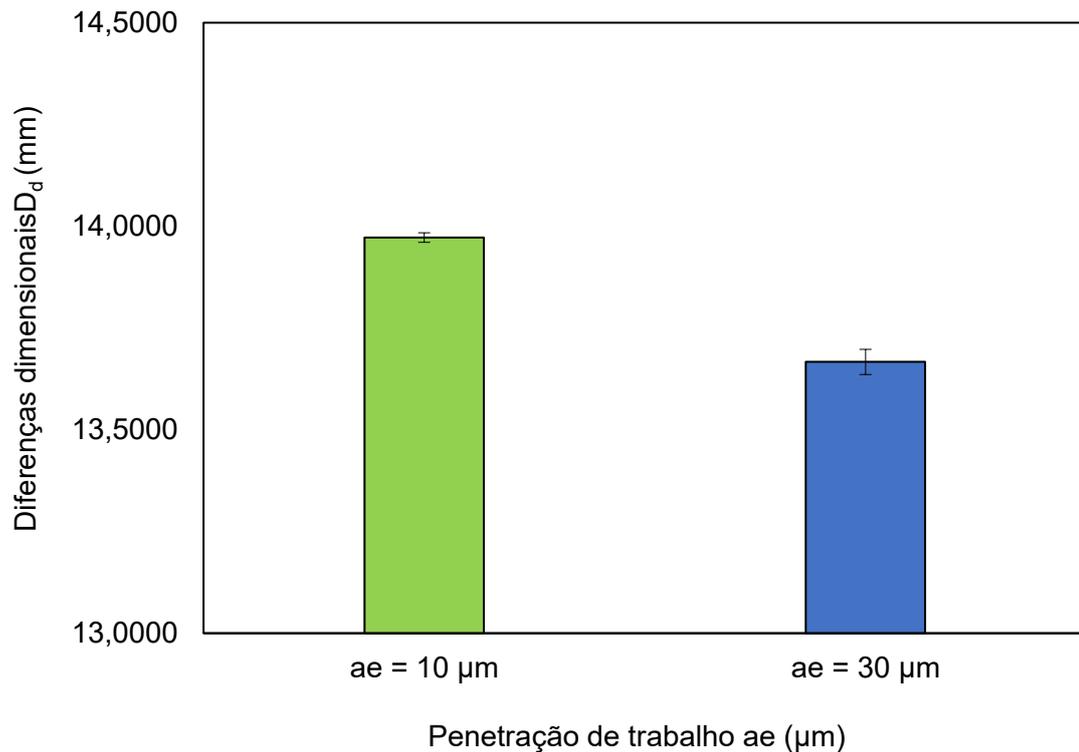


Figura 4. 3 – Diferenças dimensionais nas amostras retificadas de Ti-6Al-4V (em mm) após a retificação, em função das condições de penetração de trabalho  $a_e$  ( $\mu\text{m}$ ).

De acordo com Marinescu (2016) com o aumento na penetração de trabalho ( $a_e$ ) do rebolo sobre a peça é gerada uma maior área de contato; dessa maneira, o volume de material removido é proporcionalmente maior e, dessa maneira, a variação na altura da peça, da condição inicial para a condição final (pós retificação) é maior. Conseqüentemente, o diferença dimensional se torna proporcional à penetração de trabalho ( $a_e$ ), conforme observado no presente trabalho, um aumento de 164,10 % nos desvios dimensionais.

A variação dimensional ou diferença dimensional pode ser caracterizado como um fenômeno normalmente presente em processos de fabricação, como a retificação de materiais metálicas, em que as dimensões finais podem não corresponder exatamente às especificações do projeto devido a diversos fatores, como deformações elásticas e plásticas das peças, dilatações térmicas e vibrações no processo de usinagem. Nesse sentido, para que a qualidade superficial das peças seja garantida são estabelecidas tolerâncias dimensionais que levam em consideração essas variações (OLIVEIRA; SILVA; ARENCIBIA, 2019).

No presente trabalho, ficou evidente que o aumento na condição de penetração de trabalho de  $a_e = 10 \mu\text{m}$  para  $a_e = 30 \mu\text{m}$  proporcionou maior variação dimensional nas amostras de Ti-6Al-4V, de 23,4  $\mu\text{m}$  para 61,8  $\mu\text{m}$ , o que de acordo com (De Oliveira; Da Silva;

Arencibia, (2019) é um comportamento esperado, haja vista que, com o aumento na penetração de trabalho do rebolo sobre a peça, a remoção de material torna-se maior.

