

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Aderval Ferreira de Lima Filho**

**ESTUDO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DO  
PROCESSO DE FRESAMENTO DA LIGA DE TITÂNIO  
Ti-6Al-4V POR MEIO DA APLICAÇÃO DO  
PLANEJAMENTO FATORIAL NA GERAÇÃO DAS  
FUNÇÕES DE PREDIÇÃO DAS RUGOSIDADES 2D E  
3D**

**Taubaté – SP  
2022**

**Aderval Ferreira De Lima Filho**

**ESTUDO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DO  
PROCESSO DE FRESAMENTO DA LIGA DE TITÂNIO  
Ti-6Al-4V POR MEIO DA APLICAÇÃO DO  
PLANEJAMENTO FATORIAL NA GERAÇÃO DAS  
FUNÇÕES DE PREDIÇÃO DAS RUGOSIDADES 2D E  
3D**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre pelo curso de Mestrado Profissional de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté. Área de concentração: Energia e Materiais

Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Co-orientador: Prof. Me. Nelson Wilson Paschoalinoto

**Taubaté – SP  
2022**

**Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi**  
**Universidade de Taubaté - Unitau**

L732e Lima Filho, Aderval Ferreira de  
Estudo do acabamento superficial do processo de fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V por meio da aplicação do planejamento fatorial na geração das funções de predição das rugosidades 2D e 3D / Aderval Ferreira de Lima Filho. -- 2022.  
183 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação, Taubaté, 2022.  
Orientação: Profa. Dr. José Rubens de Camargo, Departamento de Engenharia Mecânica.  
Coorientação: Prof. Me. Nelson Wilson Paschoalinoto, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Planejamento experimental. 2. Rugosidade. 3. Predição.  
I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. Mestrado em Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD – 671

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

**Aderval Ferreira De Lima Filho**


**ESTUDO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DO  
PROCESSO DE FRESAMENTO DA LIGA DE TITÂNIO  
Ti-6Al-4V POR MEIO DA APLICAÇÃO DO  
PLANEJAMENTO FATORIAL NA GERAÇÃO DAS  
FUNÇÕES DE PREDIÇÃO DAS RUGOSIDADES 2D E  
3D**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre pelo curso de Mestrado Profissional de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté Área de concentração: Produção  
Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo  
Co-orientador: Prof. Me. Nelson Wilson Paschoalinoto

Data: 17/10/2022  
Resultado: Aprovado


Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura:  \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Jorge Antonio Giles Ferrer

Faculdade SENAI Tecnologia Mecatrônica

Assinatura:  \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Francisco José Grandinetti

Universidade de Taubaté

Assinatura:  \_\_\_\_\_

Esta dissertação é dedicada à minha esposa e as minhas filhas, por me inspirarem a tentar ser sempre melhor do ontem, e a todos que de alguma forma me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar força, fé e sabedoria para a vida.

A minha esposa Sílvia por me apoiar incondicionalmente em todo este projeto.

Ao meu grande amigo, coorientador e professor Me. Nelson Wilson Paschoalinoto, da Escola de Engenharia Mauá pela confiança, dedicação e ajuda sempre que precisei, e pelo qual tenho grande admiração.

Ao meu orientador, Prof. Doutor José Rubens de Camargo, pela paciência e por mostrar-se presente em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho, contribuindo de maneira impecável nas discussões proporcionando constante aprendizado.

Ao Diretor da escola SENAI Armando de Arruda Pereira, Prof. Oswaldo Luis Padovan, em primeiro lugar pela amizade, e depois pela disponibilização de toda a infraestrutura da unidade para realização desta pesquisa, além da interveniência da unidade como parte empresarial deste trabalho.

Ao professor Doutor Jorge Antonio Giles Ferrer pela grande ajuda, amizade e suporte.

Aos especialistas em tecnologia do Instituto de Inovação em Manufatura Avançada e Microfabricação da escola SENAI Suíço Brasileira “Paulo Ernesto Tolle”, Prof. Dr. Cristiano Cardoso e Prof. Me. Gleicy de Lima Xavier Ribeiro, pela ajuda na medição dos parâmetros de rugosidade 3D.

A todos que de alguma forma me ajudaram neste trabalho.

A opção é um direito de todos.

**Paulo Rosas**

Não há ensino sem pesquisa e pesquisa sem ensino.

**Paulo Freire**

Gosto de ser gente porque, inacabado, sei que sou um ser condicionado, mas, consciente do inacabamento, sei que posso ir mais além dele.

**Paulo Freire**

## RESUMO

O objetivo desse trabalho é o estudo da usinagem de superfícies de acabamento da liga Ti-6Al-4V, por meio de fresamento com fresa topo em centro de usinagem Romi D600, comando Sinumerik 828D. Os ensaios de usinagem foram divididos em 40 testes conforme um planejamento experimental: 20 ensaios de usinagem sem a utilização de lubrificação e 20 ensaios utilizando o lubrificante Superfluido 3. Para o primeiro grupo a seco, foram 10 ensaios com uma réplica, totalizando 20 ensaios, sendo que o mesmo critério se aplica para o segundo grupo com lubrificação. As peças foram usinadas em velocidades de corte variadas a fim de se estabelecer os parâmetros de entrada do planejamento experimental. Foi utilizada a ferramenta de metal duro BDMT110304ER-JT PR1535, da empresa Kyocera, ideal para usinagem de titânio em processo de acabamento. Uma das metodologias de análise aplicada foi o planejamento fatorial  $2^3$  a fim de se obter a predição da rugosidade média em 2D  $R_a$ , rugosidade total  $R_t$  e rugosidade  $R_q$ , e depois a predição das rugosidades em 3D, com os parâmetros:  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$  e  $S_a$ . Foram propostas as variáveis independentes, velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço por dente ( $f_z$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ) e como variáveis dependentes as rugosidades 2D e 3D citadas. A partir da medição de todos os parâmetros de rugosidade mencionados, foram tabulados e inseridos em software específico de estatística. A partir disto, foram levantados como resultado do planejamento fatorial, os diagramas de Pareto e superfícies de respostas. Como conclusão observou-se que o parâmetro de maior influência no acabamento superficial é o avanço  $f$ , mas quando ocorreram as interações com outros parâmetros em casos específicos, houve outras influências importantes dos parâmetros de corte  $a_p$  e  $V_c$  nos resultados. Observou-se também que o fluido de corte possibilitou melhores resultados nos valores da rugosidade tanto naqueles relacionados à rugosidade 2D como na 3D.

**Palavras-chave:** Planejamento experimental. Rugosidade. Predição. Fresamento. Ti-6Al-4V.



## ABSTRACT

The objective of this work is to study the machining of finishing surfaces of aerospace titanium material, Ti-6Al-4V, by means of end milling in a Romi D600 machining center, Sinumerik 828D command. The machining tests were divided into 40 tests according to an experimental planning: 20 machining tests without the use of lubrication and 20 tests using the Superfluido 3 lubricant. For the first dry group, there will be 10 tests plus 10 replicates, totaling 20 tests, the same criterion applies to the second group with lubrication. The parts will be machined at varying cutting speeds in order to establish the input parameters in the table. Carbide tool BDMT110304ER-JT PR1535, from Kyocera company, will be used, ideal for machining titanium in the finishing process. One of the analysis methodologies to be applied will be  $2^3$  factorial design in order to obtain the prediction of the mean roughness in 2D  $R_a$ , the total roughness  $R_t$  and the roughness  $R_q$ , and then the prediction of the roughness in 3D, the parameters:  $S_q$ ,  $S_{SK}$ ,  $S_{Ku}$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$  and  $S_a$ . Independent variables will be proposed, such as cutting speed ( $V_c$ ), feed per tooth ( $f_z$ ) and cutting depth ( $a_p$ ) and dependent variables, such as: the 2D and 3D roughnesses mentioned. From the measurement of all roughness parameters mentioned, they will be tabulated and entered into specific statistical software. From this, as a result of the factorial planning, Pareto diagrams, comparative graphs inherent to the input variables and roughness will be raised. In conclusion, it was observed that the parameter with the greatest influence on the surface finish is the feed  $f$ , but when interactions with other parameters occurred in specific cases, there were other important influences of the cutting parameters  $a_p$  and  $V_c$  on the results. It was also observed that the cutting fluid provided better results in the roughness values both those related to 2D and 3D roughness.

**Keywords:** Experimental planning. Roughness. Prediction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - linha média.....	23
Figura 2 - Perfis da rugosidade .....	23
Figura 3 - Representação gráfica da rugosidade média em um perfil de rugosidade	26
Figura 4 - Representação gráfica da rugosidade total em um perfil de rugosidade ...	27
Figura 5 - Representação gráfica da rugosidade $R_q$ em um perfil de rugosidade .....	28
Figura 6 - Representação gráfica da rugosidade $S_q$ em um trecho da superfície de rugosidade.....	30
Figura 7 - Representação gráfica da rugosidade $S_{sk}$ em um trecho da superfície de rugosidade.....	31
Figura 8 - Representação gráfica da rugosidade $S_{ku}$ em um trecho da superfície de rugosidade.....	31
Figura 9 - Representação gráfica da rugosidade $S_p$ em um trecho da superfície de rugosidade.....	32
Figura 10 - Representação gráfica da rugosidade $S_v$ em um trecho da superfície de rugosidade.....	32
Figura 11 - Representação gráfica da rugosidade $S_z$ em um trecho da superfície de rugosidade.....	33
Figura 12 - Representação gráfica da rugosidade $S_a$ em um trecho da superfície de rugosidade.....	34
Figura 13 – Máxima temperatura vs velocidade de corte na saída da ferramenta.....	43
Figura 14 – Comparação da distribuição de calor entre a usinagem de aço 1045 e da liga Ti6-Al-4V.....	43
Figura 15 – Média da variação da temperatura na interface cavaco-ferramenta.....	44
Figura 16 – Classificação dos fluidos de corte .....	46
Figura 17 – Corpo de prova .....	53
Figura 18 – Corpo de prova usinado .....	53
Figura 19 - Conjunto Suporte - Pastilha.....	54
Figura 20 - Especificações do fabricante da pastilha.....	54
Figura 21 - Centro de usinagem ROMI D600 Comando Siemens 828D.....	55
Figura 22 – Microscópio Leica S6D.....	56
Figura 23 – Cubo e Matriz de Planejamento.....	57
Figura 24 - Pastilha F4.....	59
Figura 25 - Rugosímetro SURFCOM.....	60
Figura 26 - Interferômetro Taylor Hobson/ Talysurf CCI Lite.....	61
Figura 27 - Área e posição de medição do interferômetro.....	61
Figura 28 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D - $R_a$ (usinagem a seco).....	63
Figura 29 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D - $R_t$ (usinagem a seco).....	63
Figura 30 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D - $R_q$ (usinagem a seco).....	64
Figura 31 - Resultados das interações para $R_a$ – 2D (a) $f \times v_c$ . (b) $f \times a_p$ na usinagem a seco.....	65
Figura 32 - Resultados das interações para $R_t$ – 2D (a) $f \times v_c$ . (b) $f \times a_p$ na usinagem a seco.....	65
Figura 33 - Resultados das interações para $R_q$ – 2D (a) $f_z \times v_c$ . (b) $f_z \times a_p$ na usinagem a seco.....	66

Figura 34 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D - $R_a$ (usinagem com óleo lubrificante).....	68
Figura 35 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D - $R_t$ (usinagem com óleo lubrificante).....	68
Figura 36 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D - $R_q$ (usinagem com óleo lubrificante).....	69
Figura 37 - Resultados das interações para $R_a$ – 2D (a) $f_z \times v_c$ . (b) $f_z \times a_p$ na usinagem com lubrificante. ....	69
Figura 38 - Resultados das interações para $R_t$ – 2D (a) $f_z \times v_c$ . (b) $f_z \times a_p$ na usinagem com lubrificante. ....	70
Figura 39 - Resultados das interações para $R_q$ – 2D (a) $f_z \times v_c$ . (b) $f_z \times a_p$ na usinagem com lubrificante. ....	71
Figura 40 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_q$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	73
Figura 41 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_{sk}$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	74
Figura 42 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_{ku}$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	74
Figura 43 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_p$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	75
Figura 44 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_v$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	75
Figura 45 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_z$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	76
Figura 46 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_a$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	77
Figura 47 - Resultados das interações para $S_q$ – 3D (a) $f \times v_c$ . (b) $f \times a_p$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	77
Figura 48 - Resultados das interações para $S_{sk}$ – 3D (a) $f \times v_c$ . (b) $f \times a_p$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	78
Figura 49 - Resultados das interações para $S_{ku}$ – 3D (a) $f \times v_c$ (b) $f \times a_p$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	79
Figura 50 - Resultados das interações para $S_{ku}$ – 3D $v_c \times a_p$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	79
Figura 51 - Resultados das interações para $S_p$ – 3D (a) $f \times v_c$ . (b) $f \times a_p$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	80
Figura 52 - Resultados das interações para $S_p$ – 3D $f_z \times a_p$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	81
Figura 53 - Resultados das interações para $S_v$ – 3D (a) $f_z \times v_c$ . (b) $f_z \times a_p$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	82
Figura 54 - Resultados das interações para $S_v$ – 3D $a_p \times v_c$ . (usinagem sem óleo lubrificante).....	82
Figura 55 - Resultados das interações para $S_z$ – 3D (a) $a_p \times v_c$ . (b) $f_z \times a_p$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	83
Figura 56 - Resultados das interações para $S_a$ – 3D (a) $f_z \times v_c$ . (b) $f \times a_p$ (usinagem sem óleo lubrificante).....	84
Figura 57 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_q$ (usinagem com óleo lubrificante).....	86
Figura 58 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_{sk}$ (usinagem com óleo lubrificante).....	86

Figura 59 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_{ku}$ (usinagem com óleo lubrificante).....	87
Figura 60 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_p$ (usinagem com óleo lubrificante).....	87
Figura 61 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_v$ (usinagem com óleo lubrificante).....	88
Figura 62 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_z$ (usinagem com óleo lubrificante).....	88
Figura 63 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro $S_a$ (usinagem com óleo lubrificante).....	89
Figura 64 - Resultados das interações para $S_q$ – 3D (a) $f \times v_c$ . (b) $f_z \times a_p$ (usinagem com óleo lubrificante).....	89
Figura 65 - Resultados das interações para $S_{sk}$ – 3D (a) $f_z \times v_c$ . (b) $f_z \times a_p$ (usinagem com óleo lubrificante).....	90
Figura 66 - Resultados da interação para $S_{sk}$ – 3D $V_c \times$ (usinagem com óleo lubrificante).....	91
Figura 67 - Resultados das interações para $S_{ku}$ – 3D (a) $a_p \times v_c$ . (b) $v_c \times f$ (usinagem com óleo lubrificante).....	91
Figura 68 - Resultados das interações para $S_p$ – 3D (a) $f \times V_c$ . (b) $f \times a_p$ (usinagem com óleo lubrificante).....	92
Figura 69 - Resultados das interações para $S_v$ – 3D (a) $f \times v_c$ . (b) $f \times a_p$ (usinagem com óleo lubrificante).....	93
Figura 70 - Resultados das interações para $S_z$ – 3D (a) $f \times v_c$ . (b) $f \times a_p$ (usinagem com óleo lubrificante).....	94
Figura 71 - Resultados das interações para $S_a$ – 3D (a) $f \times v_c$ . (b) $f_z \times a_p$ (usinagem com óleo lubrificante).....	95

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Parâmetros de amplitude .....	29
Quadro 2- Parâmetros espaciais e híbridos .....	34
Quadro 3 - Comparativo entre corte concordante e discordante .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Composição química - TI-6Al-4V .....	35
Tabela 2 - Efeitos dos elementos da liga na estrutura do titânio .....	37
Tabela 3 - Composições, Propriedades Mecânicas e Aplicações Típicas para Várias ligas comuns de titânio. ....	38
Tabela 4 - Características e propriedades do Super fluído 3. ....	53
Tabela 5 – Velocidade de corte de corte ( $v_c$ ) .....	55
Tabela 6 - Avanço de corte ( $f_z$ ) .....	55
Tabela 7 - Profundidade de corte ( $a_p$ ) .....	55
Tabela 8 - Características do Centro de usinagem ROMI D600 .....	56
Tabela 9 - Planejamento dos dados de corte para ensaio a seco e com óleo para rugosidade 2D e 3D.....	58
Tabela 10 - Distribuição das arestas cortantes por ensaio.....	59
Tabela 11 - Parâmetros para medição da rugosidade .....	60
Tabela 12 - Valores médios das rugosidades 2D usinagem a seco. ....	62
Tabela 13 - Valores médios das rugosidades 2D usinagem a óleo. ....	67
Tabela 14 - Funções estatísticas para a predição de $R_a$ , $R_t$ e $R_q$ .....	71
Tabela 15 - Valores médios das rugosidades 3D - usinagem a seco.....	72
Tabela 16 - Valores médios das rugosidades 3D - usinagem com óleo .....	85
Tabela 17 - Funções estatísticas para a predição de parâmetros 3D: $S_q$ , $S_{sK}$ , $S_{Ku}$ , $S_p$ , $S_v$ , $S_z$ .....	95

## LISTA DE ABREVIATURAS

$a_e$	Largura fresada (profundidade radial de corte)
$a_p$	Profundidade axial de corte
$D_c$	Diâmetro da ferramenta
$f_z$	Avanço por dente
$V_c$	Velocidade de corte
$Z_c$	Número de dentes efetivos da fresa
$N$	Rotação do fuso
$V_f$	Avanço por minuto
2D	Dois dimensões
3D	Três dimensões
IT	Índice de tolerância
M	Média
E	Evolvente
P	Parâmetro P perfil primário
R	Parâmetro R perfil de rugosidade
W	Parâmetro W perfil de ondulação
$R_a$	Rugosidade Média Aritmética
$R_t$	Rugosidade total
$R_q$	Rugosidade Média quadrática
$R_{max}$	Rugosidade total
RMS	<i>Root Mean Square</i>
$L_m$	Comprimento de avaliação
$S_q$	Desvio médio quadrático da altura
$S_{sk}$	Representa a assimetria da distribuição de altura.
$S_{ku}$	Representa a curtose da distribuição de altura.
$S_p$	Máxima altura do pico
$S_v$	Mínimo absoluto de altura do plano médio da superfície (Vale).
$S_z$	Distância entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo da superfície.
$S_a$	Média aritmética da altura
$S_{al}$	Autocorrelação do decaimento mais rápido do comprimento
$S_{tr}$	Relação do aspecto na textura
$S_{td}$	Direção da textura na superfície da textura
$S_{dr}$	Razão da área interfacial desenvolvida
$S_{dq}$	Desvio médio da inclinação do quadrado da textura
Ti	Titânio
Al	Alumínio

V	Vanádio
Fe	Ferro
H	Hidrogênio
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
C	Carbono
BCC	Cúbica de corpo centrado
HCP	Hexagonal compacta
$h_d$	Espessura do cavaco
DOE	<i>Design off Experiments</i>
kVA	Potência total instalada



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	18
1.1 Objetivo geral .....	19
1.2 Objetivos Específicos .....	19
1.3 Delimitação .....	20
1.4 Justificativa .....	20
1.5 Estrutura da Dissertação .....	20
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1 Rugosidade 2D.....	21
2.2 Rugosidade 3D.....	28
2.3 Titânio. ....	35
2.4 Fluidos de corte .....	45
2.5 Fresamento. ....	49
2.6 Planejamento fatorial.....	51
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	52
3.1 Realização dos ensaios .....	57
4. RESULTADOS.....	61
4.1 Resultados das rugosidades 2D .....	62
4.2 Funções de predição dos parâmetros 2D .....	71
4.3 Resultados das rugosidades 3D .....	71
4.4 Funções de predição dos parâmetros 3D .....	95
4.5 Comparativo usinagem a seco e com lubrificante. ....	96
5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	97
6. PERSPECTIVAS FUTURAS.....	99
REFERÊNCIAS .....	101
Apêndice A- Medições 3D usinagem a seco .....	105
Apêndice B- Medições 3D usinagem com lubrificante .....	144

## 1. INTRODUÇÃO

Os avanços no desenvolvimento dos produtos impactam diretamente na manufatura, que deve ser competitiva e rápida, dadas as necessidades de responder concomitantemente aos anseios do mercado. O mercado está cada vez mais exigente, mas há características diferentes do que acontecia a no máximo 10 anos. Para responder a estas exigências a indústria está se adaptando, e foca no novo conceito de Indústria 4.0.

Este novo perfil de consumidores, está obrigando a indústria manufatureira a se reinventar com a aplicação das diversas ferramentas que resultam no que se chama hoje de Indústria 4.0. Tal ferramenta proporciona a fabricação de uma grande variedade de produtos, com grande variedade na sua configuração. A customização está presente na maioria dos casos, independentemente se a produção for em grandes quantidades.

Com base nestas informações, grandes células ou sistemas são projetados e adaptados de maneira que atendam às necessidades específicas de fabricação ou configuração do produto, visando adotar técnicas de fabricação que se adaptem com novas exigências do mercado.

Conectado a estes sistemas de fabricação, em grande parte dos produtos, existe a usinagem de peças por remoção de cavacos, que tem sido objeto de estudos em diversos trabalhos científicos. Devido as características intrínsecas deste processo, há várias frentes de pesquisa que podem ser exploradas, visando melhorar a resposta da indústria ao mercado consumidor.

Identificado em 1791 por Willian Gregor na Inglaterra, o Titânio só ganhou notoriedade a partir de meados do século 20, aproximadamente em 1938 até 1940, após o desenvolvimento de um processo de obtenção mais comercial, mas sua utilização era muito difícil devido grandes problemas de reagir com oxigênio e nitrogênio. Na segunda metade do século XX passou a ter utilização comercial em função das suas excelentes propriedades (BARBOSA et al., 2018).

Atualmente o titânio é um dos materiais que mais cresce em termos de aplicações na indústria em geral, e especialmente nas aeroespaciais. Isto deve-se a diversos fatores, como: a sua baixa massa relativa para um determinado nível de força e sua resistência relativa a altas temperaturas. Além disto, ele vem sendo usado há

muito tempo nas seções frontais de motores de aeronaves e em componentes estruturais e de trem de pouso (ZHONG et al., 2020).

Este trabalho visa tratar do acabamento superficial da liga Ti-6Al-4V por meio do fresamento frontal com ferramenta de metal duro. A pesquisa permeará a especificação dos melhores parâmetros para usinagem do material, e obtenção do melhor resultado de acordo com a especificação. Sabe-se, de acordo com AGUIAR (2012) que a escolha da ferramenta e a aplicação adequada dos parâmetros de corte podem contribuir não somente com a obtenção das superfícies especificadas, mas proporcionar a execução das operações com menores custos.

### **Objetivo geral**

Avaliar a influência dos parâmetros de corte como: velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço por dente ( $f_z$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ), definidas nesta pesquisa como variáveis independentes, no processo de fresamento de um corpo de prova da liga Ti-6Al-4V grau 5, para a obtenção das rugosidades 2D: quadrática ( $R_q$ ), total ( $R_t$ ), média ( $R_a$ ), e das rugosidades 3D:  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$ , definidas nesta pesquisa como variáveis dependentes, utilizando-se fresa topo em centro de usinagem Romi D600 e prever variáveis dependentes por meio de um planejamento fatorial.

### **Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos definidos visando atender o objetivo geral foram os seguintes:

- a) Avaliar o processo de usinagem de fresamento de titânio, em acabamento, com ferramenta de metal duro tipo fresa de topo.
- b) Verificar o comportamento da rugosidade 2D em função da combinação dos vários parâmetros relacionados que possam afetar significativamente seus resultados.
- c) Verificar o comportamento da rugosidade 3D em função da combinação dos vários parâmetros relacionados que possam afetar significativamente seus resultados.
- d) Identificar os fatores de maior influência nos parâmetros de rugosidade propostos.

e) Predizer as rugosidades 2D e 3D com base em dados empíricos.

### **Delimitação**

Esta dissertação foi desenvolvida tendo como foco a definição dos melhores parâmetros de corte para obtenção de padrão de acabamento de acordo com as especificações, exclusivamente, para o material Titânio Ti-6Al-4V e utilização da ferramenta de metal duro BDMT110304ER-JT PR1535, da empresa Kyocera, sob condições de lubrificação com fluido de corte e a seco.

### **Justificativa**

A usinagem de novas ligas, principalmente a Ti-6Al-4V proposta, tem sido um problema para os engenheiros de manufatura. Entre estes problemas, pode-se ressaltar a dificuldade de se definir parâmetros de corte adequados para a maximização da produção de peças com o mínimo custo em menores tempos.

Outro ponto é a assertividade na definição destes parâmetros para um determinado padrão de acabamento superficial adequado às especificações de projeto.

A predição de rugosidade representa um importante passo no processo de obtenção das superfícies usinadas, tendo em vista que a operação de acabamento está sempre nos processos finais e é essencial para garantia e controle da qualidade superficial do componente.

### **Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos:

No capítulo 1 (introdução) são apresentados o tema, os objetivos da dissertação, a delimitação do tema e a justificativa.

No capítulo 2 (Revisão de literatura) são apresentados uma revisão das principais bases tecnológicas que envolvem a pesquisa, como: rugosidade 2D, rugosidade 3D, o material titânio, aspectos sobre fluidos de corte, fresamento e planejamento fatorial.

No capítulo 3 (Materiais e métodos) são apresentados os materiais, os métodos, os equipamentos e ferramentas aplicados nos ensaios, bem como, a forma

de realização dos ensaios e o planejamento dos dados para ensaio a seco, e com óleo para estudos das rugosidades 2D e 3D.

No capítulo 4 (Resultados) são apresentados os resultados das rugosidades 2D, 3D os gráficos de Pareto, as superfícies de resposta para todas as análises, e as funções de predição dos parâmetros 2D e 3D.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações finais, apresentando os dados mais relevantes da pesquisa.

No capítulo 6 são consideradas as Perspectivas futuras com sugestões de continuidade da pesquisa.

Nos apêndices são apresentados todos os relatórios de medição da rugosidade 3D.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

Este capítulo discorre sobre as bases tecnológicas do objeto de estudo, orientando sobre os pontos fundamentais da pesquisa.

### **Rugosidade 2D**

Há irregularidades ou imperfeições observadas nas superfícies que podem ser mensuráveis por meio de instrumentos comuns da metrologia, como relógios comparadores e micrômetros; neste caso, são considerados como erros macro geométricos. No entanto, há outras imperfeições perceptíveis e dimensionáveis apenas por meio de instrumentos especiais, como por exemplo os rugosímetros, são considerados erros micro geométricos, ou rugosidade superficial.

De acordo com Almeida et al., (2015), a rugosidade pode ser definida como o conjunto de erros microgeométricos, caracterizado pela presença de saliências e reentrâncias na superfície de um componente.

Sob o ponto de vista da aplicabilidade das peças ou componentes, a rugosidade tem importância fundamental. Entre os aspectos funcionais que podem ser avaliados nos produtos num contexto geral, estão as propriedades mecânicas, as magnéticas, as elétricas, as óticas e as estéticas (GONZÁLEZ, 2000).

Na mecânica, as superfícies, por mais perfeitas que pareçam, são uma herança do método empregado em sua obtenção (torneamento, fresamento, retificação,

lapidação, etc.). Elas apresentam irregularidades, como o espaçamento regular ou irregular que tendem a formar um padrão ou textura característicos (GONZÁLEZ, 2000).

Cada padrão ou textura produzido nas superfícies estarão intrinsicamente relacionados com a função do produto. Existem uma série de especificações que poderão nortear a determinação de cada um destes parâmetros adequados as funcionalidades do conjunto ou máquina. O importante é estabelecer parâmetros que possam ser compreendidos pela manufatura e que favoreçam a fabricação de cada componente de acordo com a necessidade.

À medida que se aumenta a precisão do projeto, ou seja, quanto mais baixos os valores de IT, menores os valores de rugosidade, conforme ilustra a Tabela 1. Mosquera, (2017) cita que, por esse motivo, a importância do estudo do acabamento superficial aumenta à medida que crescem as exigências do projeto.

Tabela 1 – Relação entre tolerância ISO e a rugosidade  $R_a$

ISO	Ra ( $\mu$ m)				
	Dimensão (mm)				
	3	3-18	18-80	80-250	250
IT 6	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2
IT 7	0,3	0,5	0,8	1,2	2
IT 8	0,5	0,8	1,2	2	3
IT 9	0,8	1,2	2	3	5
IT 10	1,2	2	3	5	8
IT 11	2	3	5	8	11
IT 12	3	5	8	12	20
IT 13	5	8	12	20	-
IT 14	8	12	20	-	-

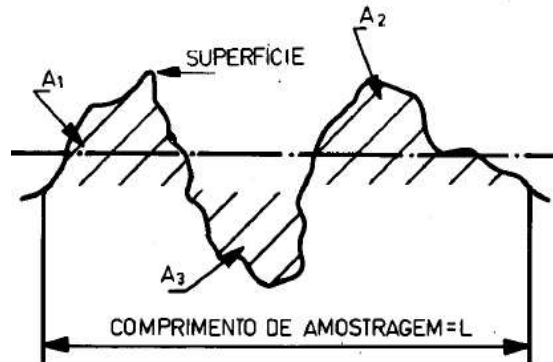
Fonte: Adaptado de (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977)

De acordo com Agostinho (1977), há dois sistemas básicos de medida que são usados nos diversos países, o sistema M e o da evolvente E. A ABNT NBR ISO 4287:2002, (2002), é a norma que regulamenta e estabelece as nomenclaturas, bem como, todos os termos, definições e parâmetros da rugosidade, e adota o sistema M para medição.

No sistema da linha média, ou sistema M, todas as grandezas da medição da rugosidade são definidas a partir da definição de que a linha média é a linha paralela

à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, Figura 1 (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

Figura 1 - linha média



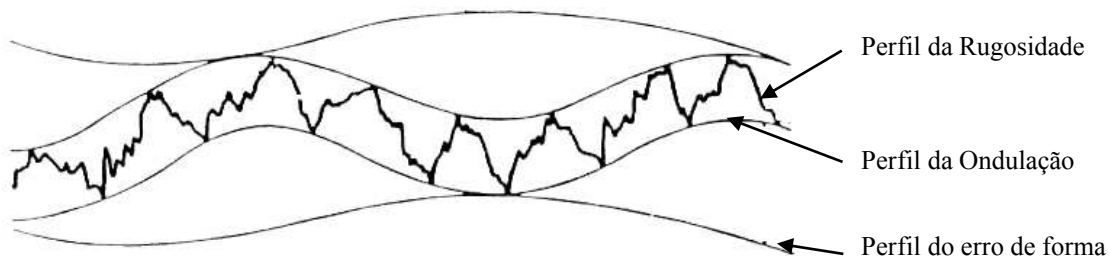
Fonte: Adaptado de (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

O sistema da envolvente, ou sistema E, tem por base as linhas envoltórias descritas pelos centros de dois círculos de raios “R”, normalmente de 250 mm, e raios “r”, normalmente 25 mm, que respectivamente rolam sobre o perfil efetivo.

Tendo em vista a característica da definição geométrica da Figura 1, baseada em uma referência que é uma linha média, de certa forma abstrata, pois é totalmente teórica, haverá possibilidade de que ocorra deformidades em função dos filtros que são aplicados a fim de se eliminar a ondulação na definição da rugosidade.

Tabenkin(1999) cita que a textura consiste nos picos e vales que compõem uma superfície e sua direção. Na análise, a textura pode ser dividida em três componentes: rugosidade, ondulações e forma, Figura 2.