A ação dos abrasivos do rebolo gera, por conseguinte, uma topografia macrogeométrica bastante irregular sobre a superfície usinada, com vales mais profundos e picos mais pronunciados. Além disso, a liga Ti-6Al-4V possui uma baixa condutividade térmica ( $6,6 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K}^{-1})$ ) a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , alta resistência mecânica a tração em elevadas temperaturas ( $1\ 600 \text{ Mpa}$ ), e uma alta reatividade química com materiais cerâmicos, como o carbeto de silício, o qual é o abrasivo do rebolo utilizado nos ensaios experimentais deste trabalho. Dessa maneira, ao longo da retificação, como as temperaturas desenvolvidas são muito elevadas, em razão da cinemática do processo, os desvios dimensionais, decorrentes do processo de remoção de material, são maiores do que os especificados em norma.

Em um estudo desenvolvido por De Oliveira, Da Silva e Arencibia (2019) a análise dimensional em amostras de um liga de níquel aeronáutica Inconel 718 foi desenvolvida com a finalidade de avaliar a qualidade superficial do material após a retificação, em diferentes atmosferas de lubrificação (a seco, com fluido de corte e MQL). Além disso, foram adotadas duas diferentes condições de penetração de trabalho ( $a_e = 20 \text{ } \mu\text{m}$  e  $a_e = 40 \text{ } \mu\text{m}$ ).

A partir dos dados mensurados e analisados, foi possível constatar que sob a condição de menor penetração de trabalho,  $a_e = 20 \text{ } \mu\text{m}$ , as diferenças dimensionais foram menores, os quais variaram de  $0,008 \text{ mm}$  a  $0,010 \text{ mm}$  (IT5 – IT8), enquanto na condição de penetração de trabalho,  $a_e = 40 \text{ } \mu\text{m}$ , as diferenças dimensionais variaram de  $0,014 \text{ mm}$  a  $0,028 \text{ mm}$  (IT7 – IT9) (DE OLIVEIRA; DA SILVA; ARENCIBIA, 2019).

De acordo com De Oliveira, Da Silva e Arencibia (2019), quanto menor o valor de penetração de trabalho ( $a_e$ ) adotado na retificação da liga aeronáutica Inconel 718, menores são as diferenças dimensionais gerados nas superfícies usinadas, o que é um indicativo do quanto as deformações elásticas proporcionadas pela retificação influenciam na qualidade final das amostras.

#### 4.4 Desvios de planeza

Após os ensaios experimentais de retificação, foram realizadas medições de desvio de planeza nas amostras de Ti-6Al-4V retificadas. Os dados mensurados foram analisados em termos da média e da incerteza de medição associada ao desvio de planeza, com a máquina de medir por coordenadas, em ambas as condições de penetração de trabalho ( $a_e$ ) empregadas.

Nas Tabelas 4. 5 e 4. 6, encontram-se as incertezas de medição associadas ao desvio de planeza, nas condições  $a_e = 10 \mu\text{m}$  e  $a_e = 30 \mu\text{m}$ , respectivamente, assim como as contribuições de cada variável de entrada sobre a incerteza e o correspondente resultado de medição.

Na condição menos severa de corte, em que a penetração de trabalho adotada foi  $a_e = 10 \mu\text{m}$ , o resultado de medição para o desvio de planeza ( $D_p$ ) foi  $(0,0023 \pm 0,0016)$  mm, para um fator k de abrangência igual a 1,974 e uma probabilidade de abrangência de 95,45 %. Ao aumentar a penetração de trabalho, do rebolo sobre as amostras, a um valor  $a_e = 30 \mu\text{m}$ , o resultado de medição do desvio de planeza ( $D_p$ ) foi maior e equivalente a  $(0,0056 \pm 0,0016)$  mm, para um fator k de abrangência igual a 1,976 e uma probabilidade de abrangência de 95,45 %, Fig. 4. 4.

De acordo com a Tab. 4. 5, é possível verificar que a incerteza associada a calibração da máquina de medir por coordenadas ( $\Delta C_{MMC}$ ) é a fonte que mais contribui para a incerteza de medição associada ao desvio de planeza (74,81 %). A segunda variável de entrada que mais contribui para a incerteza de medição é a resolução finita da máquina ( $\Delta R_{MMC}$ ), com uma contribuição percentual de 12,85 %; em seguida, o erro de apalpamento ( $\Delta EA$ ), 9,25 % e, por fim, a variabilidade das leituras ( $L_{MMC}$ ) é a variável de entrada que menos contribui para a incerteza de medição, com 3,08 %. Esses resultados foram mensurados na condição  $a_e = 10 \mu\text{m}$ .

Ainda de acordo com a Tab. 4. 6, a variável que mais contribuiu para a incerteza de medição foi, igualmente, a incerteza associada à calibração da máquina de medir por coordenadas ( $\Delta C_{MMC}$ ), com 70,47 %. A segunda variável que mais contribuiu para a incerteza foi a resolução finita da máquina ( $\Delta R_{MMC}$ ), com 12,10 %; em seguida, o erro de apalpamento ( $\Delta EA$ ) e a variabilidade das leituras, ( $L_{MMC}$ ), ambos com 8,71 % de contribuição.

Tabela 4. 5 – Incerteza de medição associada ao desvio de planeza ( $D_p$ ), na condição de penetração de trabalho  $a_e = 10 \mu\text{m}$ .

<i>Grandeza</i>	<i>Estimativa (em mm)</i>	<i>T.A.</i>	<i>D.P.</i>	<i>G.L.</i>	<i>C.S.</i>	<i>Incerteza padrão (em mm)</i>	<i>Cont. (%)</i>
$L_{MMC}$	0,0023	A	Normal	4	1	0,000141421	3,08
$\Delta R_{MMC}$	0,0005	B	Retangular	$\infty$	1	0,000288675	12,85
$\Delta C_{MMC}$	0,0006	B	Normal	100	1	0,000696543	74,81
$\Delta EA$	0,000697	B	Triangular	$\infty$	1	0,000244949	9,25
<i>Incerteza padrão combinada <math>u_c(D_p)</math> – unidade em mm</i>						0,000805299	
<i>Graus de liberdade efetivos <math>\nu_{eff}(D_p)</math></i>						171,382572	
<i>Fator de abrangência <math>k(D_p)</math></i>						1,974	
<i>Incerteza expandida <math>U(D_p)</math> – unidade em mm</i>						0,00159	

Tabela 4. 6 – Incerteza de medição associada ao desvio de planeza ( $D_p$ ), na condição de penetração de trabalho  $a_e = 30 \mu\text{m}$ .

<i>Grandeza</i>	<i>Estimativa (em mm)</i>	<i>T.A.</i>	<i>D.P.</i>	<i>G.L.</i>	<i>C.S.</i>	<i>Incerteza padrão (em mm)</i>	<i>Cont. (%)</i>
$L_{MMC}$	0,0056	A	Normal	4	1	0,000244949	8,71
$\Delta R_{MMC}$	0,0005	B	Retangular	$\infty$	1	0,000288675	12,10
$\Delta C_{MMC}$	0,0006	B	Normal	100	1	0,000696545	70,47
$\Delta EA$	0,000697	B	Triangular	$\infty$	1	0,000244949	8,71
<i>Incerteza padrão combinada <math>u_c(D_p)</math> – unidade em mm</i>						0,000829764	
<i>Graus de liberdade efetivos <math>\nu_{eff}(D_p)</math></i>						145,6826475	
<i>Fator de abrangência <math>k(D_p)</math></i>						1,976	
<i>Incerteza expandida <math>U(D_p)</math> – unidade em mm</i>						0,00164	