Figura 2 - Perfis da rugosidade



Fonte: Adaptado de (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977)

A fim de se determinar valores de comprimentos de onda visando diferenciar os limites de cada perfil, Tabenkin (1999) estabelece, alguns padrões para peças produzidas por máquinas modernas a velocidades e avanços característicos. Por

exemplo, pode-se definir rugosidade, como qualquer irregularidade com comprimento de onda menor que 0,030 polegadas (0,762mm); ondulações entre 0,030 polegadas (0,762mm) e 0,300 polegadas (7,62mm); e erros de forma em comprimentos de onda superiores a 0,300 polegadas (7,62mm). Esses números são bastante flexíveis, e existem padrões para medidas de rugosidade com comprimentos de onda abaixo de 0,003 polegadas (0,0762mm) e até 1 polegada (25,4mm).

A rugosidade pode ser avaliada por diversos parâmetros, tendo em vista que forma do perfil efetivo da superfície pode influenciar na função da peça, além disto, são diversas variáveis que interferem no formato do perfil, desta forma Machado *et al.* (2009) classifica os principais parâmetros a serem considerados em:

- a) Parâmetros de amplitude, determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales, ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- b) Parâmetros de espaço, determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- c) Parâmetros híbridos, determinados pela combinação dos parâmetros de amplitudes e de espaço.

A ABNT NBR ISO 4287:2002 (2002) normaliza tais parâmetros, respectivamente como: Parâmetros de amplitude ( pico e vale), Parâmetros da amplitude (média das ordenadas) e Parâmetros de espaçamento.

Em relação aos perfis de avaliação a ABNT NBR ISO 4287:2002 (2002) classifica como *Termos para parâmetros geométricos*, sendo eles: parâmetro P, parâmetro R e parâmetro W.

### **2.1.1 Parâmetro P**

É o parâmetro calculado a partir do perfil primário, sendo que o perfil primário resulta da intersecção da superfície medida e um plano normal ao plano médio. O perfil primário é obtido pelo equipamento de medição da rugosidade superficial.



### 2.1.2 Parâmetro R

É o parâmetro calculado a partir do perfil de rugosidade, sua obtenção é feita a partir da remoção por meio de filtros eletrônicos dos comprimentos de onda mais longos do perfil primário.

### 2.1.3 Parâmetro W

É o parâmetro calculado a partir do perfil de ondulação, sua obtenção é feita a partir da remoção por meio de filtros eletrônicos dos comprimentos de onda mais curtos do perfil primário.

### 2.1.4 Parâmetros de Rugosidade

Dentre os vários parâmetros utilizados na medição de rugosidade superficial, considerando-se o sistema M, destaca-se neste estudo três deles, o  $R_a$  – Rugosidade média, o  $R_t$  – rugosidade máxima e o  $R_q$ – rugosidade média quadrática.

De acordo com FANG (2018) os principais parâmetros para avaliar a rugosidade das superfícies são a rugosidade média  $R_a$  e o parâmetro  $R_q$  acompanhado da rugosidade total  $R_{max}$ , ou  $R_t$ .

### 2.1.5 Rugosidade Média Aritmética - $R_a$

O parâmetro  $R_a$  é um dos mais utilizados no monitoramento do acabamento superficial devido a facilidade de controle da rugosidade continuamente nas linhas de produção e devido à sua facilidade de obtenção, além disto, é o mais utilizado no mundo. É classificado como parâmetro da amplitude pela ABNT NBR ISO 4287:2002 (2002).

Recomenda-se sua aplicação em superfícies onde o processo realizado produza sulcos de usinagem regradados e bem orientados, como é o caso do torneamento e fresamento.

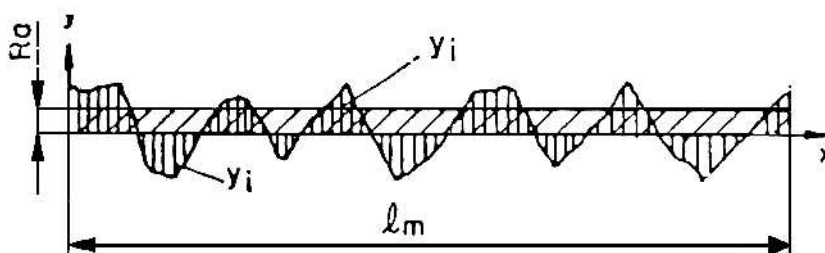
É aplicável à maioria dos processos de fabricação, e, devido a sua grande utilização, quase a totalidade dos equipamentos o apresentam.

$R_a$  é a média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil ( $Y_i$ ) a partir da linha média, Figura 3. Seu valor corresponde à média aritmética. É determinada

pela integral dos valores absolutos das amplitudes ( $Z$ ) do perfil da rugosidade ao longo do comprimento de amostragem, equação 1.

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

Figura 3 - Representação gráfica da rugosidade média em um perfil de rugosidade



Fonte: Adaptado de (JUNIOR, 2002)

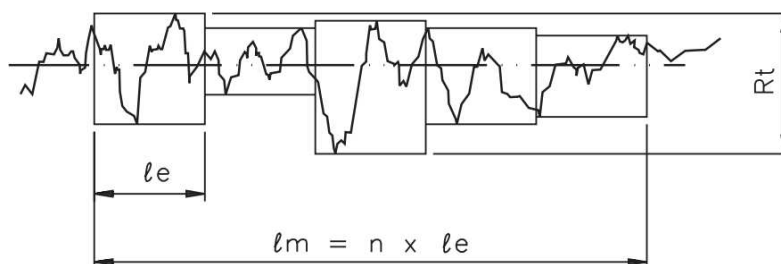
O parâmetro  $R_a$  não é adequado onde há uma frequência muito alta de vales ou picos o parâmetro não sofrerá grande alteração se aparecer um pico ou vale não típico da superfície, ocultando tal defeito. Assim, pode-se ter um mesmo valor de  $R_a$  para processos de usinagem diferentes.

Desta forma, dependendo da aplicação, recomenda-se escolher outros parâmetros para conjuntamente ter maior precisão na especificação do acabamento superficial

### 2.1.6 Rugosidade Total – $R_t$

O parâmetro  $R_t$  corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ( $l_m$ ), independentemente dos valores de rugosidade parcial ( $Z_i$ ). Na Figura 4, pode-se observar que o pico mais alto está no retângulo  $Z_1$ , e que o vale mais fundo se encontra no retângulo  $Z_3$ . Ambos configuram a profundidade total da rugosidade  $R_t$  Telecurso, (1986). Este parâmetro é classificado como parâmetro da amplitude pela ABNT NBR ISO 4287:2002 (2002).

Figura 4 - Representação gráfica da rugosidade total em um perfil de rugosidade



Fonte: Adaptado de TELECURSO (1986)

O parâmetro  $R_t$  é semelhante ao  $R_y$  não contemplado neste estudo, mas possui características de aplicação semelhantes, porém com maior rigidez, tendo em vista que considera o comprimento de amostra igual ao comprimento de avaliação. Por exemplo, é recomendado para superfícies de vedação, superfícies dinamicamente carregadas, tampões em geral, parafusos altamente carregados, ou superfícies de deslizamento em que o perfil efetivo é periódico.

Tem como vantagem a fácil obtenção e uso na maioria dos países, além de informar a máxima deterioração da superfície vertical da peça.

### 2.1.7 Rugosidade Média quadrática – $R_q$

O parâmetro  $R_q$  corresponde a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas,  $Z(x)$ , equação 2, no comprimento de amostragem, Figura 5. Assim, fornece uma medida do desvio padrão dos dados analisados. Também é chamado de RMS – *Root Mean Square*.

Matematicamente:

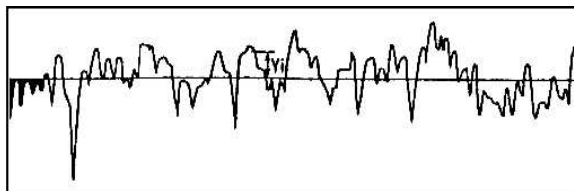
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z^2 dx} \quad (2)$$

Recomenda-se este parâmetro de avaliação em superfícies onde o acabamento apresente riscos de usinagem bem orientados, como na fresagem e no torneamento, e nos casos onde o parâmetro  $R_a$  apresente pouca resolução.

Para superfícies onde a detecção de picos e vales se torna importante e mesmo quando estes aparecem ao acaso, evidenciando-os mais que o  $R_a$ , pois eleva ao quadrado o erro, deixando-o mais acentuado.

Comparado com  $R_a$ , este parâmetro tem o efeito de dar peso extra para altos valores, pois é cerca de 11% maior que  $R_a$  e esta diferença passa a ser importante em muitos casos.

Figura 5 - Representação gráfica da rugosidade  $R_q$  em um perfil de rugosidade



Fonte: Adaptado de (JUNIOR, 2002)

### Rugosidade 3D

No capítulo anterior foi descrito sobre parâmetros 2D, por exemplo: a rugosidade média da superfície ( $R_a$ ) fornece uma descrição geral muito boa das variações de altura, mas não fornece nenhuma informação sobre comprimentos de onda e não é sensível a pequenas alterações no perfil. Em relação ao ( $R_q$ ), a raiz significa que o desvio quadrático do perfil avaliado é mais sensível a desvios da linha principal do que  $R_a$ , mas ainda não fornece uma descrição muito detalhada da superfície. O parâmetro ( $R_t$ ) corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo, mas, também, haverá dificuldades de interpretação da superfície real em todos os cortes realizados em cada plano de medição (SEDLAČEK; PODGORNIK; VIŽINTIN, 2012).

No entanto, atualmente, diversas publicações tem sido encontradas e enfatizado a aplicação da medição 3D da rugosidade. Como em muitos casos, a tecnologia de hardwares e softwares mais avançados tem alavancado o desenvolvimento de estudos mais aprofundados em diversas áreas. A introdução destas tecnologias, tem potencializado o desenvolvimento e comercialização diversos equipamentos capazes de visualizar e medir a topologia 3D das superfícies usinadas e outras em geral.

Embora a medição de perfis 2D tenha perdurado por vários anos, e ainda há de permanecer no mercado por mais tempo, sabe-se que, apenas os perfis obtidos neste método não são suficientes como forma de representação de algo que sempre foi 3D.

Os problemas topográficos das superfícies na engenharia são de origem 3D, e influenciam o funcionamento dos mecanismos devido ao contato de duas superfícies, que independentemente de serem planas, cilíndricas ou complexas, estas encostam uma na outra, as vezes por contato fixo, ou as vezes de deslizamento plano ou por rotação.

Assim, é reconhecido que a topografia da superfície 3D influencia muito, não apenas as propriedades mecânicas e físicas das partes em contato, como também nas propriedades ópticas e de revestimento de alguns componentes sem contato.

A amplitude e as características espaciais da topografia de uma superfície 3D determinarão suas aplicações funcionais, considerando-se: desgaste, fricção, lubrificação, fadiga, vedação, junção, refletância, pintura, rolamento etc (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994).

Para que fosse possível se estabelecer um padrão a partir de uma série de variáveis envolvidas, um comitê técnico da ISO- *International Organization for Standardization* propôs a definição de vários parâmetros de perfil, como por exemplo:  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$  e  $S_a$  descritos na norma ISO 25178 (2012).

Os parâmetros citados acima e no quadro 1, representam a amplitude da área de avaliação. Estes parâmetros dependem da amplitude da altura, quantificando o eixo Z perpendicular à superfície. O plano de referência para o cálculo desses parâmetros é o plano médio da superfície medida (CHIMEZIE; GURRAM, 2016).

Quadro 1- Parâmetros de amplitude

Categoria	Parâmetro	Observações/descrições
Parâmetros de amplitude	$S_q$	Desvio médio quadrático da altura
	$S_{sk}$	Representa a assimetria da distribuição de altura.
	$S_{ku}$	Representa a curtose da distribuição de altura.
	$S_p$	Máxima altura do pico
	$S_v$	Mínimo absoluto de altura do plano médio da superfície (Vale).
	$S_z$	Distância entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo da superfície.
	$S_a$	Média aritmética da altura

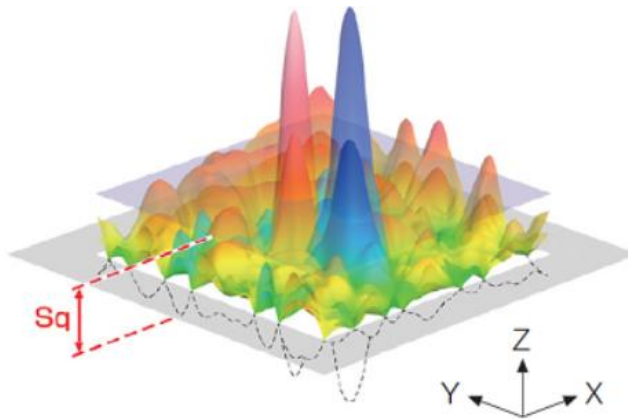
Fonte: Adaptado de RESEARCH (2012)

### **Raiz quadrada média da altura ( $S_q$ )**

Este parâmetro expande o parâmetro de perfil (2D)  $R_q$  em três dimensões, ilustrado pela Figura 6. Ele representa a raiz quadrada média de  $Z(x, y)$  na área de avaliação.

Este é um dos parâmetros mais amplamente usado e também é conhecido como o valor RMS. O parâmetro  $R_q$  corresponde ao desvio padrão da distribuição da altura. O parâmetro gera boas estatísticas e possibilita resultados estáveis, visto que não é afetado significativamente por arranhões, contaminação e pelo ruído da medição (OLYMPUS, 2016).

Figura 6 - Representação gráfica da rugosidade  $S_q$  em um trecho da superfície de rugosidade.



Fonte: Adaptado de (OLYMPUS, 2016)

### **Assimetria ( $S_{sk}$ )**

Este parâmetro expande o parâmetro de perfil (rugosidade da linha)  $R_{sk}$  em três dimensões; o parâmetro  $R_{sk}$  é usado para avaliar desvios na distribuição da altura.

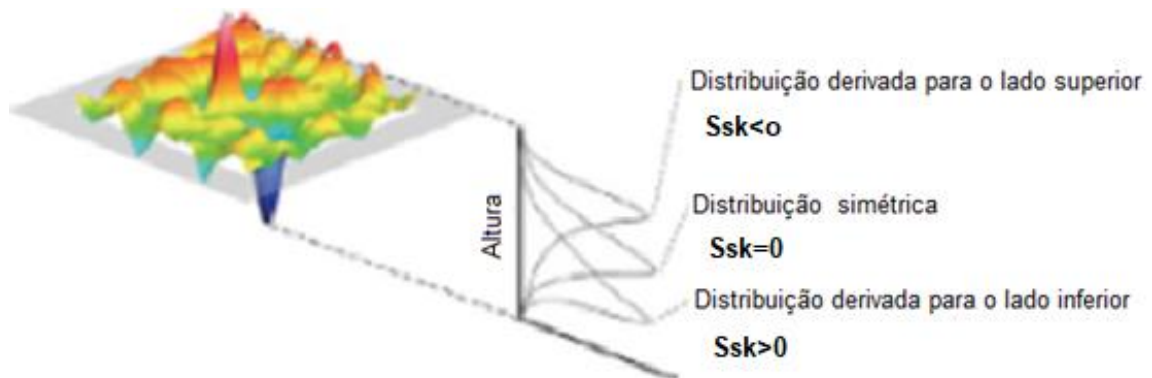
$S_{sk} = 0$ : simétrico em relação à linha média;

$S_{sk} > 0$ : desvio abaixo da linha média;

$S_{sk} < 0$ : desvio acima da linha média

Este parâmetro, ilustrado pela Figura 7, está relacionado à distribuição da altura e é adequado para avaliar a abrasão e o reservatório de lubrificantes para planos de lâmina, (OLYMPUS, 2016).

Figura 7 - Representação gráfica da rugosidade  $S_{sk}$  em um trecho da superfície de rugosidade.



Fonte: Adaptado de (OLYMPUS, 2016)

### **Curtose ( $S_{ku}$ )**

Este parâmetro expande o parâmetro de perfil (2D)  $R_{ku}$  em três dimensões. O  $R_{ku}$  é usado para avaliar quão acentuada é a distribuição da altura.

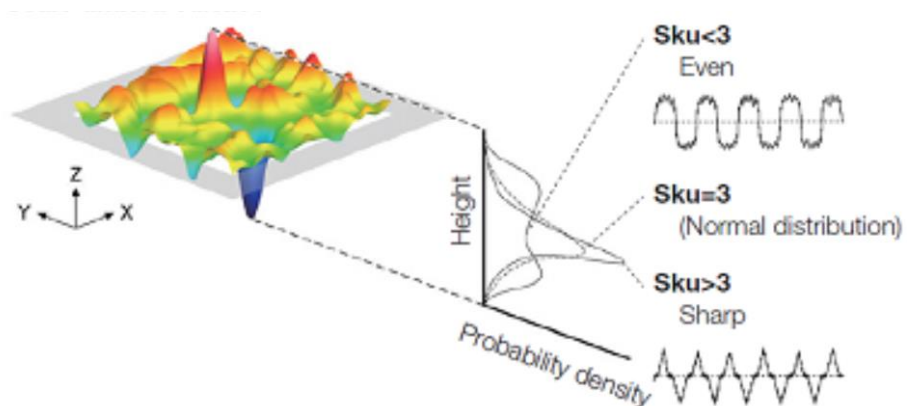
$S_{ku} = 3$ : distribuição normal

$S_{ku} > 3$ : a distribuição da altura é acentuada

$S_{ku} < 3$ : a distribuição da altura é uniforme

Este parâmetro, ilustrado pela Figura 8, está relacionado à geometria da ponta de picos e vales e é adequado para analisar o contato entre dois objetos, (OLYMPUS, 2016).

Figura 8 - Representação gráfica da rugosidade  $S_{ku}$  em um trecho da superfície de rugosidade.

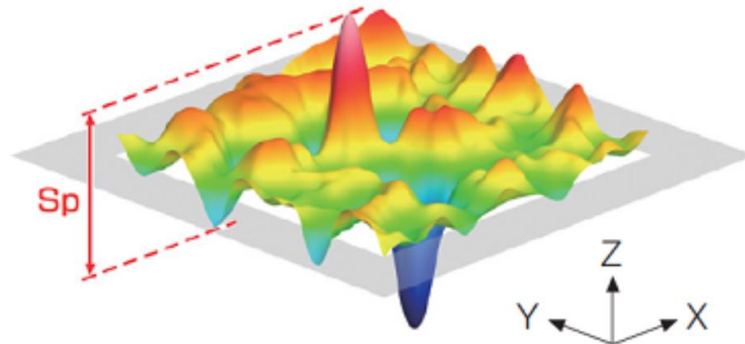


Fonte: Adaptado de (OLYMPUS, 2016)

### Altura máxima do pico ( $S_p$ )

Este parâmetro, ilustrado pela Figura 9 expande o parâmetro de perfil 2D  $R_p$  em 3D. É o valor máximo para a altura do pico, (OLYMPUS, 2016).

Figura 9 - Representação gráfica da rugosidade  $S_p$  em um trecho da superfície de rugosidade.

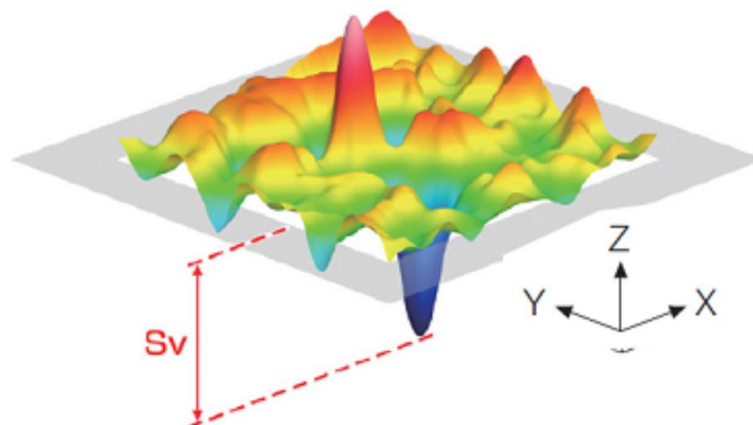


Fonte: Adaptado de (OLYMPUS, 2016)

### Profundidade máxima da cavidade ( $S_v$ )

Este parâmetro, ilustrado pela Figura 10, expande o parâmetro de perfil 2D  $R_v$  em 3D, é o valor máximo para a profundidade do vale, (OLYMPUS, 2016).

Figura 10 - Representação gráfica da rugosidade  $S_v$  em um trecho da superfície de rugosidade.



Fonte: Adaptado de (OLYMPUS, 2016)

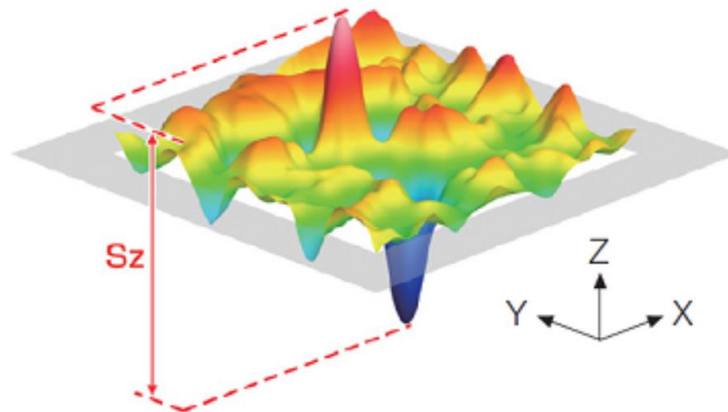


### Altura máxima ( $S_z$ )

Este parâmetro, ilustrado pela Figura 11, expande o parâmetro de perfil 2D  $R_z$  em 3D. A altura máxima  $S_z$  equivale à soma da altura máxima do pico  $S_p$  e à profundidade máxima da cavidade  $S_v$ .

Este parâmetro é significativamente influenciado por arranhões, contaminação e pelo ruído da medição, devido à sua utilização de valores de pico , (OLYMPUS, 2016).

Figura 11 - Representação gráfica da rugosidade  $S_z$  em um trecho da superfície de rugosidade.



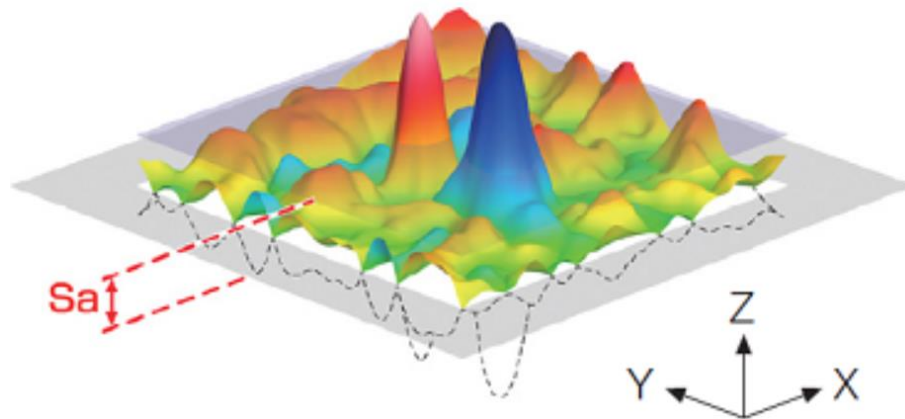
Fonte: Adaptado de (OLYMPUS, 2016)

### Média aritmética da altura ( $S_a$ )

Este parâmetro, ilustrado pela Figura 12, expande o parâmetro de perfil 2D  $R_a$  em 3D. Ele representa a média aritmética da ordenada absoluta  $Z$  ( $x,y$ ) na área de avaliação.

Este é um dos parâmetros mais usados e representa a média da diferença de altura média para um plano médio. Ele fornece resultados estáveis, visto que não é afetado significativamente por arranhões, contaminação e pelo ruído de medição , (OLYMPUS, 2016).

Figura 12 - Representação gráfica da rugosidade  $S_a$  em um trecho da superfície de rugosidade.



Fonte: Adaptado de (OLYMPUS, 2016)

No quadro 2, estão representados os parâmetros S relacionados a informações espaciais e híbridos. Os parâmetros espaciais descrevem as características topográficas com base na análise fictícia. Eles quantificam as informações laterais presentes nos eixos X e Y da superfície (CHIMEZIE; GURRAM, 2016).

Os parâmetros híbridos são aqueles que focam tanto na direção da altura quanto na direção do plano médio.

Quadro 2- Parâmetros espaciais e híbridos

Categoria	Parâmetro	Observações/descrições
Parâmetros espaciais	$S_{al}$	autocorrelação do decaimento mais rápido do comprimento
	$S_{tr}$	relação do aspecto na textura
	$S_{td}$	direção da textura na superfície da textura
Parâmetros híbridos	$S_{dr}$	razão da área interfacial desenvolvida
	$S_{dq}$	desvio médio da inclinação do quadrado da textura

Fonte: Adaptado de RESEARCH (2012).

De acordo com a ISO 25178 (2012), outros aspectos podem ser analisados em relação a textura 3D das superfícies, entre elas os parâmetros de volumes funcionais, representados por:  $V_m$ ,  $V_v$ ,  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vc}$  e  $V_w$ , e os *Feature parameters* representados por:  $S_{pd}$ ,  $S_{pc}$ ,  $S_{10z}$ ,  $S_{5p}$ ,  $S_{5v}$ ,  $S_{da}(c)$ ,  $S_{ha}(c)$ ,  $S_{dv}(c)$ , e  $S_{hv}(c)$ , que não serão estudados neste trabalho.

## Titânio.

O material utilizado neste estudo foi a liga de titânio Ti-6Al-4V devido ao fato de ser um material que tem sua utilização em maior crescimento na indústria, principalmente, em aplicações aeroespaciais. É considerada uma das ligas de pior usinabilidade, exigindo estudos sucessivos de pesquisadores para entender como melhor usiná-lo. A composição química encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1– Composição química - TI-6Al-4V

Composição	Ti	Al	V	Fe	H	N	O	C	Y
Data (%)	Bal.	6.49- 6.56	4.03- 4.14	0.16- 0.19	0.002- 0.003	0.003- 0.004	0.192- 0.196	0.024- 0.028	<0.001

Fonte: (VINER BRASIL, 2020)

O titânio é um dos materiais importantes para construção mecânica e o que tem se desenvolvido mais rápido. Sua aplicação na indústria tem aumentado a cada ano. A principal justificativa disto é especialmente sua baixa massa relativa quando associada aos níveis de força e sua resistência a altas temperatura. Por causa de suas propriedades mecânicas, titânio e ligas de titânio são um dos mais materiais comumente usados em processos de fabricação em certas indústrias-chave, como a aeronáutica, aeroespacial e médica (GARCÍA-MARTÍNEZ *et al.*, 2019).

Ainda, de acordo Garcia-Martinez et al. (2019) o Ti-6Al-4V é a liga de titânio mais significativa do ponto de vista de aplicações industriais.

### 2.1.8 Metalurgia das ligas de titânio.

O Titânio é obtido por meio de vários minerais, sendo que os mais comuns e mais importantes são o Rutílio e a Ilmenita.

Para a obtenção do elemento titânio, utiliza-se o método mais conhecido que é o processo Kroll. Tal processo consiste na redução utilizando-se um reator com atmosfera inerte de  $TiCl_4$  com magnésio, ambos no estado líquido.

O tetracloreto é preparado através da cloração de uma mistura de carbono com rutílio ou ilmenita. Os produtos da reação são a esponja de titânio (na forma de uma

massa porosa, cinzenta) e cloreto de magnésio sendo, na maioria das vezes, drenados do reator como líquidos. O  $MgCl_2$  é reciclado eletroliticamente e a esponja de titânio é consolidada por fusão a arco, (PIRES, 2011).

O titânio tem duas estruturas cristalinas elementares: na primeira, os átomos, são dispostos em uma matriz cúbica de corpo centrado (BCC) e na segunda, os átomos são organizados em uma matriz hexagonal compacta (HCP), (DONACHIE, 2000).

O titânio é um elemento alotrópico, pois existe em mais de uma forma cristalográfica. Em temperatura ambiente, ele é HCP, a fase alfa, tal estrutura se transforma em (BCC) a  $888^{\circ}C$ , denominada fase beta, (DONACHIE, 2000).

De acordo com Donachie, (2000) é comum separar as ligas em quatro categorias, referindo-se às fases normalmente presentes da seguinte forma:

- Alpha
- Quase alfa
- Alfa-beta (alfa-mais-beta)
- Beta.

A adição de pequenas quantidades de Alumínio e Vanádio ao Titânio puro, favorece o aumento da resistência mecânica, tendo em vista que o alumínio é um estabilizante da fase alfa e o vanádio age como estabilizante da fase beta. Tal fenômeno faz com que a temperatura de transição da alfa-beta seja suprimida favorecendo a existência de alfa e beta, concomitantemente. É o caso da liga Ti-6%Al-4% que contempla tal estrutura de grãos alfa e beta.

A tabela 2, ilustra o comportamento das características das várias ligas de titânio em função dos elementos de liga a serem adicionados.

Tabela 2 - Efeitos dos elementos da liga na estrutura do titânio

Elementos a estabilizadores: alumínio, oxigênio, nitrogênio		Elementos b estabilizadores: ferro, molibdênio, vanádio, cromo, manganês		
← Quantidades crescentes de estabilizadores alfa promovem a fase alfa				
Quantidades crescentes de estabilizadores beta promovem a fase beta →				
Liga $\alpha$	Semi $\alpha$	Liga $\alpha - \beta$	Semi - $\beta$	Liga $\beta$
Ti não-ligado	Ti-5Al-6Sn-2Zr-	Ti-6Al-4V	Ti-8Mn	Ti-8Mo-8V- 2Fe-
Ti-5Al-2,5Sn	1Mo-0,2Si	Ti-6Al-6V-2Sn		3Al
	Ti-8Al-1Mo-1V			Ti-13V-11Cr- 3Al
Maior densidade			→	
Melhor resposta ao tratamento térmico			→	
Maior resistência de curto período de tempo			→	
←		Maior resistência à fluência		
Maior suscetibilidade à deformação			→	
←		Soldabilidade melhorada		
Forjabilidade e conformabilidade melhorada			→	

Fonte: Adaptado de DONACHIE (2000)

As ligas de titânio são extremamente resistentes, são possíveis limites de resistência à tração à temperatura ambiente tão elevados quanto 1400MPa, produzindo resistências específicas excepcionais (CALLISTER JR., 2008).

A tabela 3 apresenta as ligas mais frequentemente usadas com seus limites de resistência à tração e aplicações típicas.

Tabela 3 - Composições, Propriedades Mecânicas e Aplicações Típicas para Várias ligas comuns de titânio.