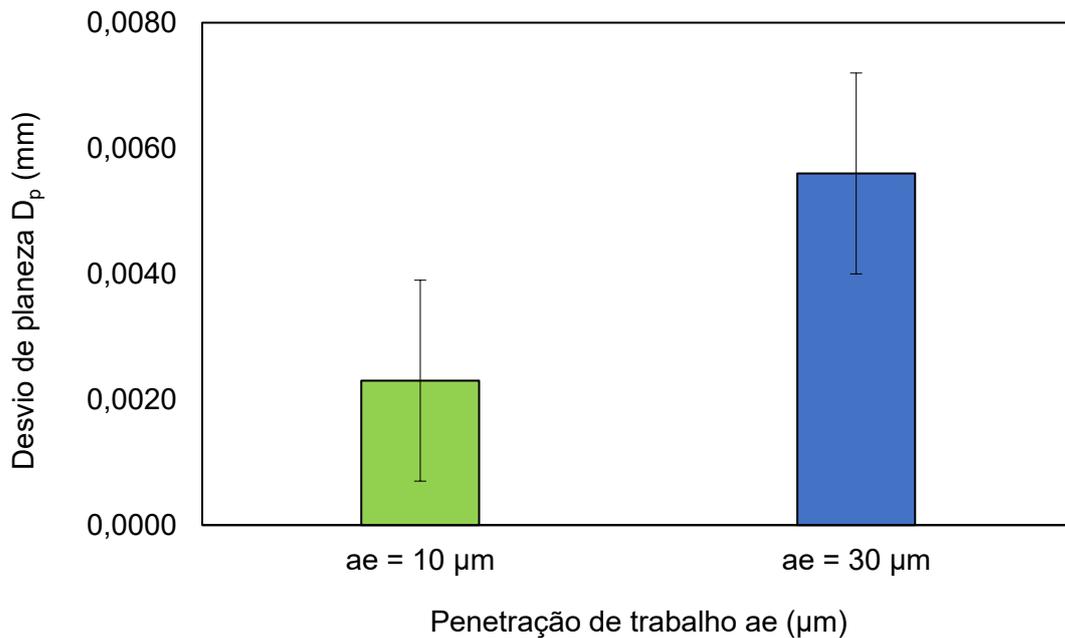


Figura 4. 4 – Desvios de planeza (mm) das amostras de Ti-6Al-4V retificadas, em função das condições de penetração de trabalho  $a_e$  ( $\mu\text{m}$ ).

De acordo com os resultados de medição, para o desvio de planeza, apresentados graficamente na Fig. 4. 4 é possível observar que com o aumento da penetração de trabalho de  $a_e = 10 \mu\text{m}$  (condição branda) para  $a_e = 30 \mu\text{m}$  (condição severa), o desvio de planeza das amostras de Ti-6Al-4V retificadas aumentou em 143,48 %.

O processo de retificação permite assegurar desvios macrogeométricos de forma estreitos nas peças, em razão da cinemática do processo e das variáveis de entrada, isto é, a retificação fundamenta-se na ação de uma ferramenta de revolução abrasiva, cuja velocidade é normalmente acima de 30 m/s, que penetra sobre a peça em valores pequenos, quando comparados com processos convencionais de usinagem. Soma-se a isso, a velocidade de avanço da peça que, quando combinada com as altas velocidades do rebolo abrasivo e a sua baixa penetração de trabalho sobre a peça, proporcionam desvios de forma macrogeométricos estreitos (KLOCKE; LINKE, 2008; ROWE; ANDREW, 2014).

Nesse sentido, a retificação tende a proporcionar valores de desvios de forma estreitos, conforme é possível observar na Fig. 4. 4, em que os desvios de planeza foram mensurados em amostras de Ti-6Al-4V, em que o maior desvio de planeza mensurado foi de 0,0072 mm ou 7,2  $\mu\text{m}$ , observado na condição mais severa,  $a_e = 30 \mu\text{m}$ , e o menor desvio foi de 0,0007 mm ou 0,7  $\mu\text{m}$ , observado na condição menos severa,  $a_e = 10 \mu\text{m}$ .

Esses resultados corroboram que a retificação proporciona baixos desvios de planeza quando comparado com outros processos, como o torneamento (0,01 mm a 0,03 mm) e o fresamento, (0,02 mm a 0,05 mm) (ABNR NBR ISO 6409, 1997).

No entanto, com o aumento da penetração de trabalho  $a_e$ , os esforços necessários para a remoção de material da peça aumentam, visto que a área de contato entre abrasivos do rebolo e peça é maior (Marinescu, 2016). Porém, esses abrasivos se desgastam mais ao longo da zona de contato e assim, a espessura de material removido da peça não é uniforme, o que pode levar a regiões com maior remoção de material do que outras. Essa variação na quantidade de material removido da peça impacta diretamente nos desvios de forma gerados nas superfícies, como o desvio de planeza (ABNR NBR ISO 6409, 1997; MALKIN; GUO, 2008).

Sobretudo em ligas aeronáuticas, a análise do desvio de planeza é necessária dadas as aplicações no motor aeronáutico e em partes da fuselagem. A liga Ti-6Al-4V, além de ser uma liga aeronáutica, é comumente empregada em próteses biocompatíveis com o corpo humano, situação na qual exige-se desvios de forma estreitos (MUKHOPADHYAY; KUNDU, 2019b).

Na literatura ainda são escassos os trabalhos realizados com a finalidade de avaliar desvios de forma macrogeométricos, em especial, nas ligas de titânio submetidas à retificação. A análise do desvio de planeza é um importante aspecto da avaliação topográfica em superfícies usinadas, pois permite avaliar a diferença entre a topográfica mensurada e uma superfície ideal, a partir de um plano de referência.

A importância dessa análise reside na sua capacidade de revelar vieses de medição, verificar o desempenho dos instrumentos e incorporar incertezas nos modelos de medição. Realizar a seleção adequada de condições de medição e artefatos, juntamente com a consideração de parâmetros como  $S_q$  e  $S_{q,n}$ , são essenciais para obter resultados significativos e comparáveis entre diferentes sistemas de medição (VANRUSSELT et al., 2022).

Além disso, a análise cuidadosa do desvio de planeza ajuda a identificar imperfeições, garantir a conformidade com padrões de qualidade e tolerâncias específicas, e otimizar o desempenho de sistemas mecânicos e ópticos. Diferentes métodos e referências, como o plano de mínima zona e o plano de mínimos quadrados, são utilizados para avaliar o desvio de planeza. A escolha do método e da referência adequados depende da aplicação específica e dos requisitos de precisão.

Em resumo, a análise de desvio de planeza desempenha um papel crucial na garantia da qualidade e na otimização do desempenho de componentes e sistemas que dependem de superfícies planas (Vanrusselt et al., 2022b).

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

Diante da análise das imagens das superfícies da liga Ti-6Al-4V retificadas, bem como a partir da avaliação metrológica da incerteza para expressão dos resultados de medição, em termos do parâmetro  $R_a$  de rugosidade, das diferenças dimensionais dos desvios de planeza, algumas conclusões puderam ser obtidas:

- Em termos da rugosidade superficial, a mudança na penetração de trabalho  $a_e$  de uma condição branda ( $a_e = 10 \mu\text{m}$ ) para uma condição severa de retificação, ( $a_e = 30 \mu\text{m}$ ) proporcionou um aumento no parâmetro de rugosidade  $R_a$  de  $(0,78 \pm 0,09) \mu\text{m}$ , para  $(1,05 \pm 0,10) \mu\text{m}$ . Em ambos os casos, o fator  $k$  de abrangência foi igual a 1,96 e probabilidade de abrangência equivalente a 95 %.
- Esse aumento na rugosidade média das superfícies de Ti-6Al-4V retificadas foi de 34,62 %, em função do aumento nos valores de penetração de trabalho.
- No que tange à textura das superfícies retificadas, foi constatado visualmente que, tanto na condição mais branda ( $a_e = 10 \mu\text{m}$ ) como na mais severa de penetração de trabalho ( $a_e = 30 \mu\text{m}$ ), ocorreram deformações plásticas que resultaram em deslocamento de material e sulcos profundos.
- A partir da medição das alturas das peças de Ti-6Al-4V, antes e após o processo de retificação, foi verificado que, a uma condição de penetração de trabalho  $a_e = 10 \mu\text{m}$ , as diferenças dimensionais foram iguais a 23,4  $\mu\text{m}$ . Todavia, ao mudar a penetração de trabalho para uma condição mais severa,  $a_e = 30 \mu\text{m}$ , as diferenças dimensionais subiram para 61,8  $\mu\text{m}$ , um aumento de 164,10 %. Ou seja, na condição mais branda de penetração de trabalho, a qualidade das superfícies variou de IT 7 a IT 8, e na condição mais severa, de IT 9 a IT 10.
- Quanto à análise dos desvios de planeza, foi observado que a mudança na penetração de trabalho de  $a_e = 10 \mu\text{m}$ , para  $a_e = 30 \mu\text{m}$ , gerou um aumento nos desvios de planeza, das superfícies de Ti-6Al-4V, de  $(0,0023 \pm 0,0016) \text{mm}$ , para um fator  $k$  de abrangência de igual a 1,974 e probabilidade de abrangência de 95,45 % para  $(0,0056 \pm 0,0016) \text{mm}$ , para um fator  $k$  de abrangência 1,976 e probabilidade de abrangência 95,45 %. Isto é, o aumento nos valores de