Tipo da liga	Nome comum (Número UNS)	Composição (%)	Condição	Propriedades Mecânicas Médias		Ductilidade	Aplicações típicas
				Limite de resistência à tração	Limite de escoamento		
Comercialmente puro	Não ligada (R50500)	99,1 Ti	Recozido	484 (70)	414 (60)	25	Protetores de motores a jato, carcaças e fuselagens de aviões, equipamentos resistentes à corrosão para as indústrias naval e de processamento químico.
$\alpha$	Ti-5Al-2,5Sn (R54520)	5Al, 2,5Sn, restante Ti	Recozido	826 (120)	784 (114)	16	Carcaças e anéis de motores de turbina a gás, equipamentos para processamento químico que exigem resistência a temperaturas de 480°C
próxima a $\alpha$	Ti-8Al-1Mo-IV (54810)	8Al, Mo-IV, restante Ti	Recozido (Duplex)	950 (138)	890 (129)	15	Peças forjadas para componentes de motores a jato (discos, placas e conectores de compressores)
$\alpha$ - $\beta$	Ti-6Al-4V (56400)	6Al, 4V, restante Ti	Recozido	947 (137)	877 (127)	14	Implantes e próteses de alta resistência, equipamentos para processamento químico, componentes estruturais das fuselagens de aviões.
$\alpha$ - $\beta$	Ti-6Al-6V-2Sn (56620)	6Al, 2Sn, 6V, 0,75 Cu, restante Ti	Recozido	1050 (153)	985 (143)	14	Aplicações nas fuselagens das carcaças de motores de foguetes e nas estruturas de fuselagens de alta resistência para aviões.
$\beta$	Ti-10V-2Fe-3Al	10V, 2Fe, 3 Al, restante Ti	Solubilização = Envelhecimento	1223 (178)	1150 (167)	10	Melhor combinação de alta resistência e tenacidade dentre todas as ligas comerciais de titânio; usada para aplicações que exigem uniformidade das propriedades de tração nas posições na superfície e no centro; componentes de alta resistência das fuselagens dos aviões.

Fonte: Adaptado de CALLISTER JR (2008)

### 2.1.9 Classificação comercial das ligas de titânio.

Callister JR., (2008), aponta 6 (seis) classes de Titânio na tabela 2, o comercialmente puro (99,1 Ti), a  $\alpha$  (Ti-5Al-2,5Sn), a  $\alpha$  (Ti-8Al-1Mo), a  $\alpha$ - $\beta$  (Ti-6Al-4V), a  $\alpha$ - $\beta$  (Ti-6Al-6V-2Sn) e a  $\beta$  (Ti-10V-2Fe-3Al). Donachie, (2000), aponta 5 (cinco) na tabela 1, as classes: alpha, semi-alfa, alfa-beta semi-beta e beta. No entanto há uma classificação comercial utilizada pela maioria dos fornecedores do material, seguindo a ASTM - *American Society for Testing and Materials* tendo em vista que existem mais de 40 ligas comerciáveis.

As principais ligas são classificadas pela ASTM (2013), sendo que a ASTM F136-08 (1875), regulamenta as áreas químicas, mecânicas e requisitos metalúrgicos das

ligas de titânio 6Al4V para aplicações na fabricação de implantes cirúrgicos. A ASTM B265 (2009), cuida da especificação padrão para titânio e liga de titânio, folhas e placas. A ASTM F67 (2006) cuida da especificação padrão para titânio não ligado para aplicações em implantes cirúrgicos. A ASTM B 348 (2013) regulamenta a especificação padrão para titânio e liga de titânio, barra e tarugos.

#### **2.1.10 Características da liga Ti-6Al-4V.**

Na indústria aeronáutica Polishetty *et al.*, (2014) afirma que o titânio tem sido escolhido em substituição ao alumínio e ao aço, mesmo com custo maior, sendo que em relação ao alumínio, suas propriedades de resistência permitem dimensões menores das estruturas e em relação ao aço possui densidade menor admitindo ser muito mais leve.

De acordo com Diniz *et al.*, (2013), uma estrutura feita de titânio comparada a uma idêntica feita de aço (mesmo volume) tem perto do dobro da resistência mecânica desta última, quando comparadas com as ligas de alumínio, as de titânio apresentam resistência cerca de quatro vezes maior, com densidade 50% superior.

Em relação às outras ligas, a Ti-6Al-4V possui boas propriedades de resistência e boa resistência à fluência. É bom para aplicação na maioria dos ambientes naturais e industriais devido à excepcional resistência à corrosão. Possui aproximadamente a metade da densidade das ligas de níquel.

Entre as ligas Ti-6Al-4V é de longe a liga de titânio mais popular. Warlimont (2018) cita que mais de 50% de todas as ligas em uso hoje são desta composição. A liga foi desenvolvida no início dos anos 1950 nos Estados Unidos no Instituto de Tecnologia de Illinois e é, portanto, uma das primeiras ligas de titânio a serem feitas. Existem duas razões para o sucesso do Ti-6Al-4V. Primeiro, o bom equilíbrio de suas propriedades, e, em segundo lugar, é de longe a liga de titânio mais intensamente desenvolvida e testada, o que é uma grande vantagem - especialmente na indústria aeroespacial, o maior usuário de Ti-6Al-4V.

Além da excelente aplicação na indústria aeronáutica, é tipicamente aplicado em joalheria, química, molas, parafusos e vários tipos de fixadores.

Antoniali (2009) cita que Ligas alfa-beta, como a liga Ti-6Al-4V, apresentam propriedades em um nível intermediário entre as ligas alfa e as ligas beta, sendo que

as ligas alfa apresentam maiores durezas a quente e soldabilidade, enquanto que as ligas beta apresentam maiores conformabilidade e endurecibilidade.

### **2.1.11 Usinabilidade das ligas de titânio.**

O titânio pode ser usinado utilizando-se técnicas comparáveis às usadas para usinagem do aço inoxidável 316, Donachie (2000) e requer forças de usinagem ligeiramente superiores em relação ao aço comum.

No entanto, sabe-se que em usinagem, a quantidade de variáveis que interferem nos resultados, sejam eles quantitativos ou qualitativos são muito grandes, e o conhecimento relacionado ao titânio ainda está em fase de desenvolvimento, tendo em vista o desenvolvimento deste material e das ferramentas de corte para sua usinagem.

As ligas de titânio apresentam alta dificuldade para serem usinadas e isto ocorre devido a várias propriedades, como: baixíssima condutividade térmica, reatividade química, baixo módulo de elasticidade, e mecanismo de formação de cavacos.

Para se ter sucesso na usinagem de titânio, deve-se levar em conta diversas propriedades intrínsecas deste material.

**a) baixa condutividade térmica** – Donachie (2000) afirma que o titânio é um péssimo condutor de calor, comparando-se ao aço, ele possui apenas 1/6 da condutividade térmica. Assim, o calor gerado pelo processo de corte não se dissipa rapidamente, fazendo desta maneira com que a maior parte deste calor fique concentrado na aresta de corte. Segundo Ezugwu; Wang (1995) cerca de 80% do calor gerado durante o processo usinagem liga de titânio Ti-6Al-4V, é absorvida pela ferramenta, pois há a impossibilidade que ele seja dissipado rapidamente junto com o cavaco devido à condutividade térmica.

**b) afinidade química** – Conforme citado acima, devido as altas temperaturas próximas a região de corte (acima de 500°C), observa-se grande afinidade química com os materiais utilizados para fabricação das ferramentas de corte. Tal fato favorece o desgaste por difusão (PIRES, 2011). Considerando-se a afirmação de Diniz et al. (2013), a afinidade química é elevada devido ao fato de que a maioria dos materiais de ferramentas de corte contém titânio na sua composição.



**c) baixo módulo de elasticidade (Módulo de Young)** – O titânio possui módulo de elasticidade menor que o do aço e superligas, portanto tem maior elasticidade do que os dois. Pires (2011), cita que o titânio, quando submetido à pressão de corte, deforma-se elasticamente quase duas vezes mais que o aço-carbono, com grande recuperação elástica na superfície de folga da ferramenta. Tal fato resulta no desgaste prematuro do flanco. O aparecimento de trepidação (*Chatter*) também pode ser parcialmente atribuído às altas forças de corte dinâmicas na usinagem de titânio. Isso pode ser até 30% do valor das forças estáticas devido ao processo de cisalhamento termoplástico adiabático pelo qual os cavacos de titânio são formados (EZUGWU; WANG, 1995).

**d) altas pressões de corte** – As forças de corte geradas e registradas durante a usinagem das ligas de titânio são comparáveis àquelas obtidas na usinagem dos aços, portanto, o consumo de energia é semelhante, ou até mesmo inferior Ezugwu; WANG (1995). No entanto tensões muito maiores ocorrem nas imediações da aresta de corte da ferramenta. Isso pode ser atribuído à área de contato cavaco-ferramenta muito pequena na superfície de saída da ferramenta, que é cerca de um terço da área de contato do aço utilizando-se o mesmo avanço e a mesma profundidade de corte (EZUGWU; WANG, 1995).

**e) Mecanismo de formação de cavacos-** Uma das dificuldades encontradas na usinagem do titânio está relacionada à formação do cavaco. Diniz et al., (2013) cita que devido à baixíssima condutividade térmica do titânio, haverá uma concentração de calor, gerada no plano de cisalhamento primário provocado pelo atrito nesta região. Tal calor não se propaga para outras regiões do cavaco, provocando redução da resistência ao cisalhamento, e conseqüentemente elevada deformação. As porções subsequentes, não são tão afetadas pela temperatura, tendo em vista que o calor não se propagou, fazendo com que sofram deformações menos pronunciadas. Este fato influencia para a formação do cavaco segmentado, isto evidencia o problema a característico deste material de reduzir drasticamente a vida da ferramenta.

Sabe-se que o que gera maus resultados na usinabilidade do titânio Ti-6Al-4V, são o conjunto de propriedades citadas acima, mas, Barbosa et al., (2018) também relata que a principal delas é a baixa condutividade térmica, que resulta em baixa dissipação de calor na interface da ferramenta, do cavaco e da peça usinada. A presença de alta temperatura na zona de corte resulta em baixa vida da ferramenta e acelerados mecanismos de desgaste por abrasão, aderência e difusão.

Para TRENT e WRIGHT (2000) os cavacos de titânio são contínuos, mas tipicamente segmentados, sendo que com as ligas de titânio, estas segmentações ficam mais marcadas. Eles também citam que as taxas permitidas de remoção de metal são baixas, apesar das baixas forças da ferramenta.

TRENT e WRIGHT (2000) denominam “ciclo de segmentação” a cada período de cisalhamento causado pela deformação termoplástica, que ocorrem em períodos muito curtos. Há sequência de deformação contínua pelo movimento das discordâncias até que um novo plano de cisalhamento pela deformação termoplástica seja iniciado. A variação cíclica citada, causa variação significativa nas forças de usinagem, provocando lascamento ou quebra da ferramenta. A segmentação do cavaco, típica do titânio, forma bandas estreitas de material intensamente cisalhado e são separadas por bandas mais largas de material menos cisalhado. Essas camadas são denominadas bandas de cisalhamento termoplástico e, respectivamente, bandas de cisalhamento adiabático (TRENT; WRIGHT, 2000).

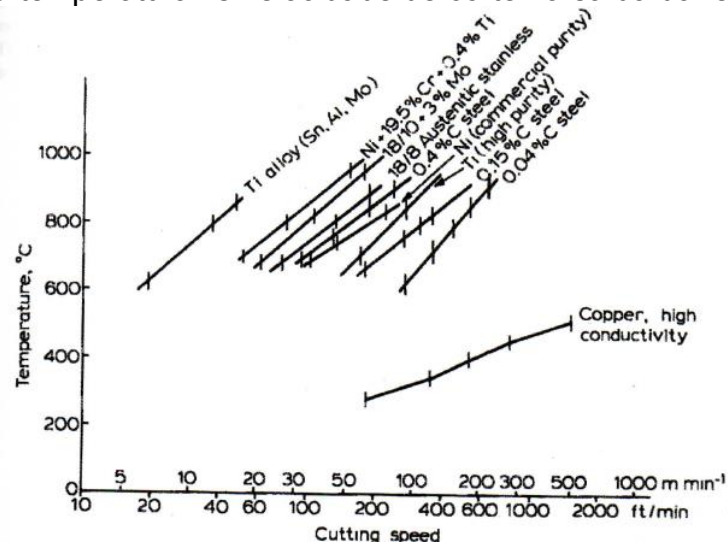
Tais requisitos intrínsecos deste material o torna um dos materiais com pior usinabilidade entre os materiais metálicos.

No entanto, este material está sendo amplamente aplicado na indústria em geral, apesar das dificuldades de usinar, mas suas propriedades o tornam excelentes para determinadas aplicações.

#### **2.1.12 Distribuição da temperatura na usinagem do titânio Ti6-AL-4V.**

Trent e Wright (2000), afirmam que os principais problemas da usinagem do titânio é que a vida útil da ferramenta é curta. Isto ocorre devido as temperaturas altas e a sua distribuição desfavorável nas ferramentas usadas para cortar titânio. As temperaturas na zona de fluxo são muito maiores do que para cortar ferro na mesma velocidade. Por exemplo, a temperatura máxima na face de saída da ferramenta foi de 900°C após o corte de titânio comercialmente puro a 91m/min e foi apenas 650°C após o corte do ferro nesta velocidade sob as condições de corte padrão, Figura 13.

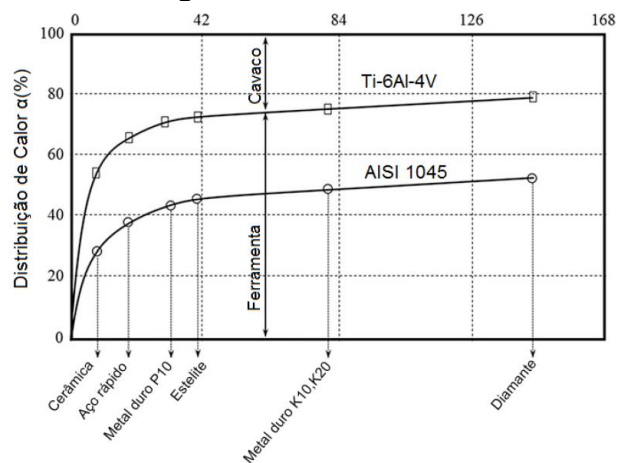
Figura 13 – Máxima temperatura vs velocidade de corte na saída da ferramenta.



Fonte: Adaptado de (TRENT; WRIGHT, 2000)

Sabe-se que altas temperaturas de corte são geradas na usinagem de ligas de titânio e que o fato de as altas temperaturas atuarem próximo à aresta de corte da ferramenta são as principais razões para o rápido desgaste da ferramenta comumente observado. Conforme ilustrado na Figura 14, uma proporção de aproximadamente 80 % do calor gerado durante a usinagem do Ti-6Al-4V não pode ser removido pelo fluxo rápido do cavaco, ficando retido na ferramenta, devido à baixa condutividade térmica das ligas de titânio, que é cerca de 1/6 da dos aços. Cerca de 50% do calor gerado é absorvido pela ferramenta durante a usinagem do aço (EZUGWU; WANG, 1995).

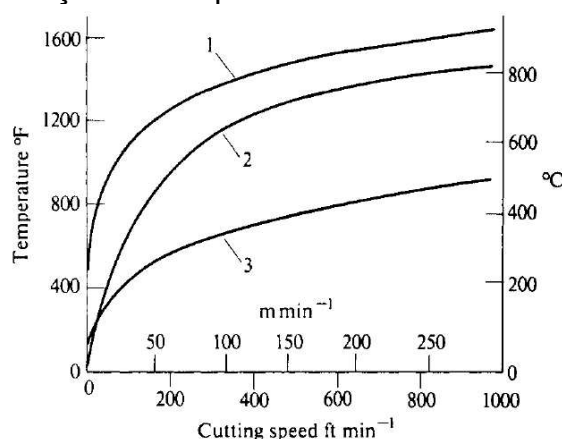
Figura 14 – Comparação da distribuição de calor entre a usinagem de aço 1045 e da liga Ti6-Al-4V.



Fonte: Adaptado de (EZUGWU; WANG, 1995)

A maior dificuldade na usinagem das ligas de titânio, decorre das altíssimas temperaturas de corte experimentado em condições que são comuns para a maioria dos outros materiais. A extensão em que as temperaturas de corte para ligas de titânio excedem as de outros metais é mostrada figura 15 (SHAW, 1984). Pode-se observar que a medida em que se aumenta a velocidade de corte, para todos os materiais, há um aumento considerável na temperatura, evidenciando o fato de que o titânio deve ser usinado em temperaturas mais baixas que os outros materiais, como aço e alumínio.

Figura 15 – Média da variação da temperatura na interface cavaco-ferramenta.



(1) Ligas de titânio, (2) Aço inoxidável e (3) aço AISI 1113

Fonte: Adaptado de (SHAW, 1984)

### 2.1.13 Ferramentas para as ligas de titânio.

A dificuldade de usinar também agrava a vida da ferramenta. Inácio (2017) cita que por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte e menor a resistência mecânica da peça, a ferramenta de corte sofrerá um processo de desgaste que exigirá a sua troca. Assim, a escolha das estratégias, do tipo de ferramenta, dos parâmetros de corte e meios de refrigeração adequados poderão definir melhor vida da ferramenta aliada à uma boa qualidade da superfície usinada, além de proporcionar melhor tempo de usinagem.

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte e menor a resistência mecânica da peça, a ferramenta de corte sofrerá um processo de desgaste que exigirá a sua troca Inácio, (2017). Assim, a escolha das estratégias, do tipo de ferramenta, dos parâmetros de corte e meios de refrigeração

adequados poderão definir melhor vida da ferramenta aliada à uma boa qualidade da superfície usinada, além de proporcionar melhor tempo de usinagem.

De acordo com Inácio (2017) apud Antonioli, (2009) apesar das forças envolvidas na usinagem de titânio estarem na mesma ordem de grandeza das forças requeridas para o corte de aços, a solicitação mecânica na aresta de corte é muito maior. Isto requer velocidades de corte menores a fim de se evitar o excessivo aumento de temperatura na região de corte.

Em relação ao material da ferramenta, convém observar que para a usinagem de ligas de titânio, o ideal é a utilização de ferramentas de metal duro sem cobertura devido à afinidade química entre o material da peça, da ferramenta e dos constituintes do recobrimento como TiN, TiCN e TiAlN (WANG e ZANG 1988 apud DINIZ; MARCONDES; COPPINI, (2013).

De acordo com Pires (2011), atualmente os fabricantes sabem que, com os procedimentos adequados, o titânio pode ser usinado com técnicas não muito diferentes daquelas utilizadas para o aço inox austenítico.

De qualquer forma, as condições de usinagem deste material ainda não foram suficientemente estudadas, apesar de diversos estudos que já foram realizados para torneamento, para fresamento, utilizando-se diversas estratégias e fluídos de corte variados, visando conseguir um padrão ideal relacionados à desgaste de ferramentas, parâmetros de corte e integridade superficial. Também, outro ponto está relacionado à integridade superficial, que ainda requer muitas pesquisas.

## **Fluidos de corte**

A indústria em geral que se utiliza de processos de usinagem com remoção de cavaco, vem sofrendo uma grande pressão dos órgãos ambientais para minimizar a utilização de fluidos de corte. Sabe-se que tais fluidos são extremamente prejudiciais ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores desta área.

No entanto, sua exclusão do processo pode dificultar a realização de determinadas usinagens de algumas ligas que geram calor excessivo durante a remoção do cavaco, pois sabe-se que o atrito entre a ferramenta de corte e a peça, acrescentando-se a interface da superfície de saída de corte com o cavaco, tendem a gerar calor.

Desde 1894, quando F. W. Taylor mediu a influência do fluido de corte, (FERRARESI, 1977), foi constatado que o fluido de corte pode ter a função de

proporcionar melhorias no processo de corte, sendo elas de caráter funcional e de caráter econômico.

Entre as melhorias de caráter funcionais, Ferraresi (1977) cita:

- a) Redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco;
- b) Expulsão do cavaco da região de corte;
- c) Refrigeração da ferramenta;
- d) Refrigeração da peça em usinagem
- e) Refrigeração da máquina-ferramenta.

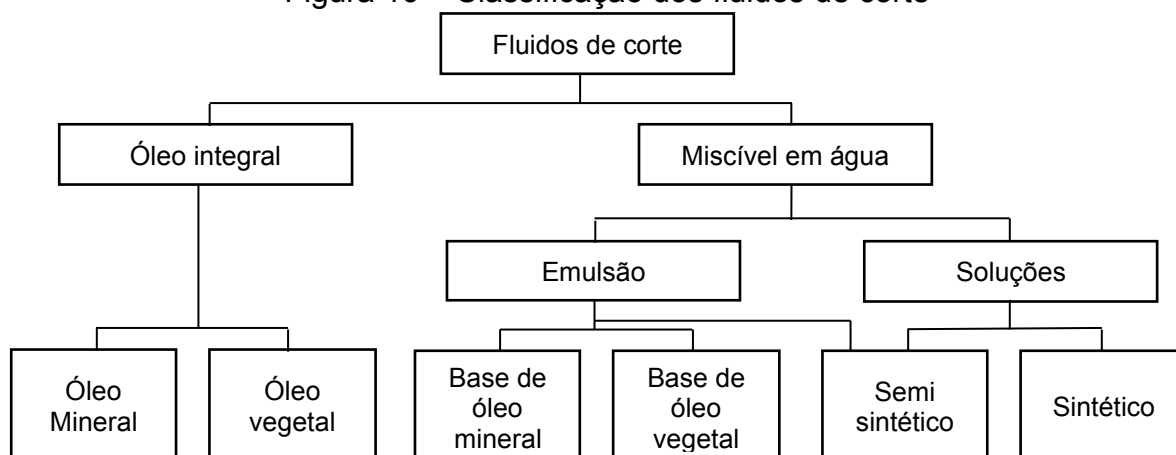
Entre as melhorias de caráter econômico, Ferraresi(1977) cita:

- a) Redução do consumo de energia de corte;
- b) Redução do custo da ferramenta na operação;
- c) Impedimento da corrosão da peça na usinagem.

Em Çakir et al. (2007), é citado que o fluido de corte pode ter três funções: efeito de refrigeração, efeito de lubrificação e retirada dos cavacos formados da zona de corte. Diniz et al., (2013) ressalta a proteção contra corrosão.

Os diversos tipos de fluido de corte podem ser classificados conforme a Figura 16.

Figura 16 – Classificação dos fluidos de corte



Fonte: Adaptado de (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013)

As emulsões compõem-se de pequena porcentagem de um concentrado de óleo emulsificável com água, não é uma solução, mas sim água com partículas de óleo dispersas em seu interior DINIZ et al., (2013).

Os óleos integrais basicamente são óleos minerais ou vegetais puros ou com aditivos, esses óleos puros têm calor específico de cerca da metade da água, sua

capacidade de refrigeração é baixa, porém suas qualidades de lubrificação são bem melhores, o que resultam em menor quantidade de calor gerado DINIZ et al., (2013).

Micro emulsões (fluido semissintéticos) – são também formadores de emulsões, caracterizados por possuírem de 5% a 50% de óleo mineral, aditivos e compostos químicos que se dissolvem na água. Propicia ao fluido uma coloração menos leitosa e mais transparente DINIZ et al., (2013).

Soluções químicas (fluidos sintéticos) – as soluções são compostos monofásicos, dissolvidas completamente na água. Caracterizam-se por serem livres de óleo mineral, formam soluções transparentes DINIZ et al., (2013).

Para a seleção adequada do fluido de corte os principais fatores que deverão ser considerados, de acordo com DINIZ et al., (2013), são:

**a) material da peça-** O alumínio, latão, bronze, cobre e magnésio devem utilizar óleos inativos sem enxofre. O magnésio e suas ligas não podem utilizar fluidos com água devido ao risco de combustão, causada pela liberação de hidrogênio. O níquel e suas ligas usam-se emulsões. O aço carbono qualquer tipo de óleo é adequado.

**b) condições de usinagem-** Utiliza-se óleo puro quando as condições de usinagem são severas, os fluidos aquosos são preferidos quando as condições de usinagem são mais brandas e necessita-se da refrigeração.

**c) operações de usinagem-** Em operações lentas e pesadas, utilizar óleos ativos e viscosos, que aderem a ferramenta. Em operações mais rápidas e leves, utilizar os fluidos aquosos com aditivos.

**d) material da ferramenta-** Ferramentas de aço rápido necessitam de fluidos de corte aquosos com aditivos antiferruginosos. O metal duro suporta qualquer tipo de fluido de corte e a escolha daquele mais adequado deve ser baseada nos outros critérios citados anteriormente. Nas ferramentas cerâmicas à base de óxidos não devem ser utilizados os fluidos de corte, para evitar a variação de temperatura, que danificaria este tipo de ferramenta. No entanto, há as classes cerâmicas *Wisker* e a Sialon que foram desenvolvidas para usinagem de ligas à base de Ni e de superligas resistentes ao calor, que permitem o uso de refrigeração. As classes *Whisker* são reforçadas com carboneto de silício (SiCw), as classes Sialon (SiAlON) combinam a resistência de uma rede autorreforçada de nitreto de silício com estabilidade química aprimorada.

Neste estudo, é utilizado o fluido de corte com a função de lubrificação, visando minimizar sua utilização, alinhando-se com as questões ambientais, e verificar se esta função favorecerá melhores valores de rugosidade.

Foi escolhido o Super Fluido 3 empresa Quimatic-Tapmatic por ser um fluido sintético de base vegetal, desenvolvido para usinagem de metais de elevada dureza e operações pesadas em geral. É um lubrificante ecológico por não possuir na sua composição metais pesados, solventes tóxicos e voláteis nocivos, além disto, é não inflamável Foi desenvolvido para ser fluido lubrificante em operações de difícil usinagem , como aço inox e titânio (TAPMATIC QUIMATIC, 2020).

Possui como vantagens: A atração iônica (*Molecular Edge*) – assegura ótima lubrificação no ponto de cisalhamento.

- a) prolonga a vida útil das ferramentas.
- b) não evapora. Pode ser usado em reservatórios de máquinas operatrizes que trabalham com fluidos de corte recirculantes.
- c) produto formulado originalmente para atender especificações técnicas da indústria aeroespacial, na usinagem de metais e ligas especiais, de elevada dureza, como monel etc.

As principais aplicações são:

- a) indicado para operações pesadas de usinagem, como rosqueamento, brochamento, mandrilhamento, repuxo, furação; ou outras operações de usinagem pesada ou para usinagem de metais de elevada dureza.
- b) para rosqueadeiras, furadeiras, brochadeiras, mandrilhadeiras, repuxadeiras, tornos; ou outras máquinas operatrizes que trabalham com adição direta do fluido na ferramenta ou que têm sistemas de recirculação.

A tabela 4 ilustra a composição química deste lubrificante.

#### **2.1.14 Métodos de aplicação dos fluídos de corte.**

Os métodos típicos de aplicação dos fluídos de corte são três:

- Jorro de baixa pressão;
- Sistema de alta pressão (até 63bar);
- Atomização (de 1 a 5 bar).

##### **Jorro de baixa pressão**



É o sistema mais utilizado pela sua simplicidade, pois não exige equipamento complexo.

#### **Sistema de alta pressão (até 63bar)**

É um sistema mais caro de ser implementado devido sua complexidade. Neste caso, o fluído é bombeado através do porta ferramentas, sendo que o jato é aplicado sobre a superfície de saída da ferramenta, na direção oposta a saída do cavaco, promovendo a quebra do mesmo.

#### **Atomização (de 1 a 5 bar).**

Também chamado de MQF – Mínima Quantidade de Fluído, necessita de um reservatório com boa capacidade de armazenamento. Fornece vantagens em relação ao jorro devido o maior poder de penetração e velocidade do fluído, (MACHADO et al., 2009).

#### **Fresamento.**

O fresamento pode ser definido como o processo de usinagem que utiliza uma ferramenta cilíndrica, rotativa, com arestas cortantes no topo e ao longo de parte de seu comprimento, girando com rotação calculada com base na velocidade de corte -  $v_c$  (m/min) e no diâmetro nominal -  $D_c$  da ferramenta (mm) produzindo o movimento chamado de movimento de corte (Diniz, Marcondes e Coppini 2013), o material a ser usinado estará fixado na mesa da máquina por meio de dispositivos de fixação, na maioria das vezes padronizados. O movimento concomitante entre ferramenta e peça acontecerá com velocidade de avanço -  $v_f$  (mm/min). O movimento de avanço no fresamento é contínuo, assim, o movimento de corte mais o  $v_f$ , resultam no que (Diniz, Marcondes e Coppini 2013) define como movimento efetivo de corte.

Os tipos fundamentais de fresamento, podem ser classificados de acordo com a posição do eixo árvore em relação a mesa, sendo: o fresamento horizontal quando o eixo da ferramenta estiver paralelo à mesa, o fresamento vertical quando o eixo da ferramenta estiver perpendicular à mesa e o inclinado quando a o eixo da ferramenta formar ângulos diferentes de  $90^\circ$  e de  $180^\circ$  em relação à mesa.

O fresamento, tanto o frontal como o tangencial, podem ser concordantes ou discordantes, sendo que se pode comparar os dois levando-se em consideração a força de fixação da peça, a rugosidade, a folga do fuso da mesa e as entradas da ferramenta na peça, conforme o quadro 3.

Quadro 3 - Comparativo entre corte concordante e discordante

	<b>Corte concordante</b>	<b>Corte discordante</b>
<b>Força de fixação</b>	No início tende a comprimir a peça sobre a mesa	No início tende a afastar a fresa da peça, na final tende a arrancar a peça da mesa.
<b>Rugosidade</b>	Tendo em vista que a componente vertical sempre tem o mesmo sentido, e que a aresta de corte ao penetrar na peça o faz com a espessura do cavaco – $h_d$ máxima e prossegue até atingir um valor $h_d = \text{zero}$ , eliminando-se as folgas, o acabamento superficial será melhor.	As variações provocadas pela alternância de forças provocam vibrações que resultarão num acabamento superficial ruim.
<b>Folga no fuso</b>	A componente horizontal da força de usinagem possui o mesmo sentido do avanço da mesa, neste caso o sistema fuso/porca têm que fazer força no sentido oposto à da força de usinagem. Esta força tem módulo variável devido a variação na espessura de corte, o que pode gerar vibrações. Este inconveniente pode ser sanado com o fuso de esferas recirculantes.	A componente horizontal da força tem sentido contrário ao do avanço da mesa, o que provoca alterações no movimento da fresadora.
<b>Entrada da ferramenta</b>	Quando a ferramenta entra na peça, a aresta cortante penetra com a $h_d$ máxima, produzindo um cavaco em forma de virgula, mas começa com $h_d$ máxima e vai até $h_d$ mínima igual a zero. Isto proporciona impacto maior da aresta cortante na peça, assim se o material a usinar for muito duro não é recomendado.	Quando a ferramenta entra na peça, a aresta cortante penetra com $h_d$ mínima igual a zero e vai até a $h_d$ máxima. Isto proporciona menor vida a ferramenta devido geração de calor.
<b>Recomendações</b>	Apenas para máquinas que possuam fuso de esferas recirculantes.	Convencionais que possuam folga no fuso e materiais temperados ou muito duros.

Fonte: elaborado e adaptado pelo autor de DINIZ; MARCONDES; COPPINI (2013)

Diniz et al., (2013) classificam o fresamento também de acordo com a disposição dos dentes ativos da fresa, como: Fresamento tangencial ou fresamento frontal:

**a) fresamento tangencial:** operações nas quais os dentes ativos da fresa estão na superfície cilíndrica da ferramenta- o eixo da fresa é paralelo à

superfície que está sendo gerada. As fresas são chamadas de fresas cilíndricas ou tangenciais.

**b) fresamento frontal:** operações nas quais os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta – o eixo da fresa é perpendicular à superfície que está sendo gerada. As fresa são chamadas de fresas frontais ou de topo.

### **Planejamento fatorial.**

Um dos maiores problemas no desenvolvimento de novos produtos e processos, pode ser definir entre várias informações, quais seriam as melhores, ou mais vantajosas para melhorar a qualidade do produto, ou para aumentar a sua produtividade. Ao longo do tempo ferramentas estatística foram sendo aplicadas e desenvolvidas para ajudar no processo de análise do problema e tomada de decisão.

O planejamento de experimentos DOE- *Design off Experiments*, tem sido usado, frequentemente, para se planejar um determinado experimento o qual permite definir dados baseados em uma metodologia. A coleta e organização dos dados para o experimento deve garantir que o processo tenha o melhor rendimento possível, e que haja segurança, ou mínima diferença dos resultados empíricos em relação aos dados da pesquisa.

Para tomada de decisão quando se deve considerar muitas variáveis, e quais delas tenham mais impacto no processo, utiliza-se o planejamento fatorial.

Um planejamento fatorial é aquele no qual se investigam todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores em cada ensaio (VILANI 2006 apud Box *et al.*, 1978).

Há técnicas de planejamento de experimentos em que se comparam os fatores de diversas formas, dependendo dos objetivos do experimento. Estas técnicas podem ser: Fator único em 2 níveis, Fator único em mais de dois níveis, Fator único e blocos, Fatorial 2K, Fatorial fracionado, entre outros.

Definido a técnica de planejamento, determinam-se as variáveis de teste e seus níveis, a variável de resposta, as condições para realização do teste e aleatorização, o número de testes, a medição dos resultados e como será medido.

Coleman; Montgomery (1993) propõem as seguintes etapas para o desenvolvimento de um Planejamento de Experimentos na Indústria:

- a) Caracterização do problema

- b) Escolha dos fatores de influência e níveis
- c) Seleção das variáveis de resposta
- d) Determinação de um modelo de planejamento de experimento
- e) Condução do experimento
- f) Análise dos dados
- g) Conclusões e recomendações

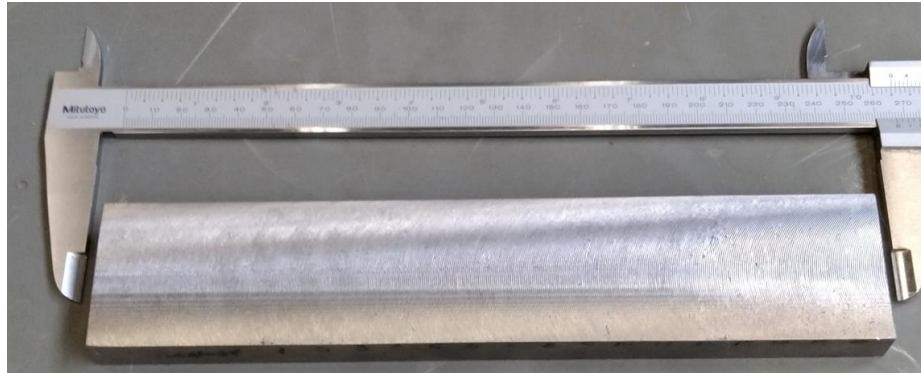
Neste estudo será utilizado estas etapas para desenvolvimento da pesquisa.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

O material utilizado neste estudo foi a liga de titânio Ti-6Al-4V devido ao fato de ser um material que tem sua utilização em maior crescimento na indústria, principalmente, em aplicações aeroespaciais. É considerada uma das ligas de pior usinabilidade, exigindo estudos sucessivos de pesquisadores para entender como melhor usiná-lo. A composição química encontra-se na Tabela 1.

Para viabilizar os ensaios, obteve-se um corpo de prova com dimensões 17x52x250mm, ilustrado na Figura 17, que foi dividido em 40 ensaios como mostrado na Figura 18, sendo 20 para usinagem a seco do lado de cima do corpo de prova no sentido transversal e 20 do lado de baixo do corpo de prova para usinagem com lubrificante Superfluido 3 que é caracterizado por ser um fluido de corte sintético da empresa Quimatic-Tapmatic. A Tabela 4 apresenta as principais propriedades do lubrificante utilizado.

Figura 17 – Corpo de prova



Fonte: Próprio autor

Figura 18 – Corpo de prova usinado



Fonte: Próprio autor

Tabela 4 - Características e propriedades do Super fluido 3.

Aspecto	Líquido viscoso límpido verde
Densidade a 25°C (g/mL)	0.88 - 0.91
Odor	Característica, leve
Teste de corrosão em cavacos de ferro	Sem corrosão após 2 horas
Viscosidade cSt, 25°C	20 - 35
Índice de acidez, mg KOH/g	10 - 20

Fonte: (TAPMATIC QUIMATIC, 2020)

Utilizou-se fresa topo de diâmetro de 10 mm com raio de canto 0,4mm. O conjunto ferramenta/suporte é composto de uma pastilha de metal duro (KYOCERA-COMPONENTES, 2020) código BDMT110304ER-JT PR1535, montada no suporte do mesmo fabricante, código MEC10-S10-11. A Figura 19 ilustra o inserto e o suporte.

Figura 19 - Conjunto Suporte - Pastilha



Fonte: Próprio autor

Os parâmetros velocidade de corte  $V_c$  (m/min) Tabela 5, e avanço de corte  $f$ (mm/rot) foram estipulados obedecendo-se os limites máximos e mínimos recomendados pelo fabricante como ilustra a Figura 20 e Tabela 6, estabelecendo-se um valor intermediário como efeito experimental. Observa-se que será usado sempre  $f$  para representar o avanço por se tratar de ferramenta com apenas um corte. A profundidade de corte  $a_p$  (mm) seguiu padrões utilizados para acabamento, estabelecendo-se 0,2mm como valor mínimo e o máximo de 0,5mm. O valor máximo é um pouco maior do que o raio de canto e o valor médio foi de 0,35mm, conforme a Tabela 7.

Figura 20 - Especificações do fabricante da pastilha.

TLC00323		PR1535			
P	M	K	N	S	H
$V_c = 120$ ( 90 - 150 ) m/min 390 ( 300 - 490 ) sfm					
$f = 0.08$ ( 0.06 - 0.10 ) mm/t .003 ( .002 - .004 ) ipt					

Fonte:(KYOCERA-COMPONENTES, 2020).

Tabela 5 – Velocidade de corte de corte ( $v_c$ )

	Limite mínimo	Média	Limite máximo
Velocidade de corte $V_c$ [m/min]	90	120	150

Fonte: Dados dos autores

Tabela 6 - Avanço de corte ( $f_z$ )

	Limite mínimo	Média	Limite máximo
Avanço de corte $f_z$ [mm/dente]	0,06	0,08	0,1

Fonte: Dados dos autores

Tabela 7 - Profundidade de corte ( $a_p$ )

	Limite mínimo	Média	Limite máximo
Profundidade de corte $a_p$ [mm]	0,2	0,35	0,5

Fonte: Dados dos autores

A usinagem foi realizada em um centro de usinagem ROMI, modelo D600 e comando SINUMERIK 828D, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Centro de usinagem ROMI D600 Comando Siemens 828D.



Fonte: Próprio autor

A máquina é classificada com centro de usinagem vertical, devido ao eixo árvore ser perpendicular à mesa. Sua estrutura é conhecida como do tipo C, pois o formato base-coluna-cabeçote se assemelha à letra C. As principais características podem ser observadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Características do Centro de usinagem ROMI D600

Curso da mesa superior para o eixo X (mm)	600
Curso da mesa inferior para o eixo Y (mm)	530
Curso do cabeçote para o eixo Z (mm)	580
Potência total instalada (KVA)	30
Capacidade de ferramentas (unidades)	20
Avanço rápido (m/min)	30
Faixa de rotação do eixo árvore (rpm)	8 a 8000

Fonte: Próprio autor

A análise das pastilhas foi realizada em um microscópio da Leica modelo S6D, conforme figura 22.

Figura 22 – Microscópio Leica S6D.



Fonte: Próprio autor

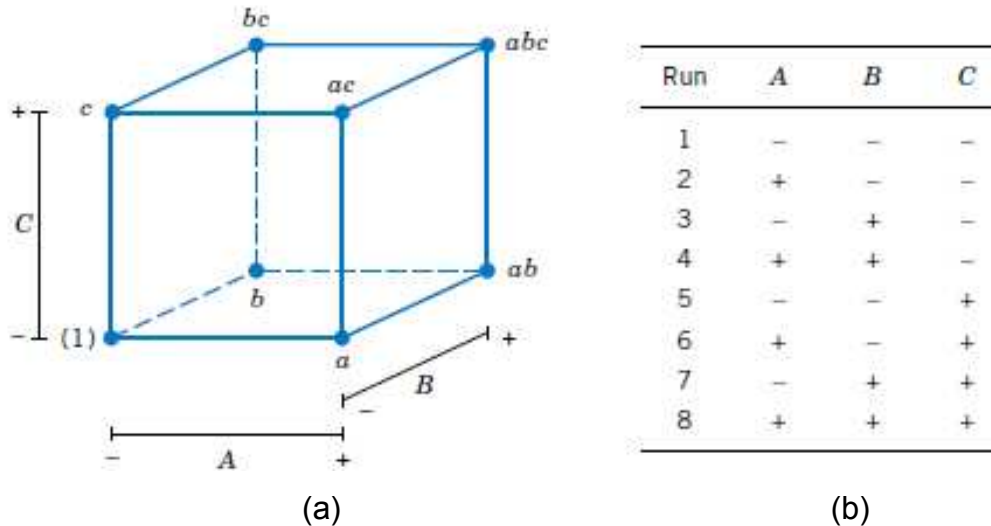


## Realização dos ensaios

A partir dos levantamentos pesquisados, foi realizado o planejamento conforme listado na Tabela 9 para inserção no programa CNC e usinagem. Para o planejamento escolheu-se o tipo  $2^3$  com 2 pontos centrais, sendo 10 experimentos com mais 10 réplicas, totalizando ao todo 20 ensaios para usinagem a seco e mais 20 para usinagem com lubrificante. As variáveis  $V_c$ ,  $f_z$  e  $a_p$  foram escolhidas como independentes e as variáveis de rugosidade foram selecionadas como variáveis dependentes.

Montgomery; Runger (2003) explicam que o planejamento experimental  $2^3$  é representado por um cubo conforme mostrado Figura 22 (a) e que há oito execuções de tratamento. Para este estudo tem-se 3 fatores de controle em 2 níveis, representados por +1 e -1, resultando em 8 combinações Figura 23 (b). Os dois pontos centrais correspondem às médias dos valores das variáveis independentes. Os máximos e mínimos podem ser vistos nas Tabelas 5, 6 e 7, que representam as variáveis independentes.

Figura 23 – Cubo e Matriz de Planejamento.



Fonte: (MONTGOMERY; RUNGER, 2003)

Tabela 9 - Planejamento dos dados de corte para ensaio a seco e com óleo para rugosidade 2D e 3D.

Número do ensaio	Rotação n [rpm]	Velocidade de avanço $v_f$ [mm/min]	Velocidade de corte $v_c$ [m/min]	Avanço por corte $f_z$ [mm/dente]	Profundidade de corte $a_p$ [mm]
1	2865	172	90	0,06	0,2
2	4775	286	150	0,06	0,2
3	2865	286	90	0,1	0,2
4	4775	477	150	0,1	0,2
5	2865	172	90	0,06	0,5
6	4775	286	150	0,06	0,5
7	2865	286	90	0,1	0,5
8	4775	477	150	0,1	0,5
9	3820	306	120	0,08	0,35
10	3820	306	120	0,08	0,35
11	2865	172	90	0,06	0,2
12	4775	286	150	0,06	0,2
13	2865	286	90	0,1	0,2
14	4775	477	150	0,1	0,2
15	2865	172	90	0,06	0,5
16	4775	286	150	0,06	0,5
17	2865	286	90	0,1	0,5
18	4775	477	150	0,1	0,5
19	3820	306	120	0,08	0,35
20	3820	306	120	0,08	0,35

Fonte: Próprio autor

As variáveis Tabela  $V_c$  e  $f$  da Tabela 9, foram estabelecidas a partir das recomendações do fabricante da pastilha, e serviram de parâmetro para cálculo da rotação  $n$  e avanço de corte  $v_f$ , conforme as equações 1 e 2.

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d} \quad (1)$$

$$v_f = n \cdot f_z \cdot z \quad (2)$$

Durante a usinagem, foi utilizada uma caixa com 8 pastilhas, apesar de cada pastilha possuir duas arestas cortantes, utilizou-se apenas um lado de corte, totalizando 5 corpos de prova usinados para cada lado do inserto, a distribuição ficou conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Distribuição das arestas cortantes por ensaio.

Ensaio a seco	
Número do inserto	Número do ensaio
F1	1 à 6
F2	7 à 11
F3	12 à 15
F4	16 à 20

Ensaio com fluído	
Número do inserto	Número do ensaio
F5	1 à 6
F6	7 à 11
F7	12 à 15
F8	16 à 20

Fonte: Próprio autor

Após a usinagem de cada corpo de prova, as pastilhas foram observadas por meio de microscópio. Foi possível notar a formação de APC- Aresta Postiça de corte no final da usinagem com a pastilha F4, Figura 24, usinagem sem fluído, no entanto os valores de rugosidade não sofreram alteração importantes.

Figura 24 - Pastilha F4.



Fonte: Próprio autor

Após a usinagem, a medição da rugosidade foi realizada no rugosímetro SURFCOM, Figura 25, fabricação ZEISS, modelo 1900SD2, utilizando-se o software *Roughness Measurement V14.04*. Executou-se três medições para cada ensaio de usinagem.

Figura 25 - Rugosímetro SURFCOM.



Fonte: Próprio autor

Fang; Pai (2018) afirma que entre os principais parâmetros para avaliar a rugosidade das superfícies são a rugosidade média  $R_a$  e o parâmetro  $R_q$  acompanhado da rugosidade total  $R_{max}$ .

Assim, foi configurado os parâmetros de medição conforme a Tabela 11. Os parâmetros para medição escolhidos foram a rugosidade média  $R_a$  a rugosidade total  $R_t$  e o parâmetro  $R_q$ . Para o cálculo estatístico utilizou-se o software Statistica, versão de avaliação, da empresa TIBCO Software Inc.

Tabela 11 - Parâmetros para medição da rugosidade

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Comprimento de medição (mm)	4
<i>Cut-off</i> (mm)	0,8
Velocidade de medição (mm/seg)	0,15

Fonte: Próprio autor

Após a obtenção das medições 2D, utilizou-se um interferômetro Taylor Hobson/ Talysurf CCI Lite ilustrado na Figura 26 com o software TalyMap Gold v. 6.2 para a obtenção das imagens 3D dos parâmetros  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$  e  $S_a$  dos mesmos ensaios medidos em 2D.

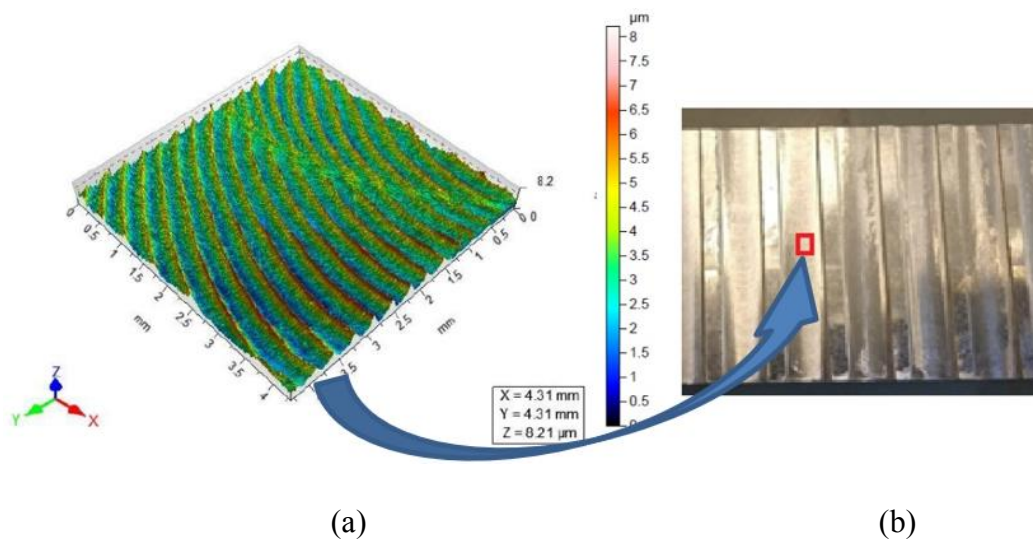
Figura 26 - Interferômetro Taylor Hobson/ Talysurf CCI Lite.



Fonte: Próprio autor

Adotou-se um cut-off de 0,8mm e uma área de leitura de 4,3mm<sup>2</sup> no centro da amostra, conforme ilustra a Figura 27 (a) representa a topologia da superfície e (b) representa a posição de medição.

Figura 27 - Área e posição de medição do interferômetro.



(a)

(b)

Fonte: Próprio autor

#### 4. RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados das medições das rugosidades 2D e 3D, as análises da usinagem e os resultados das funções para predição de cada uma.

## Resultados das rugosidades 2D

Buscando-se analisar a influência de cada um dos parâmetros de corte utilizados na rugosidade  $R_a$ ,  $R_t$  e  $R_q$ , bem como os resultados das interações entre eles nos resultados finais, gerou-se os gráficos de Pareto com intervalo de confiança de 95%.

### 4.1.1 Usinagem sem lubrificação.

Os valores da média das rugosidades obtidas, encontram-se na Tabela 12 e serão os valores de rugosidade 2D inseridos no software de estatística para obtenção das análises da usinagem por meio da geração dos gráficos de Pareto e das superfícies de resposta, que darão origem as funções estatísticas de predição da rugosidade.

Tabela 12 - Valores médios das rugosidades 2D usinagem a seco.

Número do ensaio	Rugosidade média $R_a$	Rugosidade $R_t$	Rugosidade $R_q$
1	0,106	1,032	0,130
2	0,084	0,708	0,107
3	0,098	1,084	0,123
4	0,082	0,772	0,114
5	0,056	0,807	0,080
6	0,136	1,837	0,148
7	0,183	1,490	0,253
8	0,105	1,449	0,165
9	0,077	0,955	0,103
10	0,078	1,122	0,097
11	0,099	0,904	0,125
12	0,119	0,809	0,154
13	0,107	0,983	0,149
14	0,142	1,277	0,176
15	0,073	0,862	0,090
16	0,105	1,128	0,130
17	0,181	1,731	0,236
18	0,149	1,211	0,122
19	0,093	0,835	0,136
20	0,100	0,851	0,125

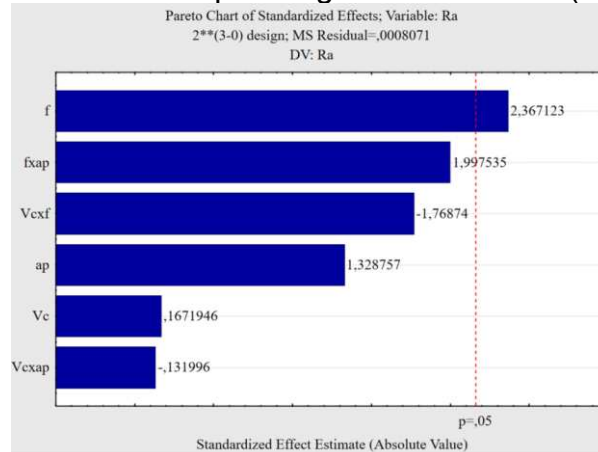
Fonte: Próprio autor

Para a rugosidade média  $R_a$ , pode-se notar na Figura 28, a influência do avanço de corte na usinagem a seco, com 95% de confiança. Também é possível observar

que a interação entre  $f$  e  $a_p$  foi o segundo parâmetro mais influente nos resultados de  $R_a$  para usinagem a seco.

Dinz et al., (2013), cita que o aumento do avanço causa o crescimento da rugosidade da peça, o que é comprovado em operações de acabamento como a deste ensaio.

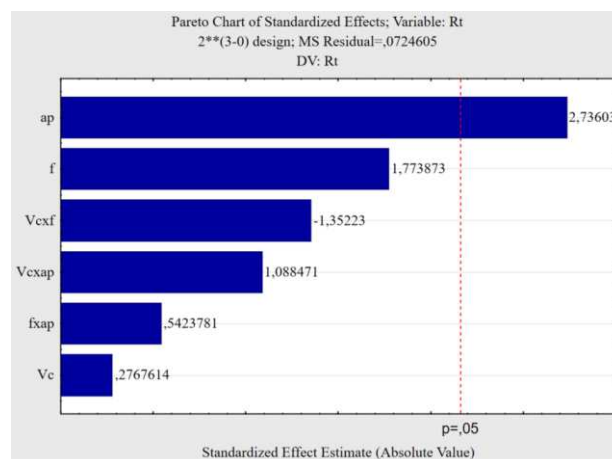
Figura 28 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D -  $R_a$  (usinagem a seco)



Fonte: Próprio autor

Para a rugosidade  $R_t$ , pode-se afirmar com 95% de confiança que os valores da profundidade de corte  $a_p$  influenciam consideravelmente nos valores de  $R_t$  para usinagem a seco. Também é possível observar na Figura 29 que o avanço foi o segundo parâmetro mais influente nos resultados de  $R_t$ .

Figura 29 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D -  $R_t$  (usinagem a seco)

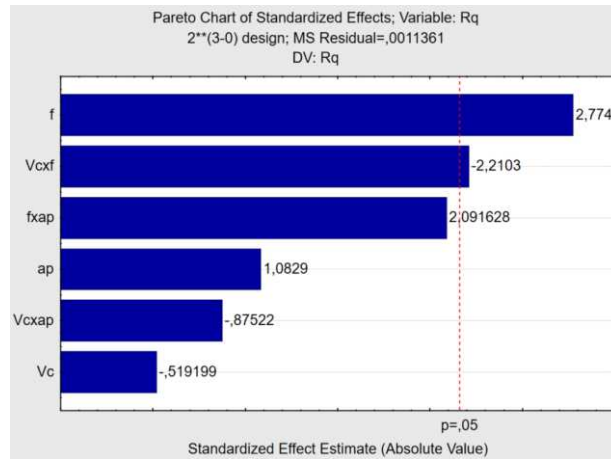


Fonte: Próprio autor

Para a rugosidade  $R_q$ , pode-se afirmar com 95% de confiança que os valores do avanço de corte  $f_z$  e a interação da velocidade de corte  $v_c$  com o avanço  $f$  são os

parâmetros que mais influenciam  $R_q$ . Também é possível observar a interação  $f \times a_p$  também tem grande influência nos resultados de  $R_q$ . A Figura 30 ilustra o gráfico.

Figura 30 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D -  $R_q$  (usinagem a seco)

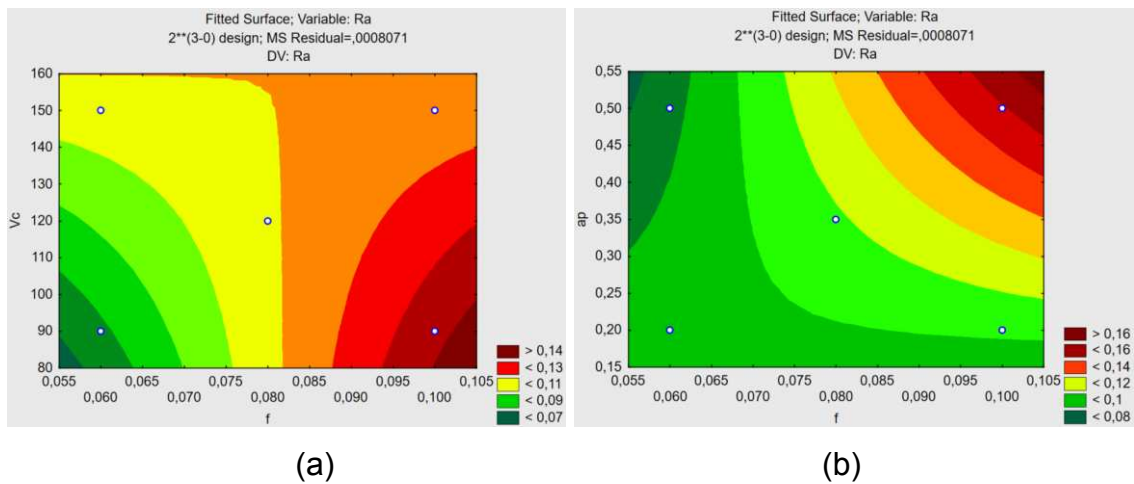


Fonte: Próprio autor

Por meio do software Statistica foi possível a construção das superfícies de resposta para as interações. A Figura 31 ilustra as superfícies de resposta obtidas para a variável  $R_a$ . Nota-se que a menor rugosidade é obtida com menores avanços. Em (a) ilustra-se a interação entre  $f$  e  $v_c$ , neste caso, para valores de  $v_c$  de 80 a 140m/min e  $f$  entre 0,055 e 0,075mm/rot, obtém-se valores de  $R_a$  de até 0,090 $\mu$ m. Em (b) mostra-se a interação entre  $f_z$  e  $a_p$ , sendo que para valores de  $a_p$  entre 0,15 e 0,55mm e  $f$  entre 0,055 e 0,105mm/rot, obtém-se valores de  $R_a$  até 0,100  $\mu$ m.



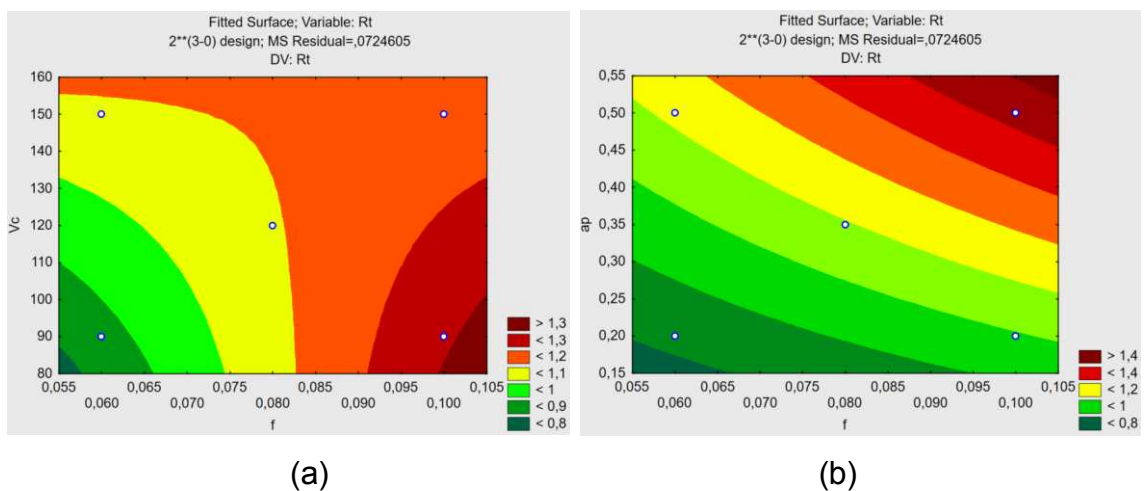
Figura 31 - Resultados das interações para  $R_a$  – 2D (a)  $f \times v_c$ . (b)  $f \times a_p$  na usinagem a seco.



Fonte: Próprio autor

A Figura 32 ilustra as superfícies de resposta obtidas para a variável  $R_t$ . Em (a) nota-se que a menor rugosidade é obtida com menores avanços, sendo que entre 80 a 130m/min e entre 0,055 e 0,075mm/rot, obtém-se valores de  $R_t$  menores do que 0,075  $\mu\text{m}$ . Em (b) um menor avanço e uma menor profundidade de corte indica também uma menor rugosidade, sendo que para valores de  $a_p$  entre 0,15 e 0,50mm e  $f$  entre 0,055 e 0,105mm/rot, obtém-se valores de  $R_a$  até 0,100  $\mu\text{m}$ .

Figura 32 - Resultados das interações para  $R_t$  – 2D (a)  $f \times v_c$ . (b)  $f \times a_p$  na usinagem a seco.

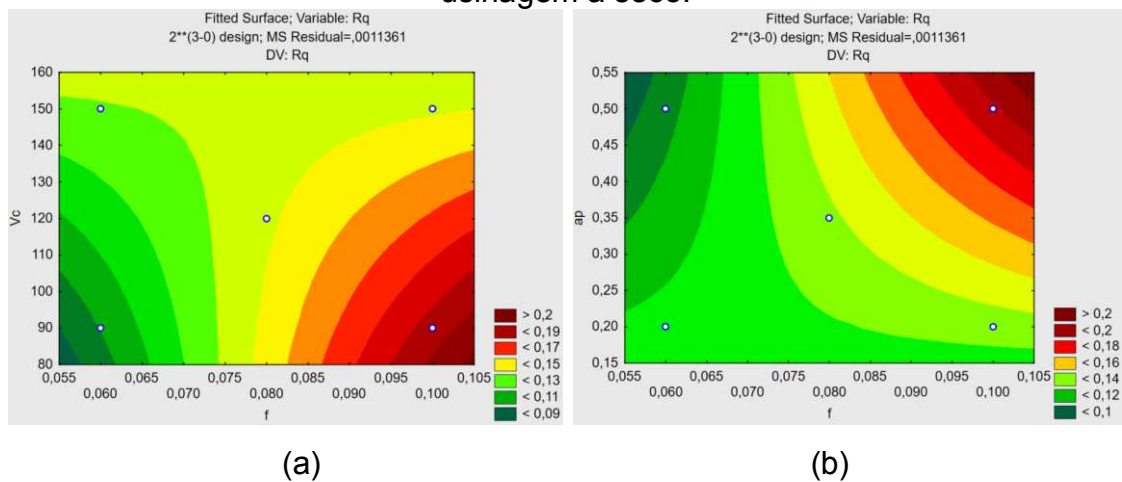


Fonte: Próprio autor

A Figura 33 mostra as superfícies de resposta obtidas para a variável  $R_q$ . Em (a) nota-se que a menor rugosidade é obtida com menores avanços, sendo que para

valores de  $v_c$  entre 80 e 120m/min e  $f$  entre 0,055 e 0,075mm/rot, obtém-se valores de  $R_a$  até 0,110  $\mu\text{m}$ . Em (b) um menor avanço indica também uma menor rugosidade, sendo que para valores de  $a_p$  entre 0,35 e 0,55mm e  $f$  entre 0,055 e 0,065mm/rot, obtém-se valores de  $R_a$  até 0,120 $\mu\text{m}$ .

Figura 33 - Resultados das interações para  $R_q$  – 2D (a)  $f_z \times v_c$ . (b)  $f_z \times a_p$  na usinagem a seco.



Fonte: Próprio autor

#### 4.1.2 Usinagem com óleo lubrificante

Os valores da média das rugosidades 2D obtidas na usinagem com óleo lubrificante, encontram-se na Tabela 12 e serão os valores de rugosidade 2D inseridos no software de estatística para obtenção das análises da usinagem por meio da geração dos gráficos de Pareto e das superfícies de resposta, que darão origem as funções estatísticas de predição da rugosidade.

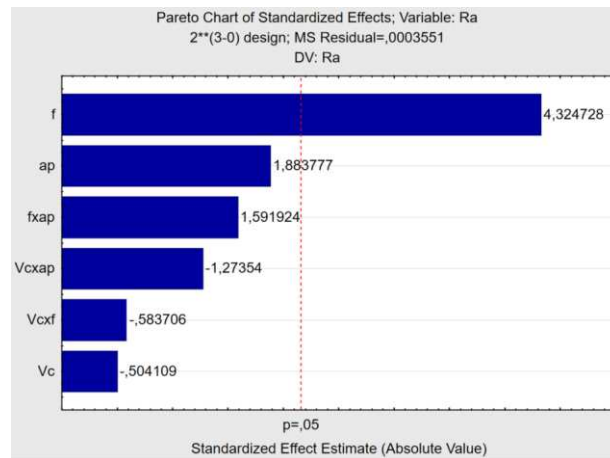
Tabela 13 - Valores médios das rugosidades 2D usinagem a óleo.