penetração de trabalho a<sub>e</sub> proporcionou um aumento de 143,48 % nos desvios de planeza.

## CAPÍTULO VI

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 6158. (1995). *Sistema de tolerâncias e ajustes*.
- ABNT NBR ISO 4287. (2002). *Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros de rugosidade*.
- ABNT NBR ISO 6409. (1997). *Tolerâncias geométricas-Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho*.  
www.abnt.org.br
- Abrão, A. S., Abrão, B. S., Da Silva, R. B., Do Nascimento, C. G., & Arencibia, R. V. (2023). Cálculo da incerteza de medição associada à Ra obtida no aço inoxidável 316 UF com superfície interrompida após retificação. Em *XXV Colóquio de Usinagem*.
- Agostinho, O. L., Rodrigues, A. C. S., & Lirani, J. (1977). *Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões* (Vol. 1). Edgard Blücher.
- Anand, N., Kumar, A. S., & Paul, S. (2019). Effect of cutting fluids applied in MQCL mode on machinability of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 43, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.029>
- Bai, X., Li, C., Dong, L., & Yin, Q. (2019). Experimental evaluation of the lubrication performances of different nanofluids for minimum quantity lubrication (MQL) in milling Ti-6Al-4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(9–12), 2621–2632. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3100-9>
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology* (Second, Vol. 2). John Wilwy & Sons Ltd.
- Chen, X., & Rowe, W. B. (1996a). ANALYSIS AND SIMULATION OF THE GRINDING PROCESS. PART I: GENERATION OF THE GRINDING WHEEL SURFACE. Em ~ *Pergamon Int. J. Math. Tools Manufaet* (Vol. 36, Número 8). Elsevier \$ciene~ l.td.
- Chen, X., & Rowe, W. B. (1996b). ANALYSIS AND SIMULATION OF THE GRINDING PROCESS. PART I: GENERATION OF THE GRINDING WHEEL SURFACE. Em ~ *Pergamon Int. J. Math. Tools Manufaet* (Vol. 36, Número 8). Elsevier \$ciene~ l.td.

- de Mello, A. V., de Silva, R. B., Machado, Á. R., Gelamo, R. V., Diniz, A. E., & de Oliveira, R. F. M. (2017). Surface Grinding of Ti-6Al-4V Alloy with SiC Abrasive Wheel at Various Cutting Conditions. *Procedia Manufacturing*, 10, 590–600. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.057>
- de Oliveira, D., da Silva, R. B., & Arencibia, R. V. (2019). Evaluation of dimensional deviation in nickel-base, inconel 718, alloy after grinding under different cooling-lubrication techniques. *Revista Materia*, 24(4). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0806>
- Hoque, M. E., Showva, N. N., Ahmed, M., Rashid, A. Bin, Sadique, S. E., El-Bialy, T., & Xu, H. (2022). Titanium and titanium alloys in dentistry: current trends, recent developments, and future prospects. Em *Heliyon* (Vol. 8, Número 11). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11300>
- Hou, Z. B., & Komanduri, R. (2003). On the mechanics of the grinding process - Part I. Stochastic nature of the grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(15), 1579–1593. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00186-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00186-X)
- INMETRO. (2012a). *Guia para a expressão da incerteza de medição terceira edição brasileira - GUM - Avaliação de dados para medição* (Vol. 1). ABNT: INMETRO.
- INMETRO. (2012b). *Vocabulário Internacional de Metrologia* (3º ed). INMETRO.
- Ishii, M., Kaneko, M., & Oda, T. (2003). *Titanium and Its Alloys As Key Materials for Corrosion Protection Engineering \* 1 Titanium Division \* 2 Technical Development Bureau* (Vol. 87).
- ISO. (1988). *The ISO System of Limits and Fits-Tolerances and Deviations*. [www.kok.com/order.htm](http://www.kok.com/order.htm).
- ISO 1101. (1983). *Technical drawings - Geometrical tolerancing - Toleranced characteristics and symbols - Examples of indication and interpretation*.
- ISO/TS 12781-1. (2003). *Geometrical Product Specifications (GPS) — Flatness — Part 1: Vocabulary and parameters of flatness*.
- Kacalak, W., Lipiński, D., Bałasz, B., Rypina, Tandecka, K., & Szafraniec, F. (2018). Performance evaluation of the grinding wheel with aggregates of grains in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1–4), 301–314. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0905-x>