Número do ensaio	Rugosidade Média $R_a$	Rugosidade $R_t$	Rugosidade $R_q$
1	0,068	0,743	0,232
2	0,067	0,636	0,094
3	0,077	0,799	0,101
4	0,090	1,095	0,122
5	0,091	0,835	0,162
6	0,079	0,795	0,109
7	0,147	1,543	0,191
8	0,146	1,237	0,204
9	0,129	0,777	0,149
10	0,099	1,029	0,135
11	0,066	0,647	0,086
12	0,100	0,789	0,128
13	0,137	1,129	0,169
14	0,093	1,052	0,111
15	0,076	0,686	0,097
16	0,061	0,763	0,103
17	0,136	1,244	0,180
18	0,095	1,637	0,139
19	0,071	1,084	0,089
20	0,073	1,019	0,088

Fonte: Próprio autor

Em relação aos resultados da rugosidade média na usinagem com óleo lubrificante, na Figura 34, observa-se a forte influência do avanço  $f_z$  no valor da rugosidade média  $R_a$ , o que consolida que o avanço é o parâmetro mais importante nos resultados do acabamento superficial e de que o óleo de corte modifica as condições de corte favorecendo a influência mais forte do avanço nos resultados.

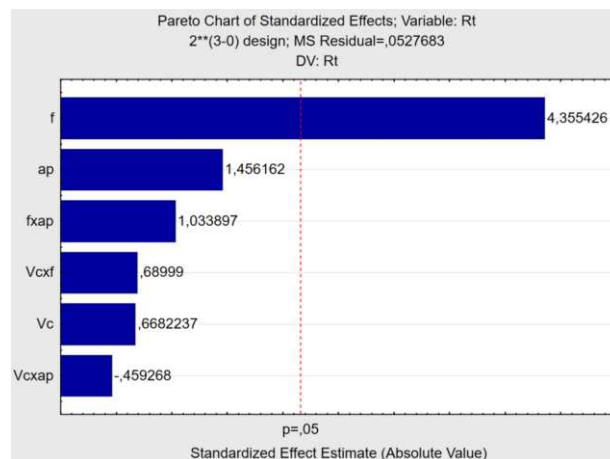
Figura 34 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D -  $R_a$  (usinagem com óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Na Figura 35, os valores da rugosidade  $R_t$  foram muito parecidos com os resultados da rugosidade  $R_a$ , confirmando que o óleo lubrificante facilita a obtenção de melhores acabamentos, devido seu efeito lubrificante no processo de corte.

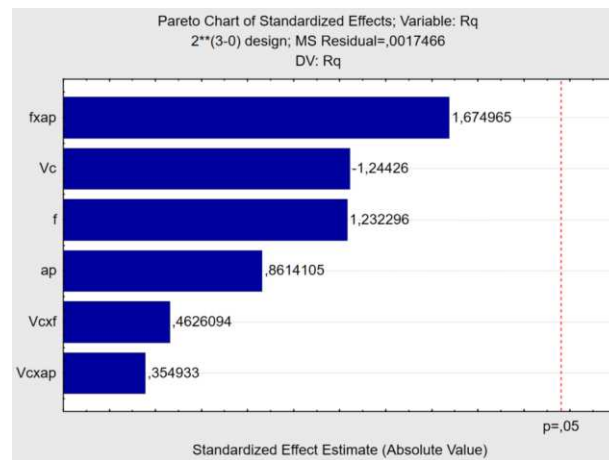
Figura 35 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D -  $R_t$  (usinagem com óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Na Figura 36, os valores da rugosidade  $R_q$  foram igualmente influenciados pela interação  $f_z \times a_p$ , pelo  $v_c$  e pelo  $f_z$ , mas não forneceram evidência comprovada de sua influência, pois ficaram abaixo estatisticamente do intervalo de confiança adotado.

Figura 36 - Gráfico de Pareto para rugosidade 2D -  $R_q$  (usinagem com óleo lubrificante)

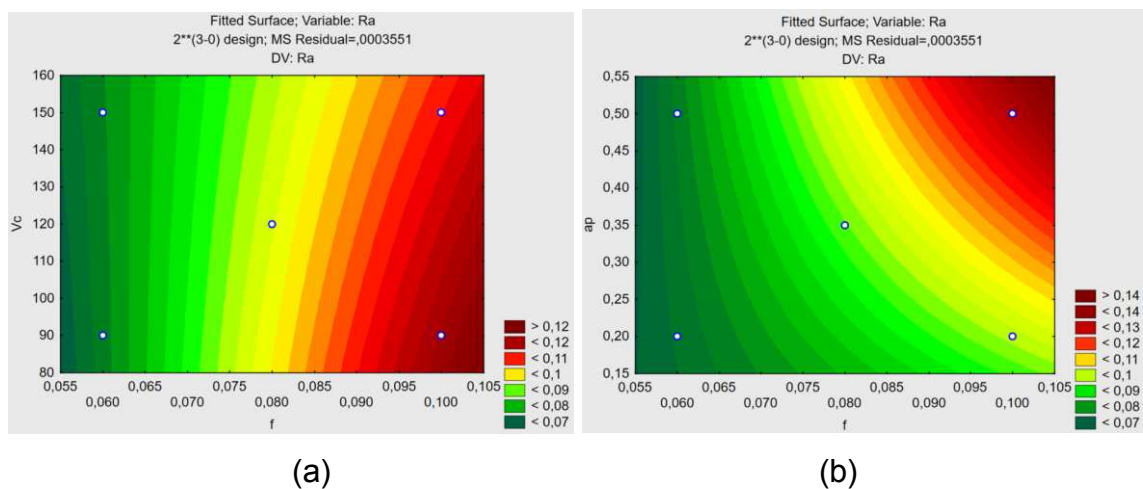


Fonte: Próprio autor

As superfícies de respostas geradas para a estratégia utilizando lubrificante indicam que as variáveis que mais influenciam a rugosidade são o avanço e a profundidade de corte. Para a rugosidade  $R_a$  nota-se na Figura 37 (a) e (b) que menores avanços e menores profundidades de corte propiciam menores rugosidades.

Em (a) para valores de  $v_c$  entre 80 e 160 m/min, e  $f$  entre 0,055 e 0,065mm/rot, os valores de  $R_a$  não ultrapassam 0,080 $\mu$ m. Em (b) observa-se que para  $a_p$  de 0,15 a 0,55mm e  $f$  de 0,055 a 0,065 mm/rot, obtém-se  $R_a$  menores do que 0,08  $\mu$ m.

Figura 37 - Resultados das interações para  $R_a$  – 2D (a)  $f_z \times v_c$ . (b)  $f_z \times a_p$  na usinagem com lubrificante.

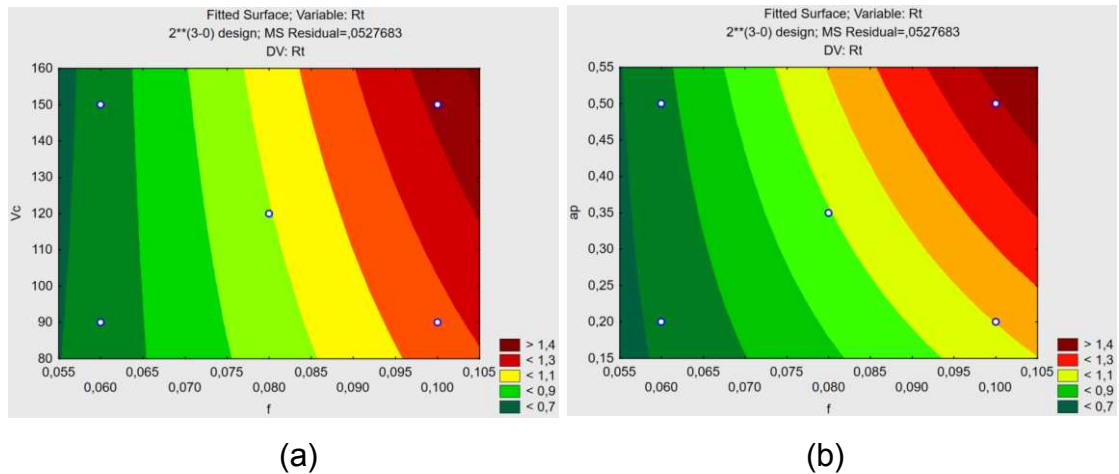


Fonte: Próprio autor

A Figura 38 mostra em (a) que os menores avanços propiciam menores rugosidades  $R_t$ , assim como em (b). Pode-se notar também que em (a) variando  $V_c$  de

80 a 160m/min e o avanço variando de 0,055 a 0,065mm/rot, proporcionaram  $R_t$  menores do que 0,700  $\mu\text{m}$ .

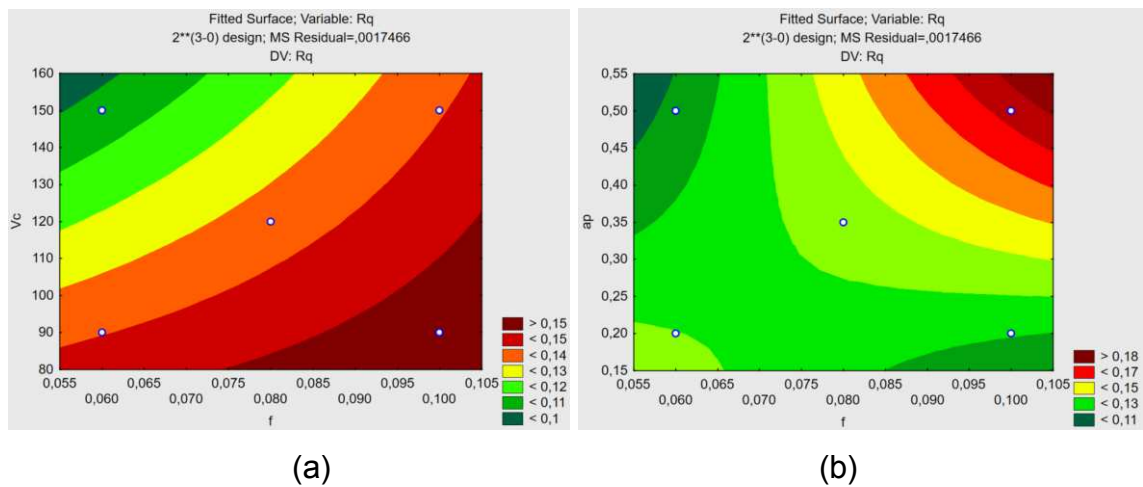
Figura 38 - Resultados das interações para  $R_t$  – 2D (a)  $f_z \times v_c$ . (b)  $f_z \times a_p$  na usinagem com lubrificante.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 39, para a rugosidade  $R_q$  nota-se em (a) que menores avanços e maiores velocidades de corte propiciam menores rugosidades. Em (b) é mostrado que os menores avanços e menores profundidades de corte geram menores rugosidades. Conforme Polishetty *et. al*, 2014, o aumento da velocidade de corte faz com que a temperatura aumente, diminuindo o esforço de corte. Com esta diminuição do esforço, a remoção do material é facilitada, reduzindo a rugosidade. Assim observa-se em (a) que no intervalo de  $V_c$  entre 150 e 160m/min com  $f$  entre 0,055 e 0,060mm/rot, obtém-se  $R_q$  menores do que 0,100 $\mu\text{m}$ . Em (b) com  $a_p$  entre 0,50 e 0,55mm e  $f$  de 0,055 a 0,600mm/rot obtém-se  $R_q$  menores do que 0,110  $\mu\text{m}$ .

Figura 39 - Resultados das interações para  $R_q$  – 2D (a)  $f_z$  x  $v_c$ . (b)  $f_z$  x  $a_p$  na usinagem com lubrificante.



Fonte: Próprio autor

### Funções de predição dos parâmetros 2D

As funções obtidas pelas superfícies de respostas estão listadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Funções estatísticas para a predição de  $R_a$ ,  $R_t$  e  $R_q$

Sem Lubrificante	Função matemática
$R_a$	$= -0,06 + 0,0017 \cdot v_c + 1,697 \cdot f - 0,02 \cdot f \cdot v_c - 0,0002 \cdot a_p \cdot v_c + 4,73 \cdot a_p \cdot f - 0,10$
$R_t$	$= -0,32 + 0,007 \cdot v_c + 19,91 \cdot f - 0,15 \cdot f \cdot v_c + 0,016 \cdot a_p \cdot v_c + 12,16 \cdot a_p \cdot f - 0,59$
$R_q$	$= -0,16 + 0,0029 \cdot v_c + 2,84 \cdot f - 0,031 \cdot f \cdot v_c - 0,0016 \cdot a_p \cdot v_c + 5,88 \cdot a_p \cdot f - 0,07$
Com lubrificante	Função matemática
$R_a$	$= -0,028 + 0,00075 \cdot v_c + 0,69 \cdot f - 0,0045 \cdot f \cdot v_c - 0,0013 \cdot a_p \cdot v_c + 2,5 \cdot a_p \cdot f + 0,006$
$R_t$	$= 0,59 - 0,0019 \cdot v_c - 2,35 \cdot f + 0,066 \cdot f \cdot v_c - 0,0058 \cdot a_p \cdot v_c + 19,79 \cdot a_p \cdot f - 0,112$
$R_q$	$= 0,39 - 0,0013 \cdot v_c - 2,36 \cdot f + 0,0080 \cdot f \cdot v_c + 0,0008 \cdot a_p \cdot v_c + 5,83 \cdot a_p \cdot f - 0,18$

Fonte: Próprio autor

### Resultados das rugosidades 3D

Como descrito no capítulo anterior, é importante se fazer a interpretação correta dos parâmetros de rugosidade, mas foi observado que poderão acontecer erros de tradução das leituras realizadas por meio de instrumentos, levando à erros de fabricação ou mesmo erro decorrentes da especificação equivocada de parâmetros que não atendam a função do objeto em estudo.

Neste capítulo serão analisados os resultados 3D dos parâmetros  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$  e  $S_a$ , em função dos parâmetros de corte, anteriormente, estabelecidos na Tabela 7. Serão analisados os resultados das interações entre eles nos resultados finais por meio dos gráficos de Pareto com intervalo de confiança de 95% das usinagens com e sem óleo lubrificante, o Apêndice “A” apresenta os relatórios das medições 3D sem óleo lubrificante.

#### 4.1.3 Usinagem sem óleo lubrificante

Os valores da média das rugosidades 3D obtidas, encontram-se na Tabela 15, e foram obtidos a partir dos relatórios de medição do apêndice B. Os valores e serão inseridos no software de estatística para obtenção das análises da usinagem por meio da geração dos gráficos de Pareto e das superfícies de resposta, que darão origem as funções estatísticas de predição da rugosidade 3D.

Tabela 15 - Valores médios das rugosidades 3D - usinagem a seco

Número do ensaio	$S_q$	$S_{sk}$	$S_{ku}$	$S_p$	$S_v$	$S_z$	$S_a$
1	0,314	0,032	3,850	3,960	2,800	6,760	0,249
2	0,268	-0,066	3,260	1,840	1,400	3,240	0,212
3	0,274	0,114	3,920	2,290	1,860	4,150	0,213
4	0,248	-0,148	3,250	1,700	1,730	3,430	0,195
5	0,188	0,536	5,460	1,740	1,290	3,030	0,144
6	0,446	0,746	8,040	4,410	3,040	7,450	0,332
7	0,520	-0,178	2,700	2,510	2,250	4,760	0,419
8	0,420	0,656	10,500	3,920	3,250	7,180	0,298
9	0,293	0,460	5,230	2,550	1,900	4,450	0,227
10	0,241	0,548	6,920	2,100	1,590	3,690	0,182
11	0,375	0,396	4,290	2,580	2,130	4,710	0,287
12	0,344	0,113	2,840	2,530	1,970	4,500	0,281
13	0,311	-0,139	3,290	2,240	1,830	4,070	0,247
14	0,394	0,288	3,180	2,760	2,230	4,990	0,314
15	0,207	0,733	6,640	1,860	1,270	3,130	0,158
16	0,337	1,160	9,830	3,110	1,910	5,020	0,251
17	0,486	0,565	4,320	3,570	3,110	6,670	0,369
18	0,346	0,064	4,960	4,680	3,550	8,230	0,266
19	0,338	-0,082	3,910	4,230	4,810	9,050	0,262
20	0,317	0,016	4,340	3,470	3,300	6,770	0,246

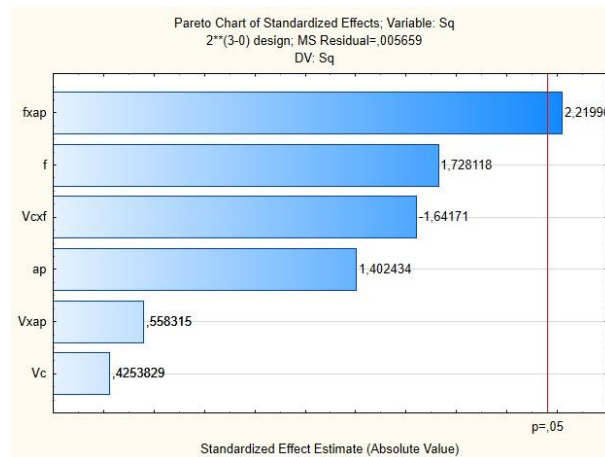
Fonte: Próprio autor



Para o parâmetro de rugosidade  $S_q$ , pode-se notar na Figura 40, que a maior influência foi da interação entre  $f_z$  e  $a_p$  na usinagem a seco, com 95% de confiança. Também é possível observar que  $f$  foi o segundo parâmetro mais influente nos resultados de  $S_q$  para usinagem a seco.

No resultado do parâmetro  $R_q$ , observou-se que o  $f_z$  foi o mais influente, assim, partindo-se do pressuposto que o  $S_q$  é a expansão do  $R_q$ , houve uma diferença na interpretação da superfície 3D em relação ao perfil 2D, pois embora o parâmetro  $f_z$  ainda seja influente, o  $a_p$  passa a ter uma relevância mais importante quando interage com  $f_z$ .

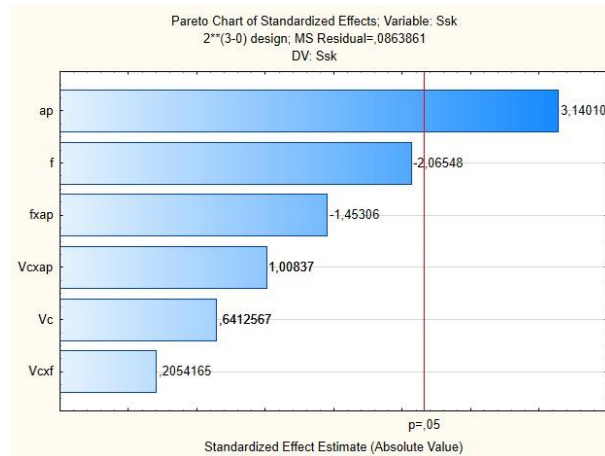
Figura 40 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_q$  (usinagem sem óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro de rugosidade  $S_{sk}$ , Figura 41, a maior influência foi o  $a_p$  na usinagem a seco, com 95% de confiança. Também é possível observar que  $f_z$  foi o segundo parâmetro mais influente nos resultados de  $S_{sk}$ . Será comentada esta influência no detalhamento da superfície de resposta da Figura 45.

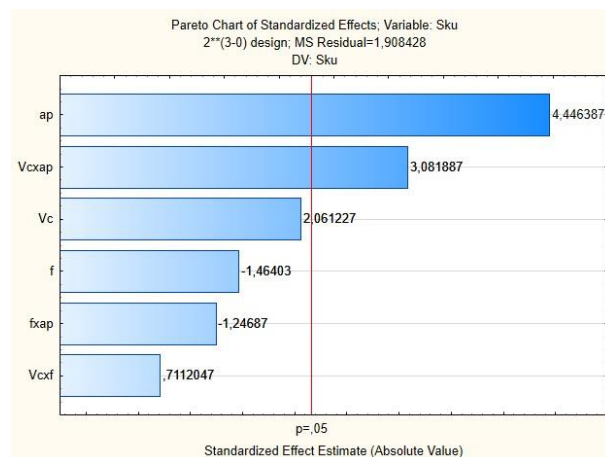
Figura 41 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_{sk}$  (usinagem sem óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro de rugosidade  $S_{ku}$ , mostrado na Figura 42, a maior influência também foi o  $a_p$  na usinagem a seco, com 95% de confiança. Também é possível observar que a interação  $V_c$  e  $a_p$  foi o segundo parâmetro mais influente nos resultados com 95% de confiança. O avanço  $f$  teve grau de influência apenas em terceiro lugar, mostrando que o  $a_p$  e a  $V_c$  são mais relevantes para determinação do achatamento da distribuição da altura (curtose).

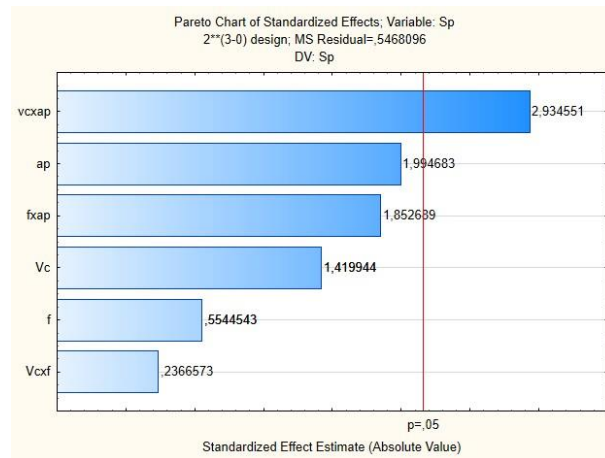
Figura 42 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_{ku}$  (usinagem sem óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro de rugosidade  $S_p$ , mostrado pelo gráfico de Pareto na Figura 43, a maior influência foi a interação da  $V_c$  e  $a_p$  na usinagem a seco, com 95% de confiança. Semelhante ao  $S_{ku}$ , mas representando o valor máximo do pico das alturas, o  $V_c$  e o  $a_p$  continuam tendo maior relevância.

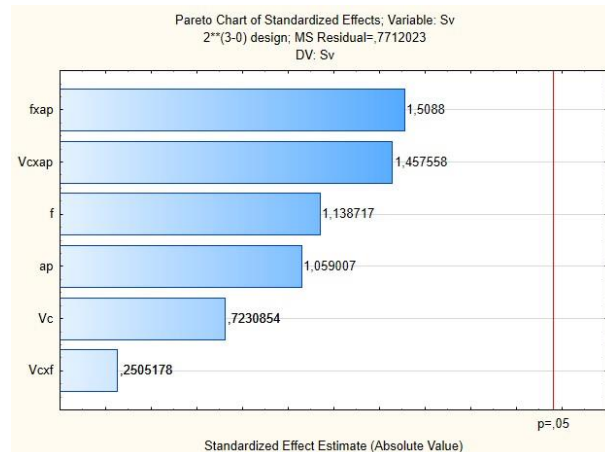
Figura 43 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_p$  (usinagem sem óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro de rugosidade  $S_v$ , Figura 44, a maior influência foi a interação da  $f_z$  e  $a_p$  na usinagem a seco. No entanto o intervalo de confiança de 95% estipulado para este estudo não foi alcançado, tornando este gráfico inconclusivo em relação à relevância dos parâmetros de usinagem expostos para este estudo.

Figura 44 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_v$  (usinagem sem óleo lubrificante)

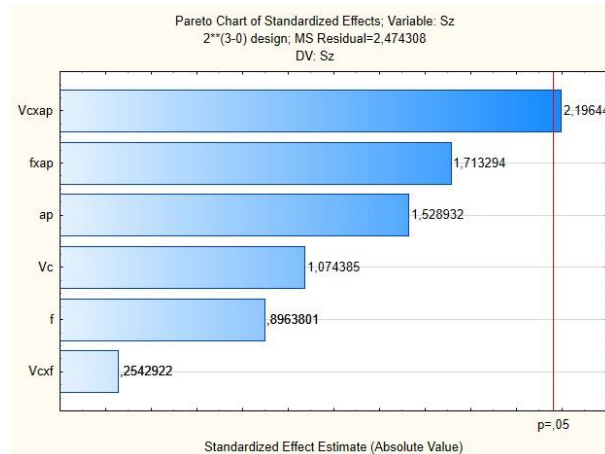


Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro de rugosidade  $S_z$ , Figura 45, a maior influência foi a interação da  $V_c$  e  $a_p$  na usinagem a seco, com 95% de confiança. O  $S_z$  expande o parâmetro 2D  $R_z$ , e representa a altura máxima dos picos e vales.

Foi relevante observar neste estudo que o  $a_p$  participou nos três primeiros itens mais influentes na obtenção do  $S_z$ , revelando sua importância na geração de picos e vales, ao contrário do  $f$  como era imaginado.

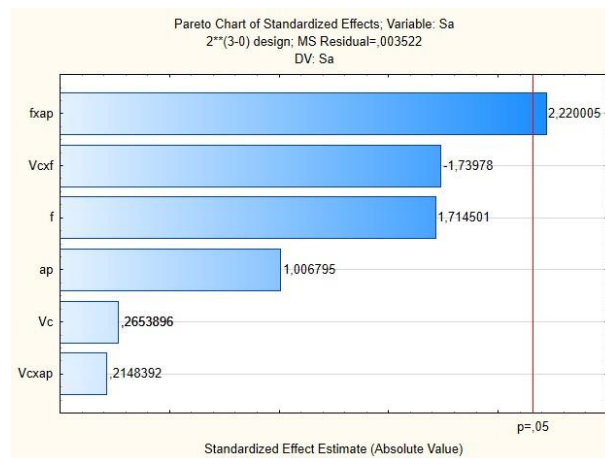
Figura 45 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_z$  (usinagem sem óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro de rugosidade  $S_a$  a maior influência foi a interação da  $f$  e  $a_p$  na usinagem a seco, com 95% de confiança, depois a interação  $V_c$  e  $f_z$  seguido em terceiro lugar o  $f_z$ . O  $S_a$  expande o parâmetro 2D  $R_a$  que representa a média aritmética das ordenada absoluta de  $Z$ , em 2D. Para o  $S_a$ , irá representar a média aritmética da área em avaliação em 3D. Na análise 2D o  $f$  foi a influência mais relevante nos resultados, mas em 3D, embora ele estivesse sempre em evidência, aparecendo nos 3 primeiros parâmetros mais relevantes, houve também destaque para os parâmetros  $a_p$  e  $V_c$ , Figura 46.

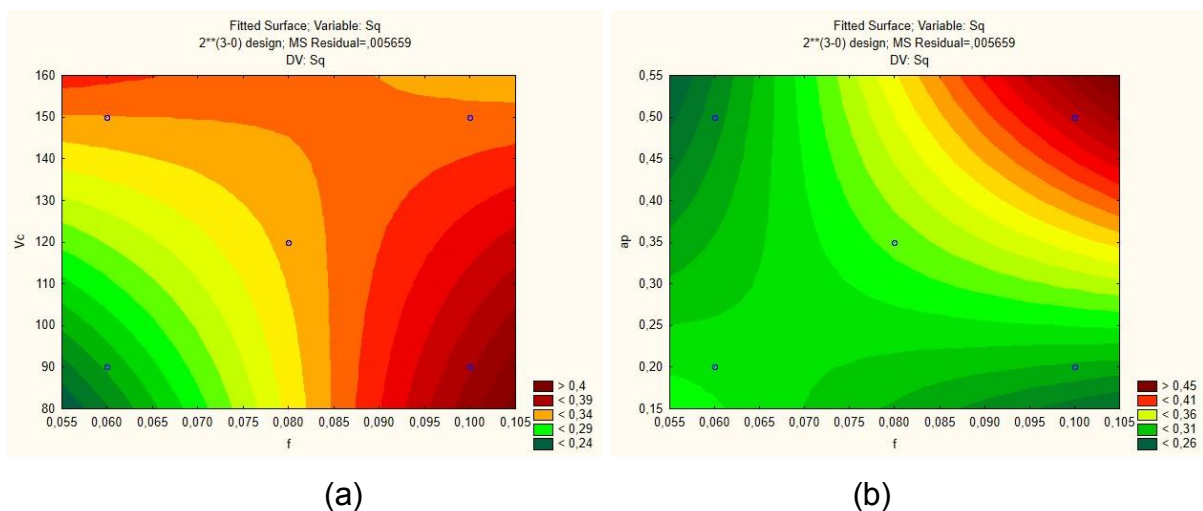
Figura 46 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_a$  (usinagem sem óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

As superfícies de respostas geradas para a estratégia sem lubrificante indicam que as variáveis que mais influenciam a rugosidade  $S_q$  foi a interação  $f_z \times a_p$ , o avanço e a profundidade de corte. Para este parâmetro nota-se na Figura 47 (a) e (b) que menores avanços e menores profundidades de corte propiciam menores rugosidades. Em (a) para valores de  $V_c$  entre 80 e 160 m/min, e  $f$  entre 0,055 e 0,105mm/rot, os valores de  $S_q$  não ultrapassam 0,4 $\mu$ m. Em (b) observa-se que para  $a_p$  de 0,15 a 0,55mm e  $f_z$  de 0,055 a 0,105 mm/rot, obtém-se  $S_q$  menores do que 0,41  $\mu$ m.

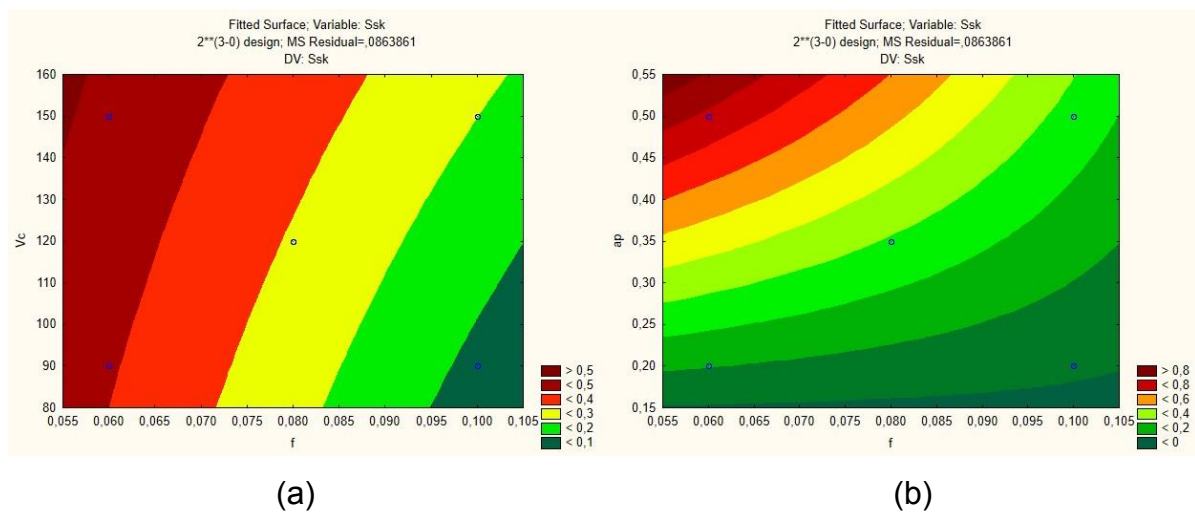
Figura 47 - Resultados das interações para  $S_q$  – 3D (a)  $f \times V_c$ . (b)  $f \times a_p$  (usinagem sem óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Partindo do pressuposto levantado no gráfico de Pareto da Figura 38 e analisando-se as superfícies de respostas da Figura 43 geradas para a estratégia sem lubrificante, os dois gráficos indicam que a variável que mais influenciou a rugosidade foi  $a_p$ , seguido pelo  $f_z$ . Para parâmetro  $S_{sk}$  nota-se na Figura 48 (a) e (b) que menores avanços e menores profundidades de corte propiciam maiores rugosidades. Em (a) para valores de  $V_c$  entre 80 e 160 m/min, e  $f$  entre 0,055 e 0,105mm/rot, os valores de  $S_{sk}$  não ultrapassam 0,4 $\mu$ m com mínimo avanço, mas a medida que se aproximou  $f_z$  do valor máximo abaixou para  $S_{sk}$  de 0,1  $\mu$ m. Em (b) observa-se que para  $a_p$  de 0,15 a 0,55mm e  $f$  de 0,055 a 0,105 mm/rot, obtém-se  $S_{sk}$  com valores entre 0,2  $\mu$ m e 0,8  $\mu$ m, observando-se que o aumento do  $a_p$  com mínimo  $f$  proporcionou maiores valores de  $S_{sk}$ . Também o aumento de  $f$  proporcionou menores valores de  $S_{sk}$ , mas foi pouco acentuado, enquanto que sua diminuição aumentou os valores de  $S_{sk}$ .

Figura 48 - Resultados das interações para  $S_{sk}$  – 3D (a)  $f \times v_c$ . (b)  $f \times a_p$  (usinagem sem óleo lubrificante)



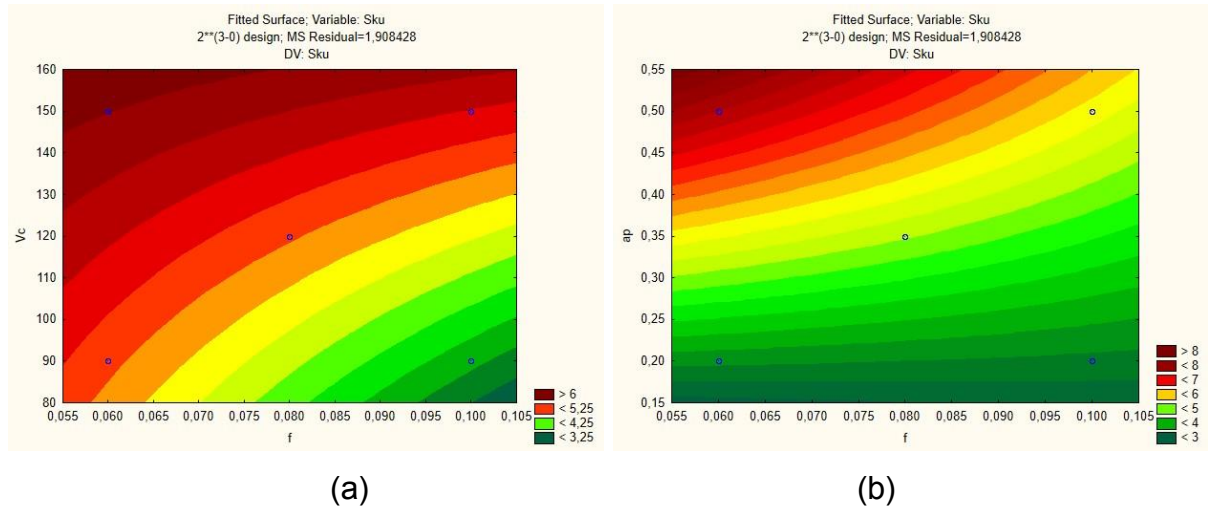
Fonte: Próprio autor

Partindo do pressuposto levantado no gráfico de Pareto da Figura 42 e analisando-se a Figura 49 (a), quanto maior o  $V_c$ , maior o valor da rugosidade  $S_{ku}$ . Em (b) observa-se que a alteração dos valores de  $f_z$  contribuíram muito pouco para o aumento de  $S_{ku}$ , pois a profundidade  $a_p$  teve maior contribuição.

Na Figura 49 (a), com  $V_c$  de 80 a 120m/min os valores de  $S_{ku}$  são menores do que 4,25  $\mu$ m somente com avanços acima de 0,075 até 0,105mm. Na faixa de  $V_c$  acima de 120m/min serão proporcionados valores de  $S_{ku}$  maiores do que 5,25 $\mu$ m.

Na Figura 49 (b) para  $a_p$  menores do 0,35mm e valores de  $f_z$  de 0,065mm os valores de  $S_{ku}$  serão menores do que  $5\mu\text{m}$ .

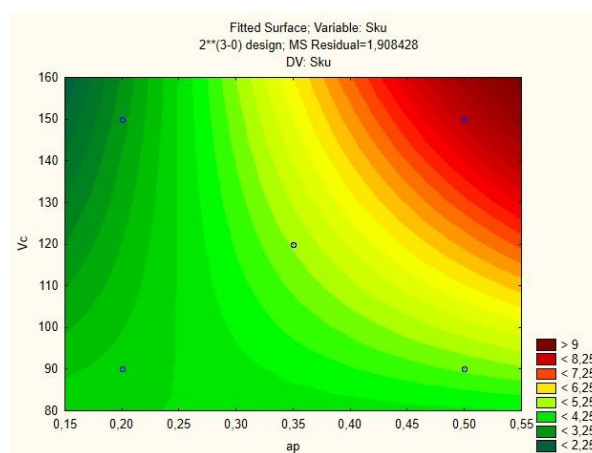
Figura 49 - Resultados das interações para  $S_{ku}$  – 3D (a)  $f \times v_c$  (b)  $f \times a_p$  (usinagem sem óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Na Figura 50, houve uma proporcionalidade no aumento de  $S_{ku}$  em relação à  $v_c$  e  $a_p$ . Comprovou-se também, que a interação  $v_c$  e  $a_p$  influenciaram consideravelmente nos valores de  $S_{ku}$ . Numa faixa de  $v_c$  de 130 e 160m/min, com avanços acima de 0,4 a 0,56mm a rugosidade  $S_{ku}$  será maior do que  $7,25\mu\text{m}$ .

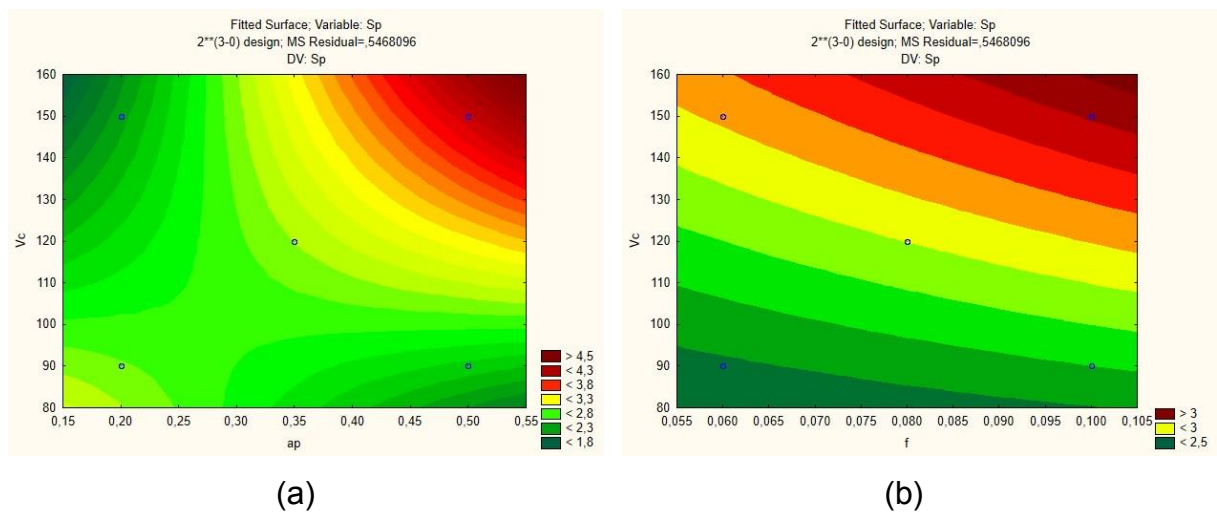
Figura 50 - Resultados das interações para  $S_{ku}$  – 3D  $v_c \times a_p$  (usinagem sem óleo lubrificante).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 51 e 52, houve uma certa proporcionalidade nos levantamentos de  $S_p$  em relação aos parâmetros estudados, sendo que: na Figura 44 (a) interagindo  $V_c$  e  $a_p$ , os valores maiores do que  $4,5 \mu\text{m}$  de  $S_p$  ocorreram com  $V_c$  acima de  $130\text{m/min}$  e  $a_p$  de  $0,40 \text{ mm}$ . Na Figura 49 (b) interagindo  $V_c$  e  $f_z$ , os valores maiores do que  $3 \mu\text{m}$  de  $S_p$  ocorreram, também, com  $V_c$  acima de  $130\text{m/min}$  e com  $f_z$  a partir de  $0,065\text{mm}$ .

Figura 51 - Resultados das interações para  $S_p$  – 3D (a)  $f \times V_c$ . (b)  $f \times a_p$  (usinagem sem óleo lubrificante)

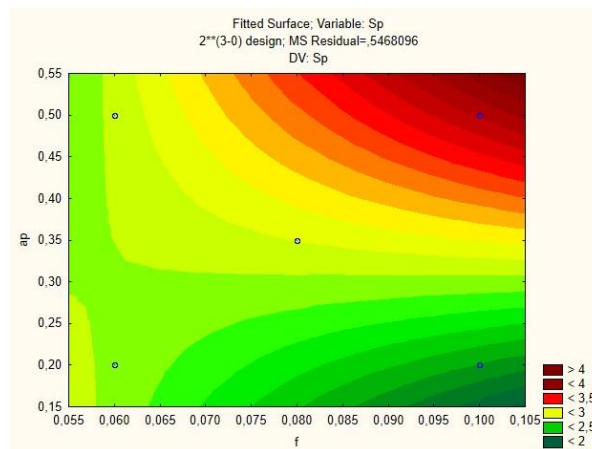


Fonte: Próprio autor

Na Figura 52, a interação foi de  $a_p$  e  $f_z$  para geração do valor  $S_p$ , neste, houve uma proporcionalidade mais evidente entre os dois parâmetros nos resultados, ou seja, aumentando-se  $a_p$  e  $f_z$  proporcionalmente,  $S_p$  também aumenta proporcionalmente, de forma que os maiores valores ocorreram a partir da especificação de  $a_p$  maior do que  $0,4\text{mm}$  e de  $f_z$  maior do que  $0,08\text{mm}$ .



Figura 52 - Resultados das interações para  $S_p$  – 3D  $f_z$  x  $a_p$  (usinagem sem óleo lubrificante)

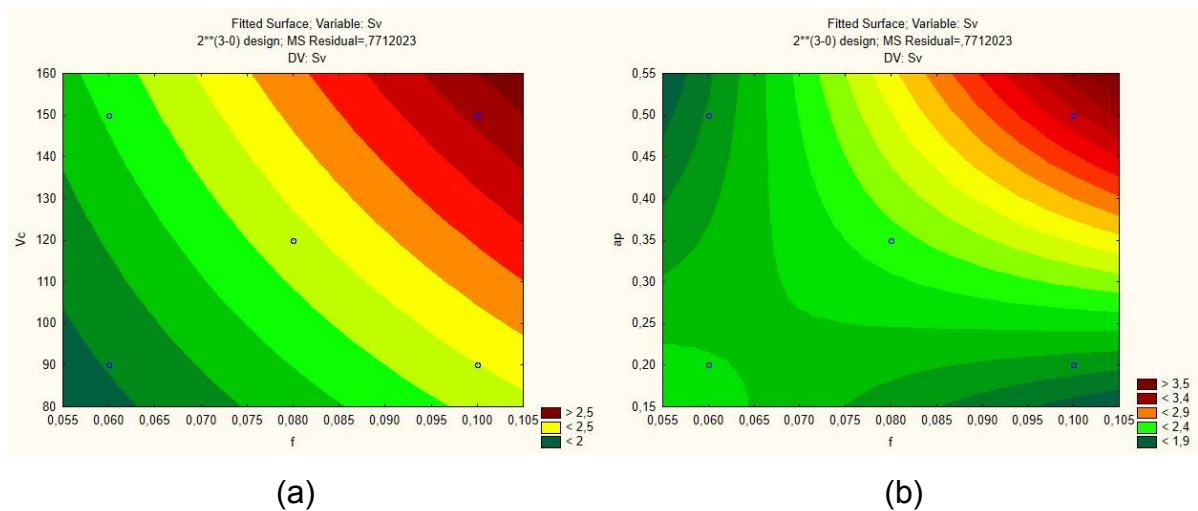


Fonte: Próprio autor

O valor  $S_v$ , ao contrário do anterior  $S_p$ , representa o máximo valor para a profundidade do vale, enquanto que o  $S_p$  representa o máximo valor do pico. Ambos apresentaram uma boa proporcionalidade em todas as interações, como pode ser observado na Figura 53 (a) e (b).

Em (a) observa-se que o valor de  $S_v$  alterou-se muito pouco nos experimentos, com  $V_c$  variando de 80 a 160m/min e  $f$  variando entre 0,055 e 0,105 mm, o  $S_v$  obtido esteve entre 2 e 2,5  $\mu\text{m}$ . Isto comprova que a formação o  $V_c$  e o  $f$  tiveram pouca influência na formação dos vales. Outra nota importante é que o gráfico de Pareto representado na Figura 41, também já apontava inconclusão para formação dos valores de  $S_v$ .

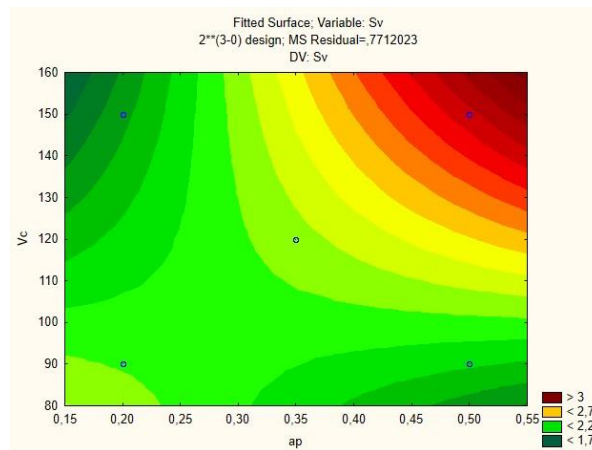
Figura 53 - Resultados das interações para  $S_v$  – 3D (a)  $f_z$  x  $v_c$ . (b)  $f_z$  x  $a_p$  (usinagem sem óleo lubrificante).



Fonte: Próprio autor

Nota-se também na Figura 54 há proporcionalidade no aumento de  $S_v$  em função da interação entre  $a_p$  e  $v_c$ , mas os valores de  $S_v$  estão variando timidamente para representar relevância no estudo.

Figura 54 - Resultados das interações para  $S_v$  – 3D  $a_p$  x  $v_c$ . (usinagem sem óleo lubrificante).

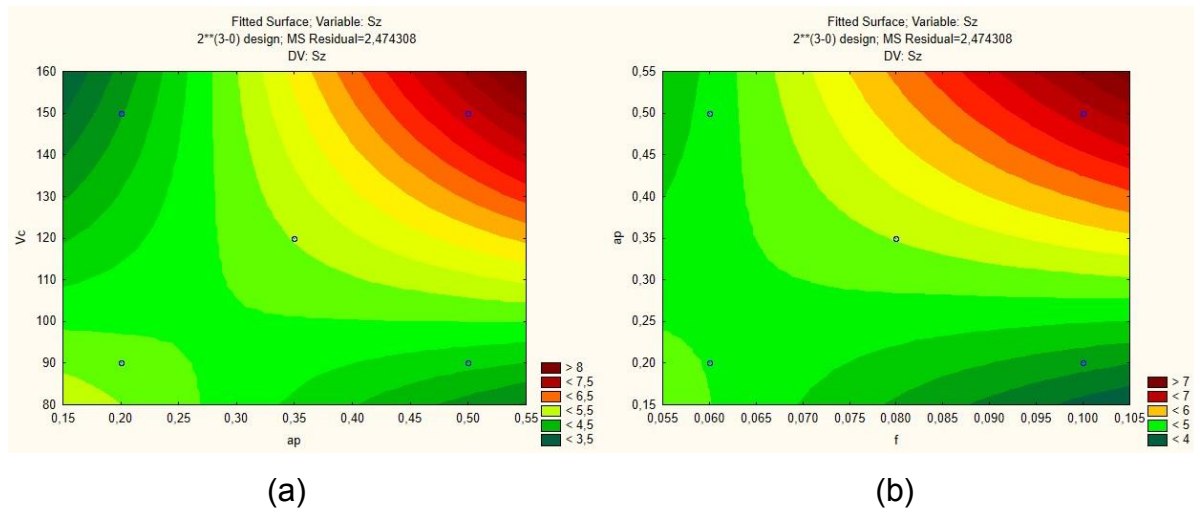


Fonte: Próprio autor

O parâmetro  $R_z$  em 2D, representa a altura máxima entre picos e vales, o parâmetro  $S_z$  é a expansão deste parâmetro para 3D. Assim, pode-se afirmar que  $S_z$  é a soma de  $S_p$  e  $S_v$ , (OLYMPUS, 2016) conforme a equação (4), e, conseqüentemente, os resultados obtidos nos valores deste parâmetro seguiram a mesma tendencia de  $S_p$  e  $S_v$  somados, como pode se observar na Figura 55.

$$S_z = S_p + S_v \quad (4)$$

Figura 55 - Resultados das interações para  $S_z$  – 3D (a)  $a_p$  x  $v_c$ . (b)  $f_z$  x  $a_p$  (usinagem sem óleo lubrificante).



Fonte: Próprio autor

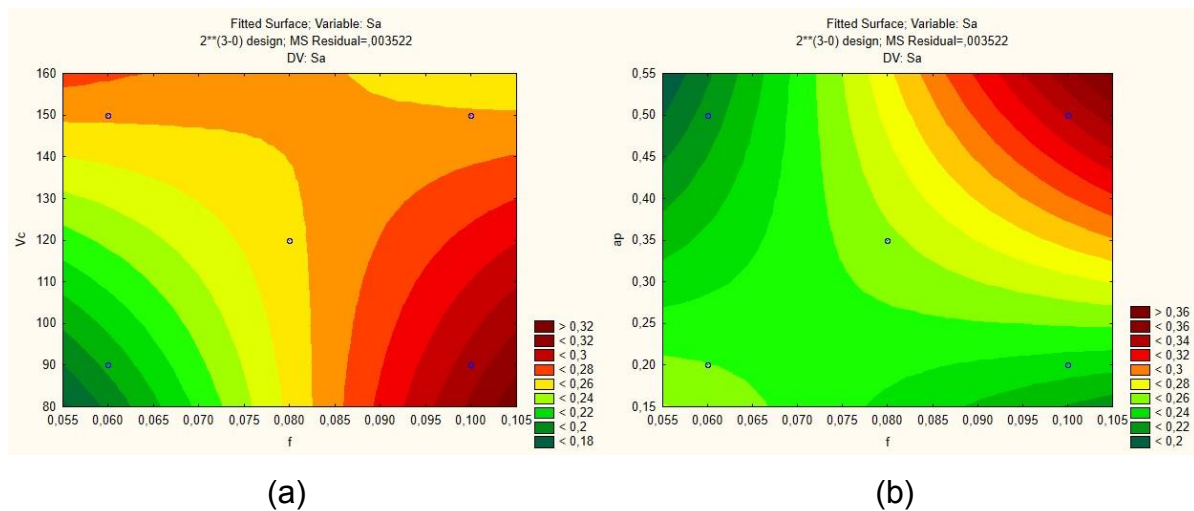
O parâmetro 2D  $R_a$ , é o parâmetro mais conhecido e utilizado, o parâmetro  $s_a$  é a expansão do  $R_a$  em três dimensões.

Enquanto o  $R_a$  soma as áreas acima e abaixo da linha média ao longo do comprimento  $L_m$ , conforme exposto na equação (1), o  $S_a$  integra os valores de  $Z$  na área de avaliação ( $x,y$ ). conforme a equação (5).

$$S_a = \frac{1}{A} \iiint_A |Z(x, Y)| dx dy \quad (5)$$

Dois pontos podem ser observados na Figura 56 (a), primeiro a baixa influência do  $V_c$  e do  $f_z$ , tendo em vista que com o  $V_c$  variando de 80 a 160 m/min e o  $f$  variando de 0,055 a 0,105 mm, o valor de  $S_a$  variou apenas entre 0,18 e 0,32  $\mu\text{m}$ . Os motivos deste parâmetro ser tão estável, demonstra que tanto o  $R_a$  em 2D como o  $S_a$  em 3D, não têm seus valores afetados significativamente por arranhões. Como os valores  $S_v$  e  $S_p$  que avaliam os picos e vales também foram baixos, o resultado são pequenos valores de  $S_a$ .

Figura 56 - Resultados das interações para  $S_a$  – 3D (a)  $f_z \times v_c$ . (b)  $f \times a_p$  (usinagem sem óleo lubrificante).



Fonte: Próprio autor

#### 4.1.4 Usinagem com óleo lubrificante

Os valores da média das rugosidades 3D obtidas, encontram-se na Tabela 16 e são os valores inseridos no software de estatística para obtenção das análises da usinagem por meio da geração dos gráficos de Pareto e das superfícies de resposta, que darão origem as funções estatísticas de predição da rugosidade.

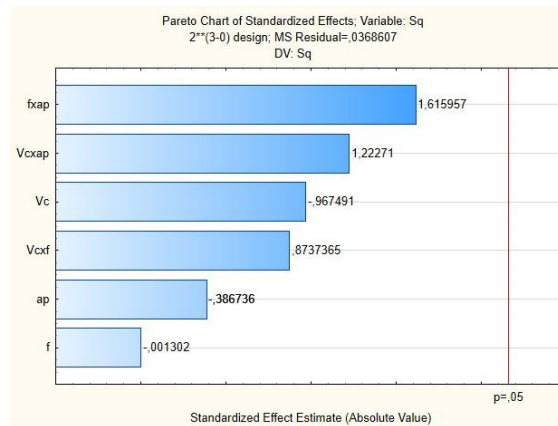
Tabela 16 - Valores médios das rugosidades 3D - usinagem com óleo

Número do ensaio	$S_q$	$S_{sk}$	$S_{ku}$	$S_p$	$S_v$	$S_z$	$S_a$
1	1,080	0,504	2,980	4,890	3,320	8,210	0,877
2	0,208	0,242	3,240	1,520	0,775	2,300	0,166
3	0,231	0,388	3,640	1,670	0,959	2,630	0,183
4	0,270	0,214	3,330	1,980	1,210	3,190	0,217
5	0,203	0,300	0,250	1,120	0,772	3,780	0,189
6	0,285	1,070	8,660	2,500	1,230	3,730	0,213
7	0,426	-0,043	3,850	2,270	2,010	4,280	0,327
8	0,440	0,158	3,030	2,610	1,810	4,420	0,351
9	0,310	-0,236	2,540	1,920	1,410	3,330	0,256
10	0,259	-0,115	3,600	1,850	1,330	3,180	0,205
11	0,201	0,482	5,960	1,950	1,310	3,260	0,153
12	0,245	0,003	3,220	1,510	0,982	2,490	0,195
13	0,332	0,041	2,590	1,870	1,340	3,210	0,273
14	0,280	-0,206	4,020	2,090	1,790	3,880	0,215
15	0,219	0,358	0,340	1,380	0,806	2,190	0,174
16	0,258	1,220	11,000	2,550	1,300	3,850	0,191
17	0,378	-0,197	4,150	2,570	2,000	4,570	0,288
18	0,341	2,410	18,000	3,260	1,270	4,530	0,227
19	0,245	0,823	8,880	2,380	1,140	3,520	0,180
20	0,226	0,817	7,120	1,850	0,843	2,690	0,171

Fonte: Próprio autor

Comparando-se o parâmetro de rugosidade  $S_q$  na usinagem a seco e na usinagem com óleo, Figura 57, nota-se que na usinagem a óleo não foi possível a comprovação com 95% de confiança para nenhum parâmetro, no entanto, a interação  $f_z$  e  $a_p$  mantiveram-se como mais influentes na usinagem com óleo lubrificante. Os outros parâmetros se inverteram em relação aos demais, mas todos com baixa relevâncias na formação dos resultados.

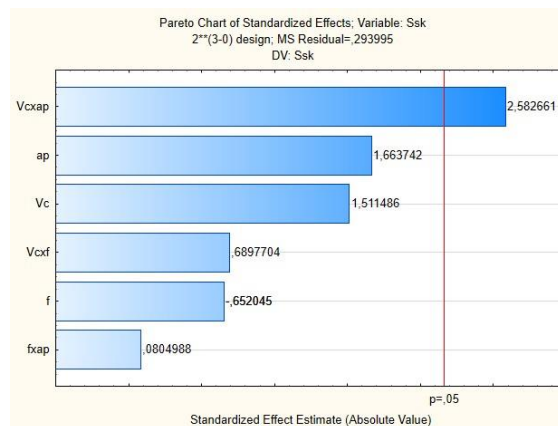
Figura 57 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_q$  (usinagem com óleo lubrificante).



Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro  $S_{sk}$ , na Figura 58, na usinagem com óleo lubrificante houve mudanças na relevância, pois o  $a_p$  foi o mais influente sem óleo, e na usinagem com óleo a interação  $V_c$  e  $a_p$  passou a ser mais relevante com 95% de confiança.

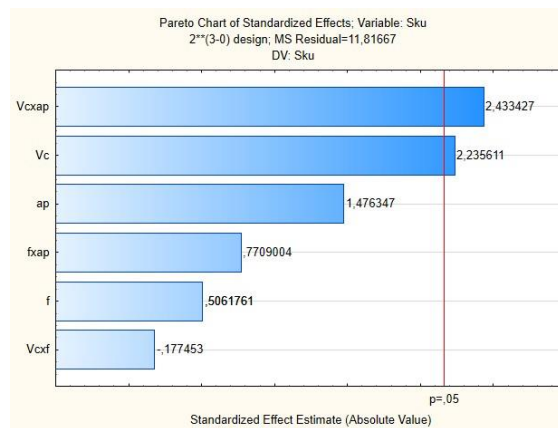
Figura 58 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_{sk}$  (usinagem com óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro  $S_{ku}$ , Figura 59, o  $a_p$  caiu para o segundo lugar na relevância em relação à usinagem a seco, e a interação  $V_c$  e  $a_p$  se mostraram mais influentes na obtenção deste parâmetro para a usinagem com lubrificante.

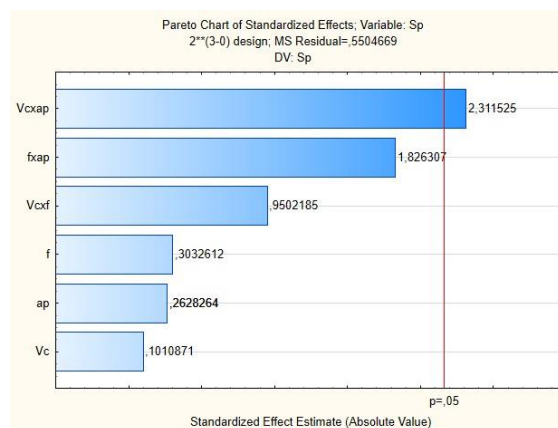
Figura 59 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_{ku}$  (usinagem com óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro  $S_p$ , na usinagem com óleo, o valor da interação  $V_c$  e  $a_p$ , continuou como a mais influente mantendo-se a confiança de 95%, Figura 60, porém a influência dos outros parâmetros não manteve a mesma ordem, em relação à usinagem a seco.

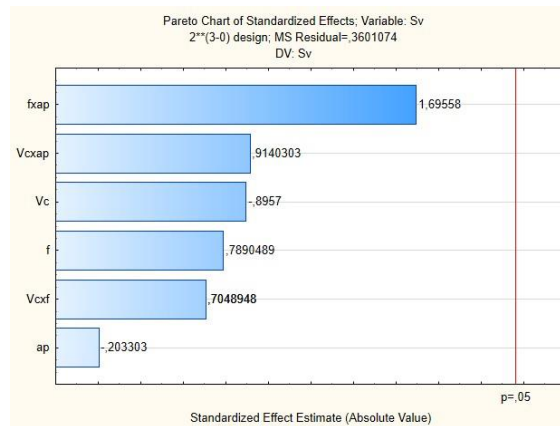
Figura 60 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_p$  (usinagem com óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro de rugosidade  $S_v$ , Figura 61, a maior influência foi a interação da  $f_z$  e  $a_p$  na usinagem a óleo, e da mesma forma que a usinagem a seco, não atingiu o intervalo de 95% de confiança, tornando este gráfico inconclusivo em relação à relevância dos parâmetros de usinagem expostos para este estudo.

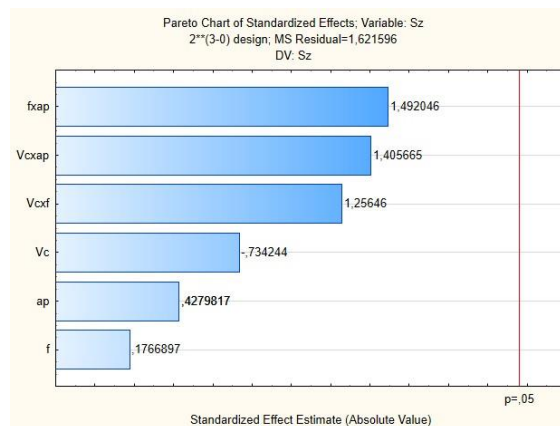
Figura 61 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_v$  (usinagem com óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

No parâmetro  $S_z$ , conforme Figura 62, na usinagem a seco houve relevância da interação  $f$  e  $a_p$ , no entanto, para usinagem com óleo, embora esta interação tenha se mantido como mais influente, não foi possível garantir a confiança de 95%.

Figura 62 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_z$  (usinagem com óleo lubrificante)

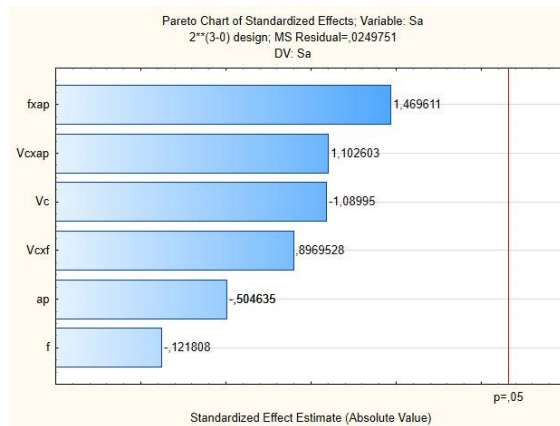


Fonte: Próprio autor

No parâmetro  $S_a$ , imaginava-se que para usinagem com óleo o  $f_z$  ficasse mais influente como no parâmetro 2D, mas houve um equilíbrio geral na influência dos parâmetros de corte, Figura 63, contribuindo para que nenhum parâmetro se sobressaísse como influência importante na obtenção  $S_a$ . Isto deve-se ao fato citado por Diniz et al., (2013), que quando o avanço cresce, a pressão específica de corte diminui, a formação de cavaco é facilitada e a rugosidade da peça se aproxima da ideal. Tal afirmação fica evidenciada pela inserção da lubrificação.