- Kadivar, M., Azarhoushang, B., Daneshi, A., & Krajnik, P. (2020). Surface integrity in micro-grinding of Ti6Al4V considering the specific micro-grinding energy. *Procedia CIRP*, 87, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.069>
- Kadivar, M., Azarhoushang, B., Shamray, S., & Krajnik, P. (2018). The effect of dressing parameters on micro-grinding of titanium alloy. *Precision Engineering*, 51, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.08.008>
- Karl-Heinz Zum Gahr. (1987). *Microstructure and Wear of Materials* (Vol. 10). Elsevier Science Publishing Company INC.
- Klocke, F. (2009). *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*. c Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92259-9>
- Klocke, F., & Linke, B. (2008). Mechanisms in the generation of grinding wheel topography by dressing. *Production Engineering*, 2(2), 157–163. <https://doi.org/10.1007/s11740-008-0101-9>
- Leal, J. E. S., da Silva, J. A., & Arencibia, R. V. (2020). Contributions to the adaptive Monte Carlo method. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(9). <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02548-3>
- Leyens, C. (Christoph), & Peters, M. (Manfred). (2003a). *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Wiley-VCH.
- Leyens, C. (Christoph), & Peters, M. (Manfred). (2003b). *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Wiley-VCH.
- Linke, B., & Klocke, F. (2010). Temperatures and wear mechanisms in dressing of vitrified bonded grinding wheels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(6), 552–558. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.03.002>
- Lv, F., Hu, C., Du, W., & Wang, X. (2022). Dimension Measurement and Quality Control during the Finishing Process of Large-Size and High-Precision Components. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3955974>
- Malkin, S. (Stephen), & Guo, C. (2008). *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives*. Industrial Press.
- Marinescu, I. D. (2016). *Handbook of machining with grinding wheels* (2<sup>o</sup> ed, Vol. 2). Taylor & Francis Group.
- Martins, H., & Único, R. V. (2019). *Controle Estatístico de Qualidade*. [www.cecierj.edu.br](http://www.cecierj.edu.br)

- Mukhopadhyay, M., & Kundu, P. K. (2018). Optimization of dressing infeed of alumina wheel for grinding Ti-6Al-4V. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(13), 1453–1458. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1453164>
- Mukhopadhyay, M., & Kundu, P. K. (2019a). Enhancing grindability of Ti-6Al-4V applying ecological fluids under SQL using SiC wheel. *SN Applied Sciences*, 1(6). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0616-z>
- Mukhopadhyay, M., & Kundu, P. K. (2019b). Enhancing grindability of Ti-6Al-4V applying ecological fluids under SQL using SiC wheel. *SN Applied Sciences*, 1(6). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0616-z>
- Mukhopadhyay, M., & Kundu, P. K. (2019c). Evaluating application potentiality of unconventional fluids for grinding Ti-6Al-4V using alumina wheel. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(10), 1151–1159. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1615086>
- Mukhopadhyay, M., & Kundu, P. K. (2019d). Evaluating application potentiality of unconventional fluids for grinding Ti-6Al-4V using alumina wheel. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(10), 1151–1159. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1615086>
- Mukhopadhyay, M., Kundu, P. K., Chatterjee, S., & Das, S. (2019). Impact of dressing infeed on SiC wheel for grinding Ti-6Al-4V. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(1), 54–60. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1532588>
- Mukhopadhyay, M., Kundu, P. K., & Das, S. (2018). Experimental investigation on enhancing grindability using alkaline-based fluid for grinding Ti-6Al-4V. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(16), 1775–1781. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1476759>
- Nadolny, K., & Kapłonek, W. (2014). Analysis of flatness deviations for austenitic stainless steel workpieces after efficient surface machining. *Measurement Science Review*, 14(4), 204–212. <https://doi.org/10.2478/msr-2014-0028>
- Nguyen, D., Yin, S., Tang, Q., Son, P. X., & Duc, L. A. (2019). Online monitoring of surface roughness and grinding wheel wear when grinding Ti-6Al-4V titanium alloy using ANFIS-GPR hybrid algorithm and Taguchi analysis. *Precision Engineering*, 55, 275–292. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.09.018>
- Nosenko, S. V., Nosenko, V. A., & Koryazhkin, A. A. (2018). The effect of the operating speed and wheel characteristics on the surface quality at creep-feed grinding titanium alloys.