Figura 63 - Gráfico de Pareto para rugosidade 3D – parâmetro  $S_a$  (usinagem com óleo lubrificante)

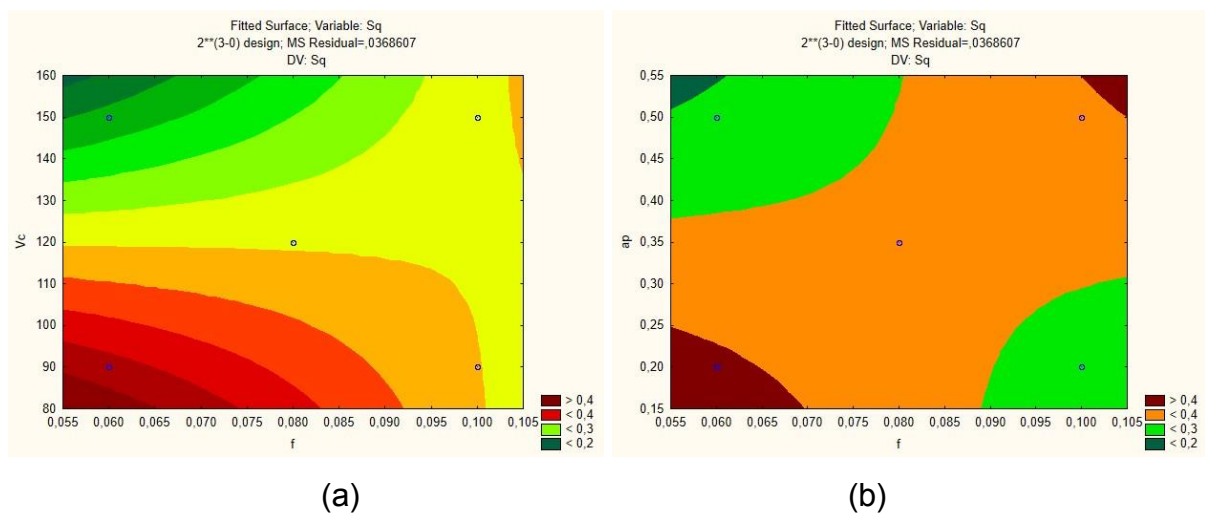


Fonte: Próprio autor

Nas superfícies de resposta geradas para a estratégia de usinagem utilizando-se óleo lubrificante para o parâmetro  $S_q$ , ficou evidenciado por meio do gráfico de Pareto na Figura 57, que não houve destaque de influência de nenhum parâmetro com 95% de confiança.

Nas superfícies de resposta também pode-se observar que na Figura 64 (a) a máxima variação do valor de  $S_q$  esteve entre 0,2 e 0,4  $\mu\text{m}$ , ou seja, para valores de  $V_c$  entre 80 e 160 m/min e  $f$  entre 0,055 e 0,105 mm, a máxima variação de  $S_q$  foi de 0,2  $\mu\text{m}$ .

Figura 64 - Resultados das interações para  $S_q$  – 3D (a)  $f \times v_c$ . (b)  $f_z \times a_p$  (usinagem com óleo lubrificante)



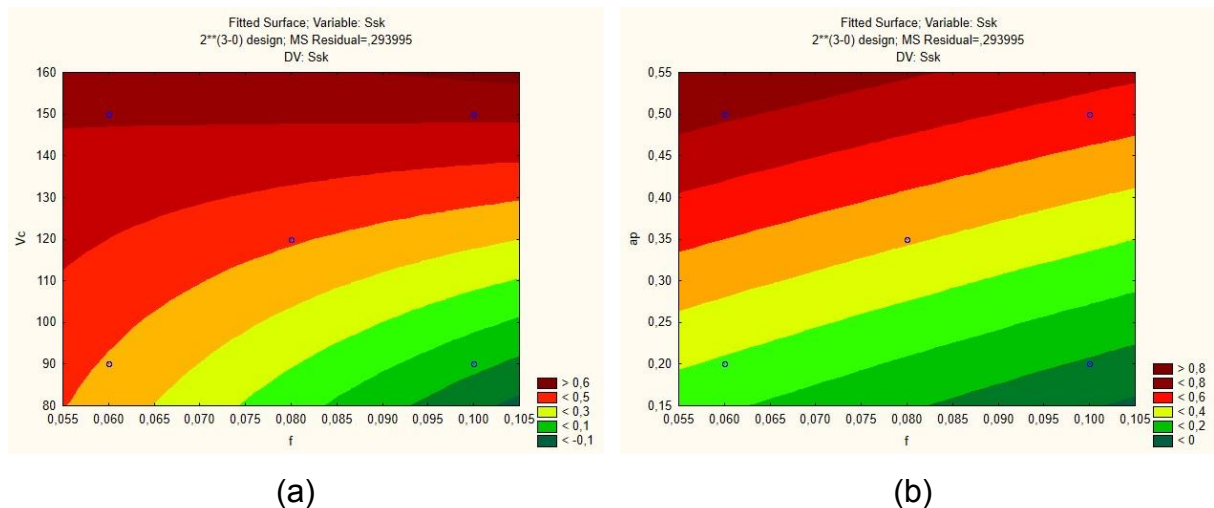
Fonte: Próprio autor

Três gráficos foram gerados para análise dos parâmetros de corte mais influentes na usinagem com óleo para o parâmetro de rugosidade 3D  $S_{sk}$ , baseados nos resultados obtidos no gráfico de Pareto da Figura 59.

Na Figura 65 (a) há a interação de  $V_c$  e  $f_z$ . Observa-se que os maiores valores de  $S_{sk}$  encontram-se para faixas de  $V_c$  acima de 150m/min, com os valores de  $S_{sk}$  entre 0,5 e 0,6  $\mu\text{m}$ . Observa-se também que com o aumento do avanço  $f$  a partir de 0,075mm os valores de  $S_{sk}$  foram menores do que 0,1  $\mu\text{m}$ .

Na Figura 65 (b), ficou claro que neste caso que, aumentando-se o  $a_p$  e o  $f_z$ , aumenta-se os valores de  $S_{sk}$ .

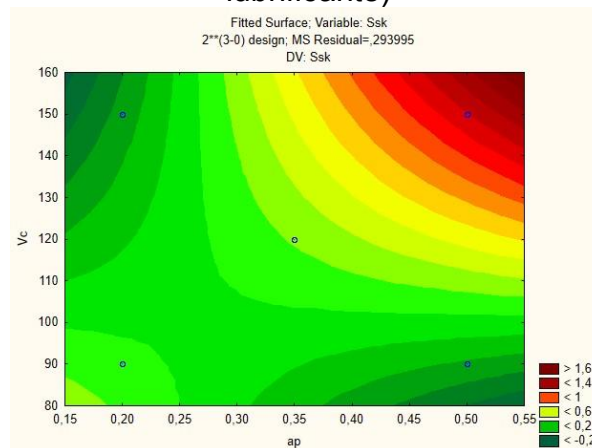
Figura 65 - Resultados das interações para  $S_{sk}$  – 3D (a)  $f_z \times v_c$ . (b)  $f_z \times a_p$  (usinagem com óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

Assim, o mais relevante foi o da Figura 66, que ilustra o comportamento do valor de  $S_{sk}$  para interação  $V_c$  e  $a_p$ . Para  $V_c$  menores do que 120m/min e  $a_p$  menores do que 0,35 mm, o valor de  $S_{sk}$  é menor do 0,6 $\mu\text{m}$ , a partir deste ponto, ele varia de 0,6 $\mu\text{m}$  a 1,6 $\mu\text{m}$  ou maiores, quando se tem  $a_p$  de 0,5mm e  $V_c$  de 160m/min.

Figura 66 - Resultados da interação para  $S_{sk}$  – 3D  $V_c$  x (usinagem com óleo lubrificante)



Fonte: Próprio autor

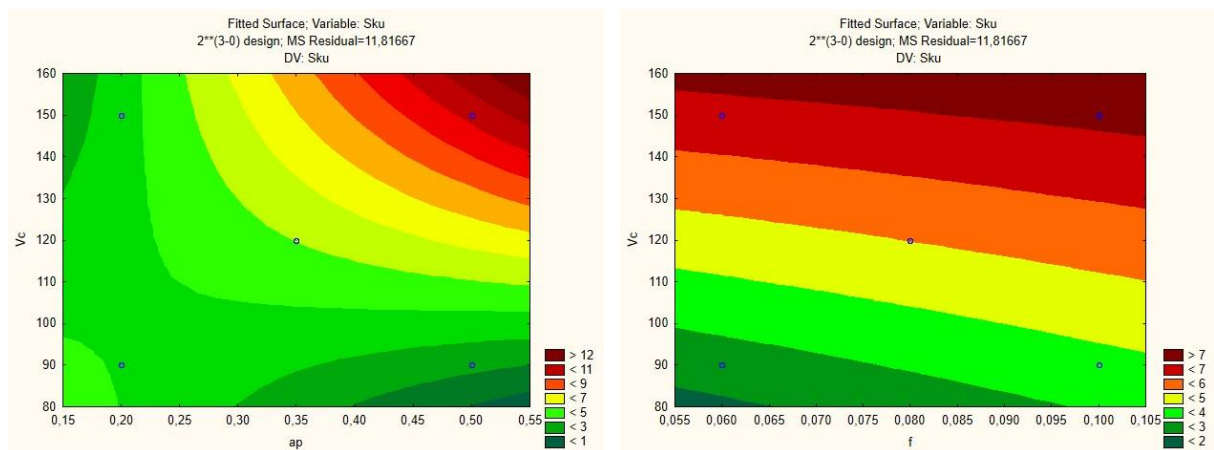
O parâmetro  $S_{ku}$ , representa a quão acentuada ou achatada é a distribuição considerando-se a altura envolvendo os picos e vales, conforme Figura 12.

Os valores de  $S_{ku}$  podem representar a capacidade da superfície de se juntar com outra superfície, porque permite analisar o contato entre dois objetos.

Observa-se na Figura 67 (a) que o valor de  $S_{ku}$  aumenta à medida que se aumenta o  $V_c$ , sendo que a partir de 130m/min obtém-se valores de  $S_{ku}$  maiores do que  $6 \mu\text{m}$ , também o  $f_z$  aumentando de 0,055 a 0,105 mm proporciona o aumento do valor de  $S_{ku}$ , fazendo este variar no mesmo intervalo de 1 a  $12 \mu\text{m}$ .

Na Figura 67 (b) fica mais evidenciado a influência do  $v_c$  na obtenção do  $S_{ku}$ . A medida que se aumenta os valores de  $v_c$  há o aumento dos valores de  $S_{ku}$

Figura 67 - Resultados das interações para  $S_{ku}$  – 3D (a)  $ap$  x  $v_c$ . (b)  $v_c$  x  $f$  (usinagem com óleo lubrificante).



(a)

(b)

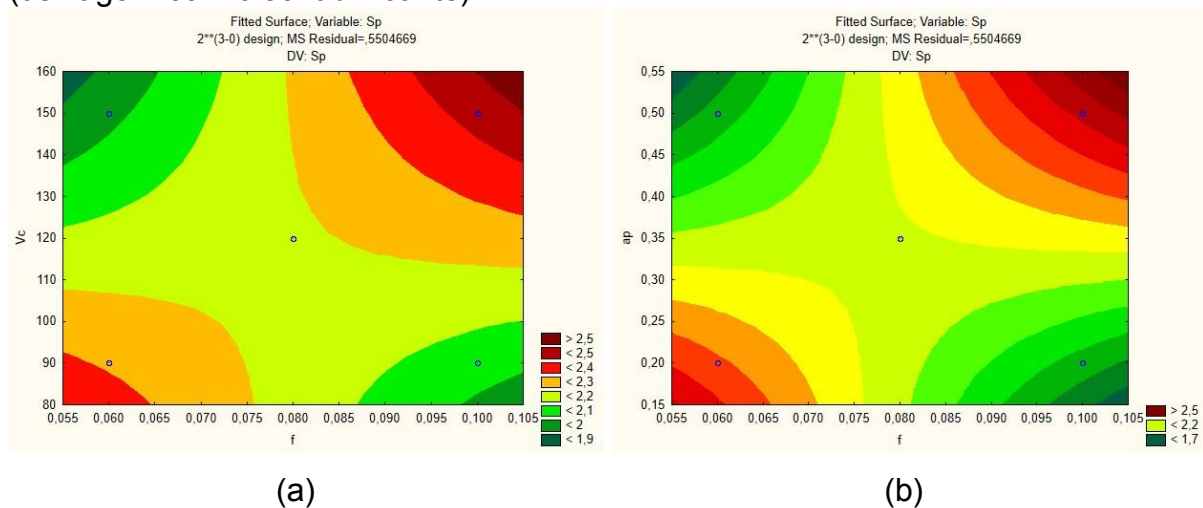
Fonte: Dados dos autores

Para o parâmetro  $S_p$ , na usinagem com óleo lubrificante, tanto para a interação  $V_c$  e  $f_z$ , como para a interação  $a_p$  e  $f_z$ , ocorreram o mesmo fenômeno apresentado na usinagem a seco, ou seja, num intervalo central de  $f$  entre 0,055 e 0,105mm/dente e  $V_c$  entre 80 e 160m/min, ocorreram os menores valores de  $S_p$ .

A particularidade observada na Figura 68 (a) foi que os menores valores de  $f_z$  na usinagem a seco predominaram entre 0,20 e 0,35 mm/dente, e  $V_c$  entre 90 e 120m/min, enquanto que na usinagem com óleo na Figura 62 (a) os valores de  $f$  apresentaram-se entre 0,075 e 0,085 mm/dente e  $V_c$  de 110 a 120 m/min.

Para a interação  $a_p$  e  $f_z$ , Figura 68 (b) o valor de  $S_p$  2,2  $\mu m$  ocorreram entre os valores de  $a_p$  de 0,30 a 0,35 mm e em  $f$  de 0,075 a 0,080 mm.

Figura 68 - Resultados das interações para  $S_p$  – 3D (a)  $f \times V_c$ . (b)  $f \times a_p$  (usinagem com óleo lubrificante)

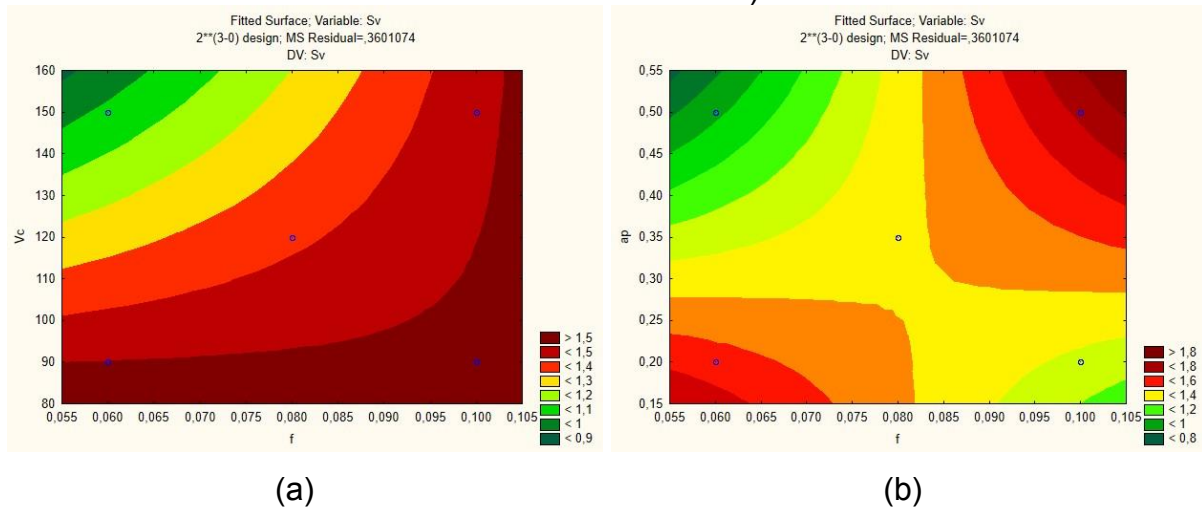


Fonte: Próprio autor

Na Figura 69 (a) observa-se os resultados das interações  $V_c$  e  $f$  para os valores de  $S_v$ . Neste, os menores valores estão para  $V_c$  acima 125 m/min e  $f$  entre 0,055 e 0,075 mm/dente. Abaixando-se o  $V_c$  há um grande aumento nos valores do  $S_v$ .

Na Figura 69 (b), a interação  $a_p$  e  $f$  ilustra que o  $a_p$  acima de 0,35mm combinado com  $f$  até 0,075 mm/dente, proporcionam os menores valores de  $S_v$ .

Figura 69 - Resultados das interações para  $S_v$  – 3D (a)  $f \times v_c$ . (b)  $f \times a_p$  (usinagem com óleo lubrificante).



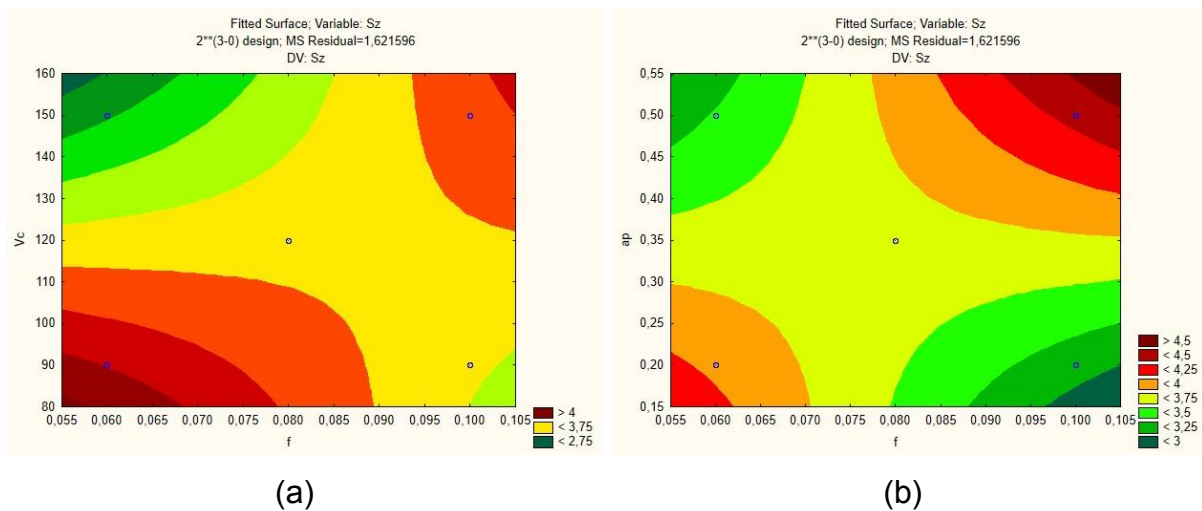
Fonte: Próprio autor

A Figura 70 (a) ilustra os resultados de  $S_z$ , como citado anteriormente na equação 4, somando-se os valores das superfícies de resposta obtidas em  $S_p$  mais  $S_v$ , obtêm-se os valores de  $S_z$ , o que é confirmado somando-se os valores apresentados nas Figuras 65 67 e 68 e comparando-se com as superfícies de respostas da Figura 63.

A exemplo dos resultados obtidos nas Figuras 65 e 66 nas interações  $V_c$  e  $f_z$ , seguem a mesma tendência na Figura 63 (a), de modo que os menores valores de  $S_z$ , apresentam-se acima de  $V_c = 125\text{m/min}$  e em  $f$  entre 0,055 e 0,08 mm/dente.

Para a interação  $a_p$  e  $f_z$ , Figura 68 (b) o valor mínimo de  $S_z$   $3\ \mu\text{m}$  ocorreram entre os valores de  $a_p$  abaixo de 0,2 mm e em  $f$  de 0,095 a 0,105 mm/dente.

Figura 70 - Resultados das interações para  $S_z$  – 3D (a)  $f \times v_c$ . (b)  $f \times a_p$  (usinagem com óleo lubrificante).

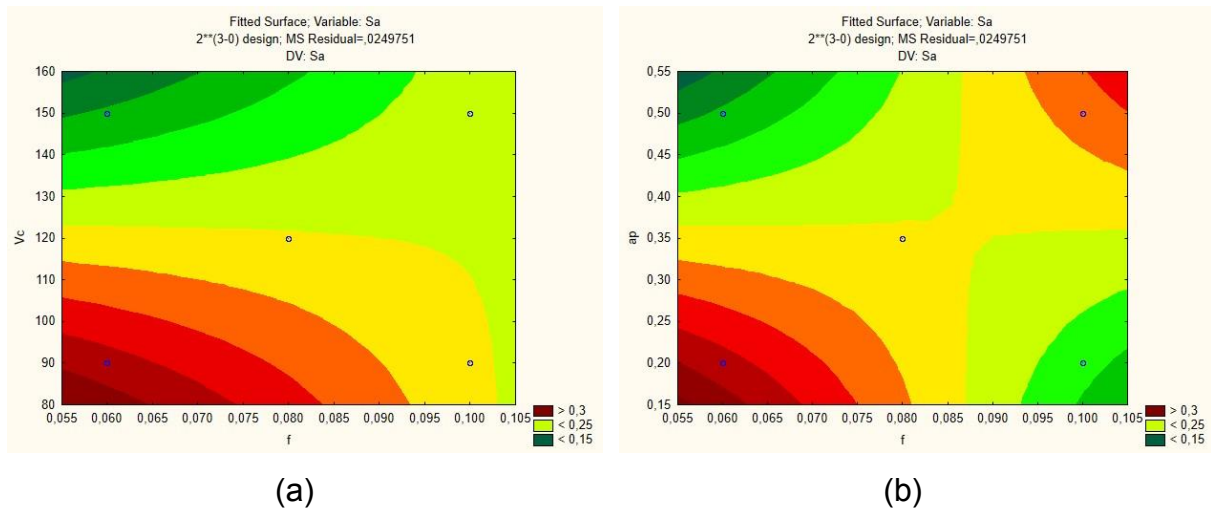


Fonte: Próprio autor

Na avaliação do parâmetro  $S_a$  da usinagem a seco, houve certa proporcionalidade nos valores, sendo que estes valores aumentaram proporcionalmente à medida que  $V_c$ ,  $f_z$  e o  $a_p$  aumentavam, no entanto, na Figura 65 (a) nas superfícies de resposta relacionadas a usinagem com óleo para o mesmo parâmetro  $S_a$ , observou-se que o valor de  $S_a$  só diminuiu em  $V_c$  acima de 130m/min com menos influência do  $f_z$ , na interação  $V_c$  e  $f_z$ .

Na Figura 71 (b) na interação  $a_p$  e  $f_z$ , não houve a proporcionalidade da usinagem a seco, sendo que o valores de  $S_a$  diminuiram para  $a_p$  de 0,45 a 0,56mm para  $f_z$  até 0,080mm. Quando se aumentou o  $f_z$  acima de 0,095 até 0,105mm mesmo com  $a_z$  abaixo de 0,25mm, houve também uma redução no valor do parâmetro  $S_a$  para faixas menores do que 0,25  $\mu\text{m}$ .

Figura 71 - Resultados das interações para  $S_a$  – 3D (a)  $f \times v_c$ . (b)  $f_z \times a_p$  (usinagem com óleo lubrificante).



Fonte: Próprio autor

**Funções de predição dos parâmetros 3D**

As funções obtidas pelas superfícies de respostas estão listadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Funções estatísticas para a predição de parâmetros 3D:  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$

Sem Lubrificante	Função matemática
$S_q$	$=,103+,003*v_c+2,929*f-,051*f*v_c+,002*ap*v_c+13,916*ap*f-,426$
$S_{sk}$	$=,107-,006*v_c+1,849*f+,025*f*v_c+,016*ap*v_c-35,589*ap*f+,843$
$S_{ku}$	$=10,473-,091*v_c-24,166*f+,409*f*v_c+,236*ap*v_c-143,541*ap*f-2,331$
$S_p$	$=9,542-,039*v_c-43,583*f+,0729*f*v_c+,120*,35*v_c+114,166*,35*f-7,399$
$S_v$	$=7,142-,027*v_c-37,145*f+,092*f*v_c+,071*ap*v_c+110,416*ap*f-5,535$
$S_z$	$=16,711-,066*v_c-80,979*f+,166*f*v_c+,192*ap*v_c+224,583*ap*f-12,947$
$S_a$	$z=,029+,003*v_c+2,591*f-,043*f*v_c+,0007*ap*v_c+10,979*ap*f-,302$
Com lubrificante	Função matemática
$S_q$	$= 2,494-,0117*v_c- 7,439*f+,07*f*v_c+,0130*ap*v_c+25,854*ap*f-1,315$
$S_{sk}$	$= 4,285-,033*v_c-24,392*f+,156*f*v_c+,0778*ap*v_c+3,637* ap*f-2,843$
$S_{ku}$	$=15,896-,078*v_c-25,042*f-,254*f*v_c+,465*ap*v_c+220,833*ap*f-22,741$
$S_p$	$=11,756-,056*v_c-71,958*f+,293*f*v_c+,095*ap*v_c+112,916*ap*f-7,049$
$S_v$	$=6,861-,0292*v_c-44,908*f+,176*f*v_c+,0305*ap*v_c+84,792*ap*f-3,725$
$S_z$	$=19,064-,096*v_c-132,604*f+,666*f*v_c+,099*ap*v_c+158,333*ap*f-8,292$
$S_a$	$=2,006-,009*v_c-14,102*f+,059*f*v_c+,0097*ap*v_c+19,354*ap*f-,995$

Fonte: Próprio autor

## **Comparativo usinagem a seco e com lubrificante.**

Comparativo das usinagens com óleo lubrificante para parâmetros 2D e 3D.

### **4.1.5 Parâmetros 2D**

Analisando-se o parâmetro 2D -  $R_a$ , observa-se que embora o parâmetro  $f_z$  tenha sido o mais influente nos dois ensaios, com 95% de confiança, na usinagem com lubrificante houve mais evidência da sua influência, tendo em vista que o lubrificante facilita o escoamento do cavaco, proporcionando menores forças e menores valores de rugosidade.

Para o parâmetro  $R_t$ , na usinagem a seco, o parâmetro  $a_p$ , foi o mais influente com 95% de confiança, enquanto que no ensaio com lubrificante o  $f_z$  foi o mais influente atingindo com sobra o intervalo de 95% de confiança.

Para o parâmetro  $R_q$ , o  $f_z$  foi o mais influente no ensaio a seco, com 95% de confiança, no ensaio com lubrificante não houve predominância de nenhum parâmetro dentro do intervalo de 95% de confiança adotado.

### **4.1.6 Parâmetros 3D**

Para o parâmetro  $S_q$  na usinagem a seco, a interação  $f$  e  $a_p$  foi a mais influente, atingindo 95% de confiança, na usinagem com óleo lubrificante, embora o gráfico mostre maior influência, não atingiu o intervalo de 95% de confiança.

Para o parâmetro  $S_{sk}$  na usinagem a seco o  $a_p$  foi o mais influente com 95% de confiança, no ensaio com lubrificante a interação  $v_c$  e  $a_p$  foi a mais influente com 95% de confiança.

Para o parâmetro  $S_{ku}$  os parâmetros  $a_p$  seguido da interação  $v_c$  e  $a_p$  foram os mais influentes na obtenção do  $S_{ku}$  para usinagem a seco, dentro de intervalo de 95% de confiança, na usinagem com óleo lubrificante a interação  $v_c$  e  $a_p$  seguido de  $v_c$  foram mais influentes dentro de intervalo de 95% de confiança.

Para o parâmetro  $S_p$  na usinagem a seco, a interação  $v_c$  e  $a_p$  foi a mais influente, assim como na usinagem com óleo lubrificante.

Para o parâmetro  $S_v$  não houve parâmetros influentes dentro do intervalo de 95% de confiança.



Para o parâmetro  $S_z$  na usinagem a seco, a interação  $V_c$  e o  $a_p$  a mais influente, enquanto que na usinagem com óleo não houve influência com 95% de confiança.

Para o parâmetro  $S_a$  na usinagem a seco a interação entre  $f_z$  e  $a_p$  foi influente dentro do intervalo de 95% de confiança, mas não houve influência significativa na usinagem com óleo lubrificante.

Na análise da usinagem a seco o parâmetro  $S_{ku}$  representado nas Figuras 42 (a) e 2 (b), pode-se observar que as tendências foram semelhantes ao mesmo parâmetro na usinagem com lubrificante representados nas figuras 61 (a) e 61 (b), sendo o  $V_c$  o parâmetro de corte mais influente na obtenção da rugosidade  $S_{ku}$ , ou seja, quanto maior o  $V_c$ , maior o valor de  $S_{ku}$ , e com pouca influência de  $f$ .

## 5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do acabamento superficial no processo de fresamento da liga de titânio aeroespacial Ti-6Al-4V utilizando-se o fluido de corte possibilitou obter melhores resultados de acabamento comparado com resultados em relação ao processo de usinagem a seco, para predição de um planejamento fatorial  $2^3$ .

O fator que mais influenciou a rugosidade  $R_a$  na usinagem a seco foi o avanço de corte ( $f_z$ ). Logo em seguida, apenas um pouco abaixo, a interação entre o avanço ( $f_z$ ) e a profundidade ( $a_p$ ) também influenciaram o  $R_a$ ; mas, num intervalo um pouco abaixo de 95% de confiança. Na usinagem com fluido lubrificante, utilizando-se as mesmas condições de corte, ficou consolidada a influência do avanço ( $f_z$ ) no parâmetro  $R_a$ , pois os resultados corroboraram fortemente com a literatura.

Para o parâmetro  $R_t$  na usinagem a seco a profundidade  $a_p$  foi o parâmetro de maior influência dentro do intervalo de 95% de confiança, seguido do avanço ( $f_z$ ). Na usinagem com lubrificante, utilizando-se as mesmas condições de corte, houve uma inversão, sendo que o avanço ( $f_z$ ) passou a ser o parâmetro de maior influência, inclusive dentro do intervalo de 95% de confiança. A profundidade  $a_p$  passou a ser o segundo parâmetro de maior influência, mas abaixo dos 95% de confiança.

Para o parâmetro  $R_q$  na usinagem a seco, o avanço ( $f_z$ ) e a interação ( $V_c$ ) e ( $f_z$ ) influenciaram dentro do intervalo de 95% de confiança. Bem próximo, a interação ( $f_z$ ) e ( $a_p$ ) também tiveram muita influência, mas um pouco abaixo do intervalo de confiança. Na usinagem com óleo, com as mesmas condições de corte, a interação do parâmetros ( $f_z$ ) e ( $a_p$ ), depois o ( $V_c$ ) e depois ( $f_z$ ), influenciaram igualmente os valores de  $R_q$ .