- Solid State Phenomena*, 284 SSP, 369–374.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.369>
- Oliveira, D. de, Silva, R. B. da, & Arencibia, R. V. (2019). Avaliação de desvio dimensional em Inconel 718 após a retificação em diferentes técnicas de lubri-refrigeração. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24(4). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0806>
- Palmer, J., Ghadbeigi, H., Novovic, D., & Curtis, D. (2018). An experimental study of the effects of dressing parameters on the topography of grinding wheels during roller dressing. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 348–355.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.025>
- Pereira, M. F., Abrão, B. S., Abrão, A. S., Machado, A. R., Jackson, M. J., Hassui, A., & Da Silva, R. B. (2023a). Influence of grinding wheel conditioning on the grindability of Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-10790-3>
- Pereira, M. F., Abrão, B. S., Abrão, A. S., Machado, A. R., Jackson, M. J., Hassui, A., & Da Silva, R. B. (2023b). Influence of grinding wheel conditioning on the grindability of Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(3–4), 1531–1542. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10790-3>
- Puerto, P., Fernández, R., Madariaga, J., Arana, J., & Gallego, I. (2013). Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. *Procedia Engineering*, 63, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.181>
- Raj Rai, B., Mukhopadhyay, M., & Kumar Kundu, P. (2019). Evaluating the grinding ratio and surface quality of Ti-6Al-4V under varying grinding pass count and depth of cut. *Journal of Physics: Conference Series*, 1240(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1240/1/012143>
- Rowe, W. B., & Andrew, W. (2014). *Principles of Modern Grinding Technology Second Edition*. <http://store.elsevier.com/>
- Senin, N., Catalucci, S., Moretti, M., & Leach, R. K. (2021). Statistical point cloud model to investigate measurement uncertainty in coordinate metrology. *Precision Engineering*, 70, 44–62. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.01.008>
- Singh, H., Sharma, V. S., & Dogra, M. (2020). Exploration of graphene assisted vegetables oil based minimum quantity lubrication for surface grinding of TI-6AL-4V-ELI. *Tribology International*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106113>

- Sinha, M. K., Ghosh, S., & Venkateswara Rao, P. (2014). An investigation into the application of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid-based minimum quantity lubrication technique for grinding of Ti-6Al-4V. Em *Int. J. Precision Technology* (Vol. 4).
- Valdés Arencibia, R., Manuel Díaz Cedré, E., Cruz Crespo, A., & Piratelli-Filho, A. (2011). Incerteza na Medição dos Parâmetros Geométricos do Cordão de Solda (Measurement Uncertainty of Geometric Parameters in Weld Beads). *Soldagem & Inspeção*, 16(1), 62–070.
- Vanrusselt, M., Haitjema, H., Leach, R., & de Groot, P. (2022a). International comparison of flatness deviation in areal surface topography measurements. *CIRP Annals*, 71(1), 453–456. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.04.030>
- Vanrusselt, M., Haitjema, H., Leach, R., & de Groot, P. (2022b). International comparison of flatness deviation in areal surface topography measurements. *CIRP Annals*, 71(1), 453–456. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.04.030>
- Zhao, D., Wang, W., Zhou, J., Cui, K., & Jin, Q. (2018). Dimensional Deviation Estimation for Parts with Free-Form Surfaces. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4390284>
- Zhao, X., Kethara Pasupathy, T. M., & Wilhelm, R. G. (2006). Modeling and representation of geometric tolerances information in integrated measurement processes. *Computers in Industry*, 57(4), 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2005.09.004>