Em uma análise geral, baseado nos gráficos gerados sobre as superfícies de respostas, pode-se concluir que:

- a) Utilizando-se lubrificante, fica evidenciado a influência do avanço, e em segundo lugar a profundidade de corte na obtenção do  $R_a$ , pois menores avanços e menores profundidades produzem menores rugosidades.
- b) Da mesma forma, menores avanços e menores profundidades produzem menores rugosidades  $R_t$ .
- c) No parâmetro  $R_q$  menores avanços e menores profundidades e maiores velocidades de corte proporcionam menores valores de rugosidade  $R_q$ .
- d) Comparando-se o parâmetro de rugosidade  $S_q$  na usinagem a seco e na usinagem com óleo, foi possível comprovar que a seco ainda há influência do avanço  $f_z$ , mas apenas na interação  $f_z$  e  $a_p$  houve comprovação da influência com 95% de confiança.
- e) Na usinagem a óleo não foi possível a comprovação da influência do  $f_z$  com 95% de confiança para nenhum parâmetro, no entanto, a interação  $f_z$  e  $a_p$  mantiveram-se como mais influentes na usinagem com óleo lubrificante.
- f) Sabe-se que  $S_q$  é a expansão do parâmetro  $R_q$ , assim houve diferença neste estudo em relação ao avanço  $f_z$  como o parâmetro mais influente na formação dos valores da rugosidade, sendo que no parâmetro 2D -  $R_q$ ,  $f$  foi o mais influente com 95% de confiança na usinagem a seco, e não houve influência significativa de nenhum parâmetro na usinagem com lubrificante, já para os parâmetros 3D -  $S_q$ , a interação  $f$  e  $a_p$  que atingiram maior influência com 95% de confiança.
- g) Para o parâmetro  $S_z$  na usinagem a seco foi relevante observar para este levantamento que a profundidade de corte  $a_p$  esteve como o parâmetro mais influente na obtenção do  $S_z$ , revelando sua importância na geração de picos e vales, ao contrário do  $f_z$  como era imaginado.

- h) Para o parâmetro  $S_z$  na usinagem com óleo, não foi possível comprovar a influência de nenhum para na formação do valor deste parâmetro.
- i) Para o parâmetro  $S_a$ , convém mencionar que ele é uma expansão do parâmetro  $R_a$ , sendo que a estatística mostrou o que é conhecido na literatura que o  $f_z$  é o mais influente, No entanto, o  $S_a$  apresentou a interação  $f_z$  e  $a_p$  como mais influente nos resultados para usinagem a seco.
- j) Na usinagem com óleo lubrificante, não foi possível confirmar a influência de nenhum parâmetro de corte como mais influente com 95% de confiança.

Com base nos parâmetros de corte aplicados neste estudo, nota-se que em usinagem a seco, há mais influencia da maioria destes parâmetros, mas para usinagem a óleo houve dificuldade de detectar qual era o que mais influenciava na maioria dos resultados e combinações.

A presença de fluidos de corte na região de formação de cavacos também afeta a temperatura na região. Agindo como lubrificante, o fluido de corte contribui para reduzir o atrito e a área de contato cavaco-ferramenta e sua eficiência vai depender da habilidade de penetrar na interface cavaco ferramenta no pequeno período de tempo disponível e de formar um filme com a resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material da peça.

A predição da rugosidade superficial 2D e 3D por meio de dados extraídos de um processo, empiricamente, irá proporcionar melhor assertividade na especificação dos parâmetros de usinagem, garantindo melhor qualidade e produtividade. As funções geradas foram testadas e apresentaram valores coerentes com os valores médios levantados.

Os resultados obtidos neste estudo poderão ser válidos para condições de usinagem semelhantes às realizadas neste estudo. Para aplicação destas funções devem ser consideradas a grande gama de variáveis inerentes às particularidades de cada processo, e possivelmente, haja a necessidade da realização de novos ensaios e novo levantamento de dados.

## 6. PERSPECTIVAS FUTURAS

Para continuidade da pesquisa, sugere-se algumas possibilidades, como:

- a) Utilização de novos materiais com baixa usinabilidade para diferentes condições de usinagem aumentando-se a possibilidade de maior faixa de predição;
- b) Avaliação do desgaste da ferramenta;
- c) Avaliação da integridade superficial;
- d) Utilização de estratégias diferenciadas com aplicação de diferentes insertos.
- e) Utilização de outros tipos de refrigeração ou lubrificação durante a usinagem.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 4287:2002, A. B. DE N. T. (ABNT). N. I. **Especificação geométrica do Produto (GPS) - Rugosidade: Método do Perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** Rio de Janeiro: ABNT, , 2002.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. DOS S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões.** Edgard Blu ed. São Paulo: [s.n.].
- AGUIAR, M. M. DE. **Análise da influência das condições de corte sobre o fresamento em acabamento de aços endurecidos usando altas velocidades.** [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2012.
- ALMEIDA, S. H. L. R. et al. **Modelo Numerico Experimental da Rugosidade no Fresamento Frontal de Acabamento do Aço AISI 4140 Endurecido.** Lisboa: 2015
- ANTONIALLI, A. I. S. **Uma contribuição ao fresamento frontal da liga de titânio Ti-6Al-4V.** p. 137, 2009.
- ASTM. ASTM B348 Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billets. **ASTM International Standards**, v. B348, p. 8, 2013.
- ASTM B265. Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip , Sheet , and Plate 1. **ASTM International**, p. 1–10, 2009.
- ASTM F136-08. Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications. **ASTM International**, p. 6–9, 1875.
- ASTM F67. Standard specification for unalloyed titanium, for surgical implant applications. **ASTM International**, p. 1–5, 2006.
- BARBOSA, L. W. G. et al. **Usinabilidade do titânio e suas ligas : uma revisão teórica.** n. November, p. 6, 23 nov. 2018.
- ÇAKĪR, O. et al. Selection of cutting fluids in machining processes. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 25, n. 2, p. 99–102, 2007.
- CALLISTER JR., W. D. **Ciencia e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CHIMEZIE, U.; GURRAM, A. S. **Wetting properties of stainless steel surfaces.**

2016.

COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. **Technometrics**, v. 35, n. 1, p. 1–12, 1993.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8 edição ed. São Paulo: [s.n.].

DONACHIE, M. J. **Titanium - A Technical Guide**. [s.l: s.n.]. v. 99

DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive study of parameters for characterising three-Dimensional Surface Topography III: Parameters for characterising amplitude and some functional Properties. **Wear**, v. 178, p. 29–43, 1994.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M. Titanium alloys and their machinability - a review. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 13, 1995.

FANG, N.; PAI, P. S. A new computational intelligence approach to predicting the machined surface roughness in metal machining. **International Journal of Machine Learning and Computing**, v. 8, n. 6, p. 524–529, 2018.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

GARCÍA-MARTÍNEZ, E. et al. Sustainable Lubrication Methods for the Machining of Titanium Alloys: An Overview. **MDPI- Materials**, 2019.

GONZÁLEZ, R. V. B. **Mitutoyo Sul Americana**. São: [s.n.].

INÁCIO, R. H. **Efeitos de estratégias de corte no fresamento tangencial : uma análise na liga de titânio Ti-6Al-4V**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2017.

ISO 25178. **Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface Texture: Area - Part 2: Terms Definitions and Surfaces Texture Parameters**. (I. O. for Standardization, Ed.)Geneva: 2012

JUNIOR, J. P. F. **Rugosidade Superficial**. São Paulo: Mitutoyo, 2002.

KYOCERA-COMPONENTES. **kyocera-componentes.com.br**. Disponível em: <[https://www.kyocera-componentes.com.br/catalog/GENERAL\\_CATALOG\\_2021\\_2022.pdf](https://www.kyocera-componentes.com.br/catalog/GENERAL_CATALOG_2021_2022.pdf)>. Acesso em: 9 set. 2020.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3. ed. Arizona: [s.n.].

MOSQUERA, M. E. O. **ESTUDO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE USANDO SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO NA PRESENÇA DE DADOS NÃO GAUSSIANOS**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2017.

OLYMPUS. **Medição da rugosidade de superfícies - Parâmetros**. Disponível em: <[https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms\[focus\]=023](https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms[focus]=023)>. Acesso em: 12 abr. 2021.

PIRES, B. J. **Estudo das forças , vibrações e desgaste das ferramentas no fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V**. [s.l: s.n.].

POLISHETTY, A. et al. A preliminary assessment of machinability of titanium alloy Ti 6Al 4V during thin wall machining using trochoidal milling. **Procedia Engineering**, v. 97, n. January 2015, p. 357–364, 2014.

RESEARCH, K. INTERNAL. Introduction to Surface Roughness Measurement. **Keyence**, p. 2–23, 2012.

SEDLAČEK, M.; PODGORNIK, B.; VIŽINTIN, J. Correlation between standard roughness parameters skewness and kurtosis and tribological behaviour of contact surfaces. **Tribology International**, v. 48, p. 102–112, 2012.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 6. ed. New York: In the United States By Oxford University Pres, 1984.

TABENKIN, A. **Surface Finish: A Machinist's Tool. A Design Necessity**.

TAPMATIC QUIMATIC. **Quimatic.com.br**. Disponível em: <<https://www.quimatic.com.br/produtos/usinagem/super-fluido-3/>>.

TELECURSO. Parâmetros de rugosidade. **Curso Profissionalizante. Metrologia.**, p. 8, 1986.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Woburn, MA, USA: Elsevier, 2000.

VINER BRASIL. **vbtec.com.br**. Disponível em: <<http://www.vbtec.com.br/site/index.php/produtos/titanio/grade-5.html>>. Acesso em:

9 set. 2020.

WARLIMONT, H. **Titanium and titanium alloys**. [s.l: s.n.].

ZHONG, C. et al. Laser metal deposition of Ti6Al4V-A brief review. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 3, p. 1–12, 2020.



## Apêndice A- Medições 3D usinagem a seco

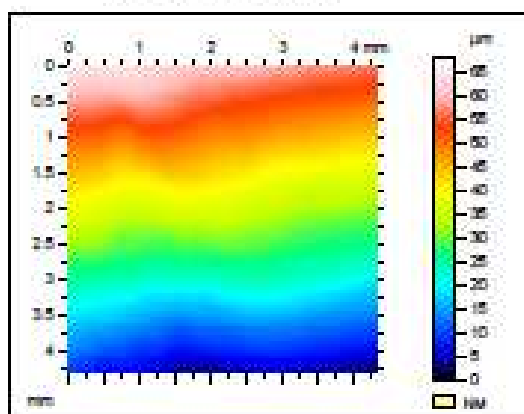
Ti6Al4V\_Seco

Canal 01

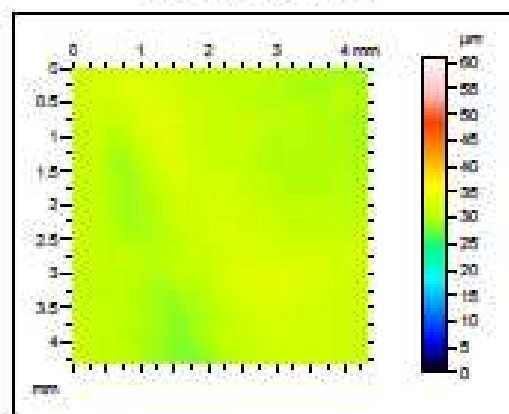
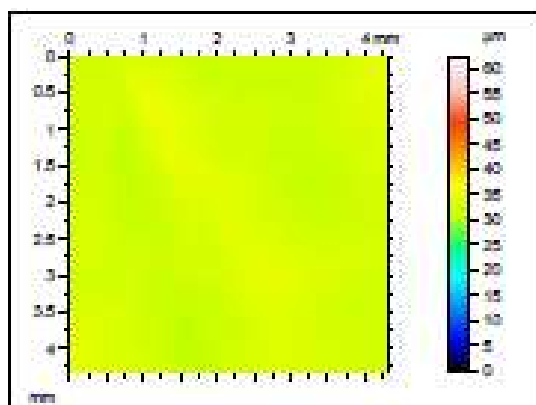
Lente 20x

Cutoff 0,8 mm

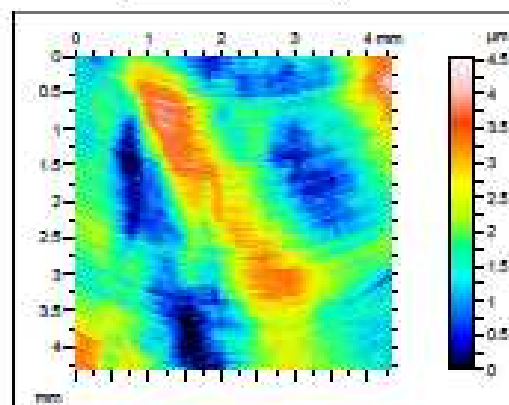
Superfície coletada



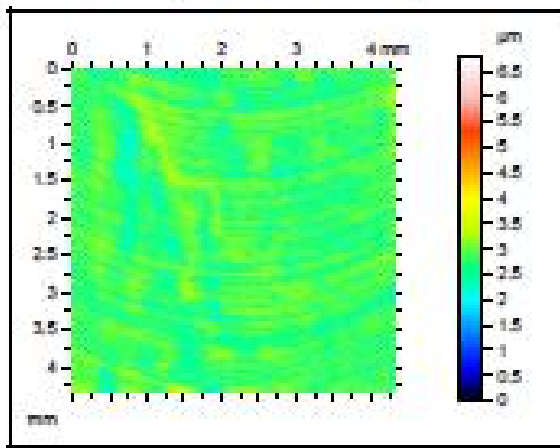
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

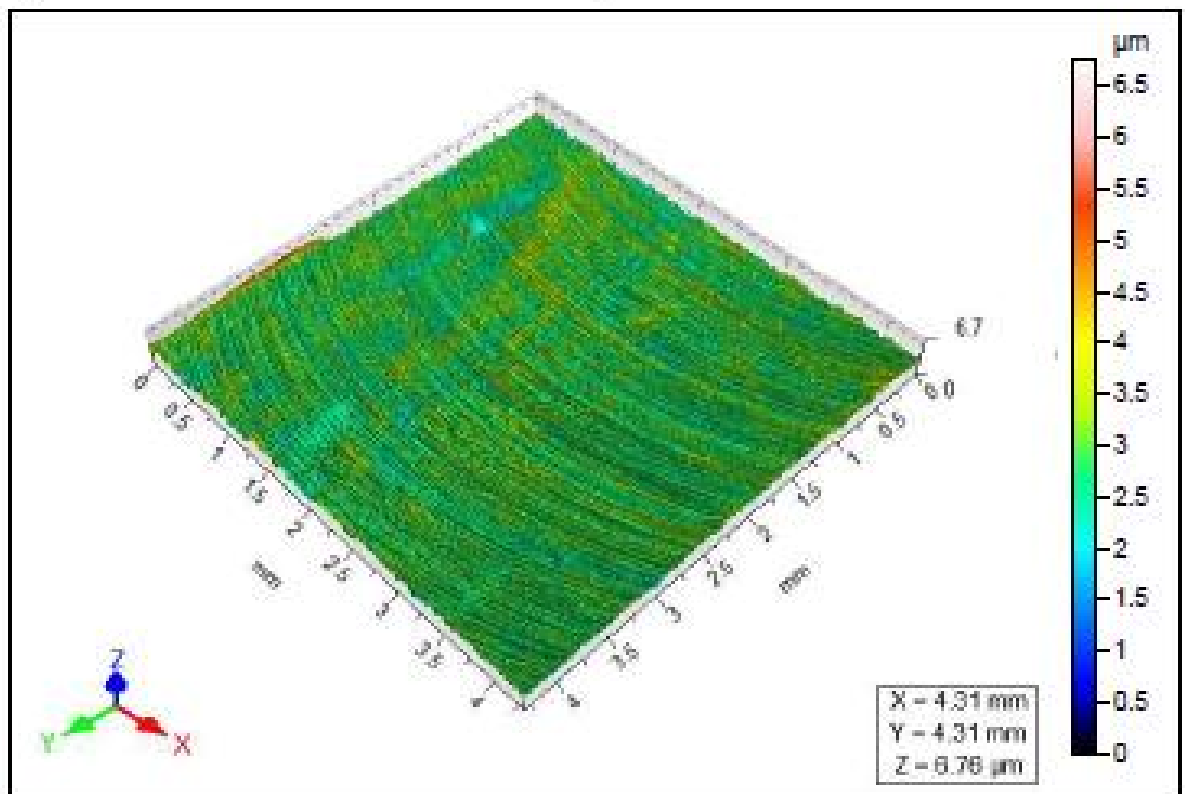
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.314	µm
Ssk	0.0319	
Sku	3.68	
Sp	3.98	µm
Sv	2.80	µm
Sz	6.78	µm
Sa	0.249	µm

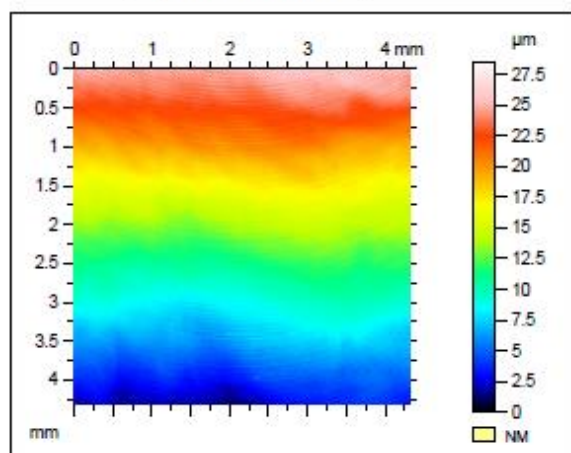


## Ti6Al4V\_Seco

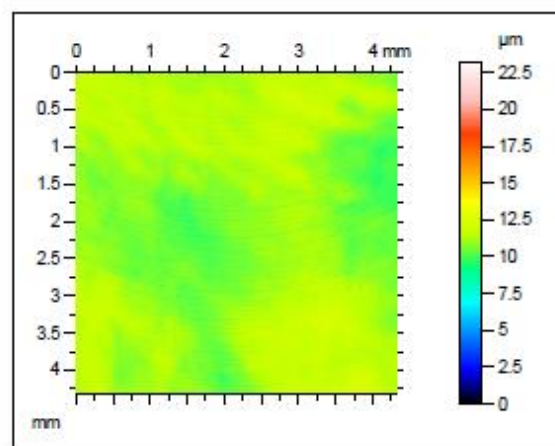
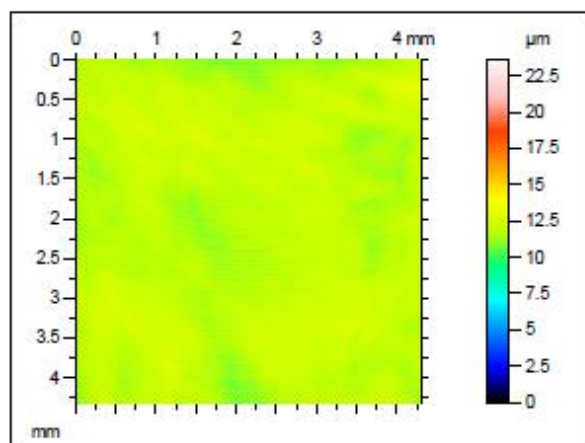
Canal 02

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

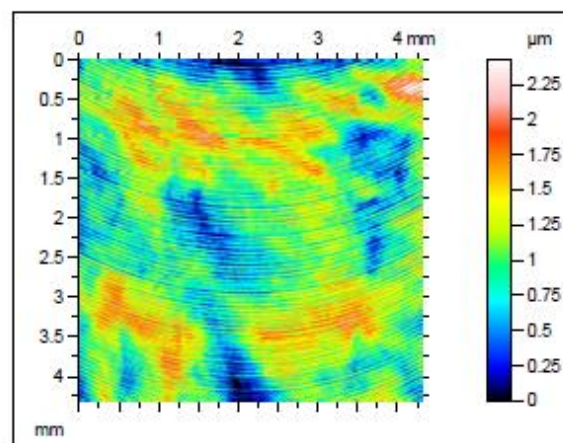
Superfície coletada



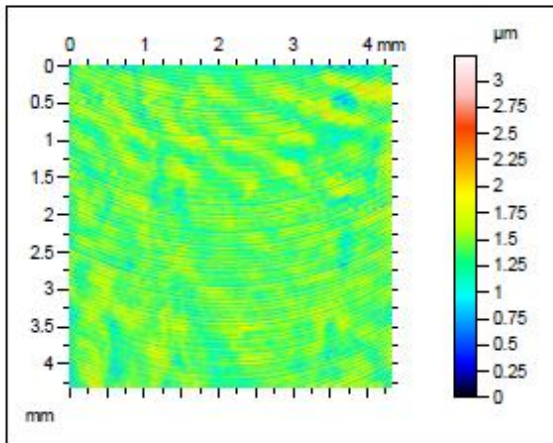
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

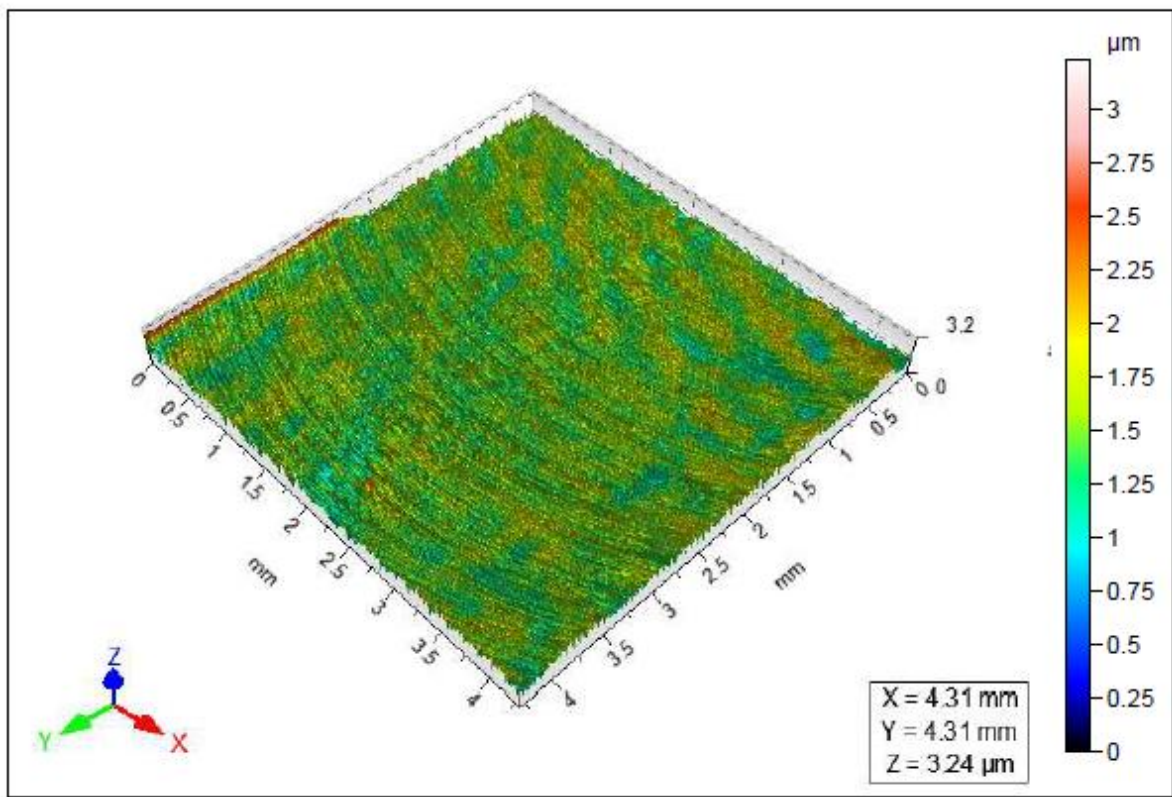
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.268	μm
Ssk	-0.0659	
Sku	3.26	
Sp	1.84	μm
Sv	1.40	μm
Sz	3.24	μm
Sa	0.212	μm

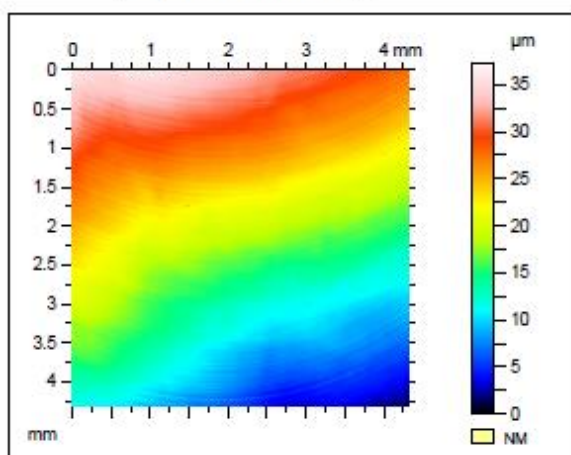


Ti6Al4V\_Seco

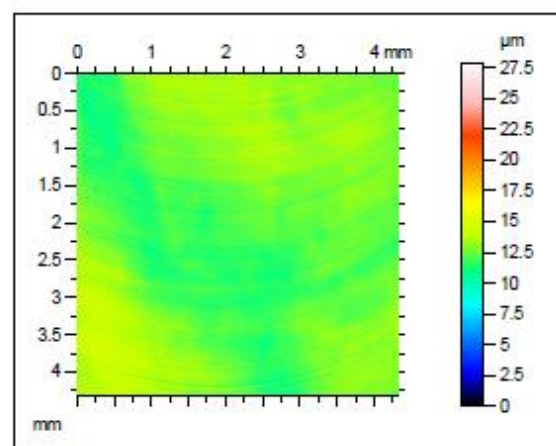
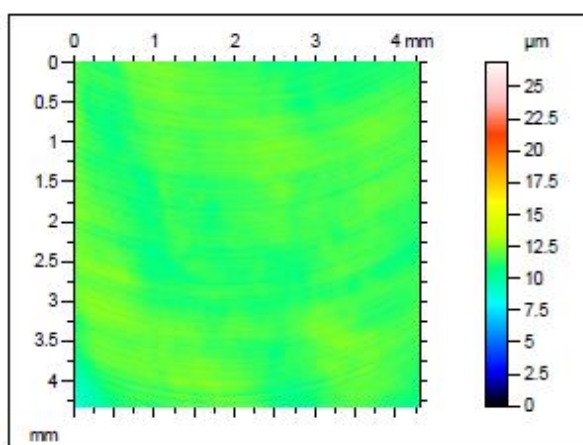
Canal 03

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

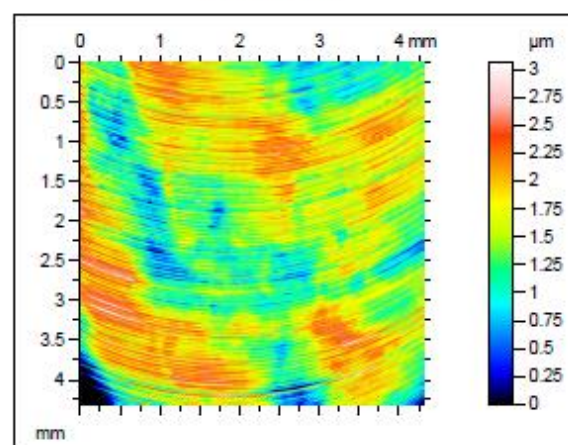
Superfície coletada



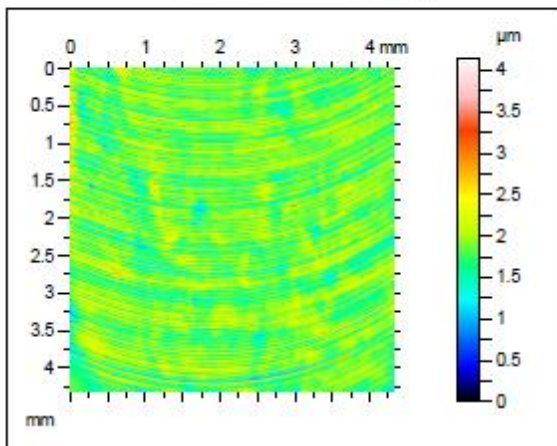
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

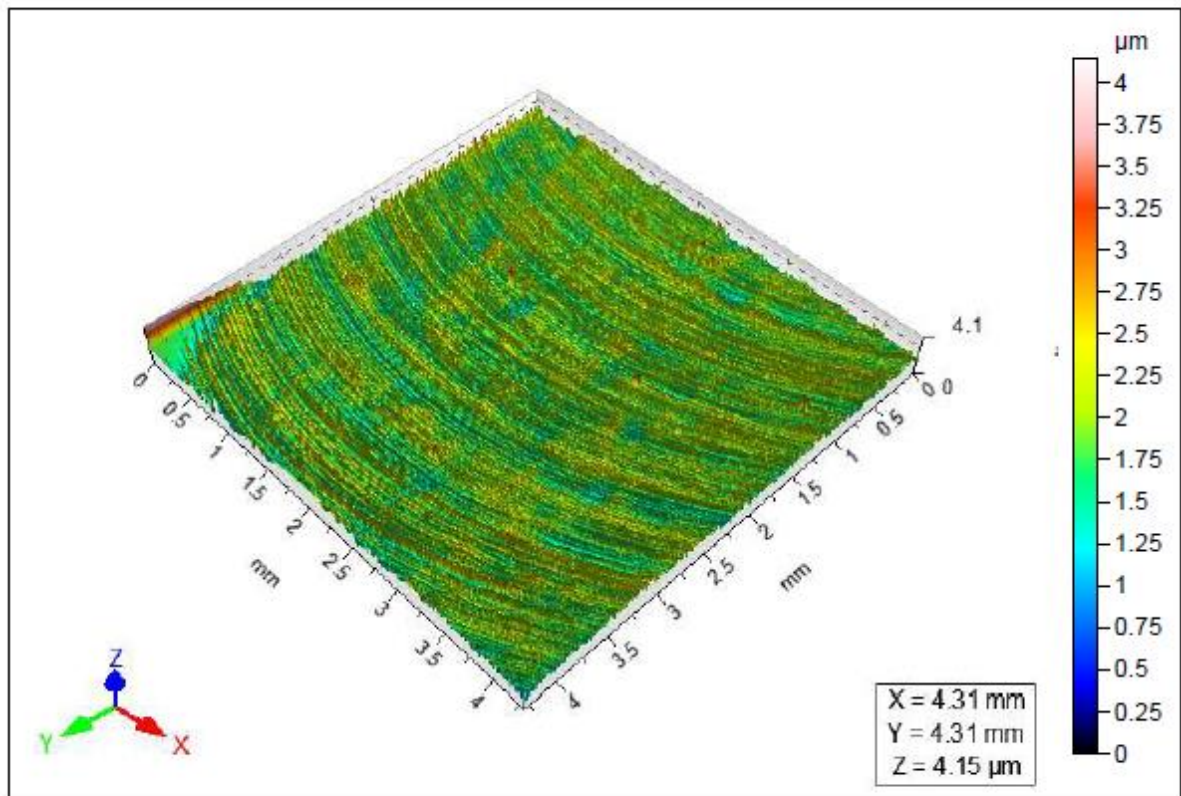
Thresholding



Filtro Gaussiano



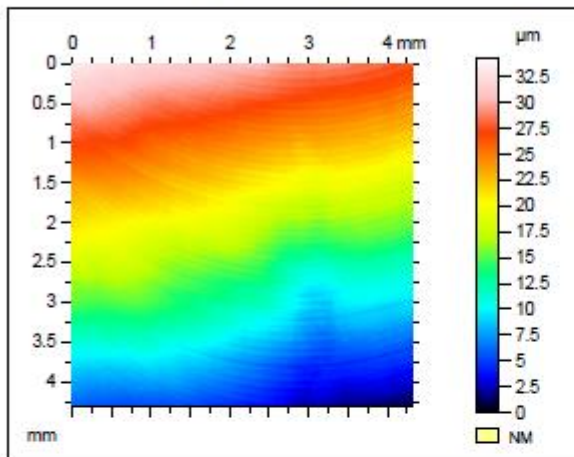
ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.274	µm
Ssk	0.114	
Sku	3.92	
Sp	2.29	µm
Sv	1.88	µm
Sz	4.15	µm
Sa	0.213	µm



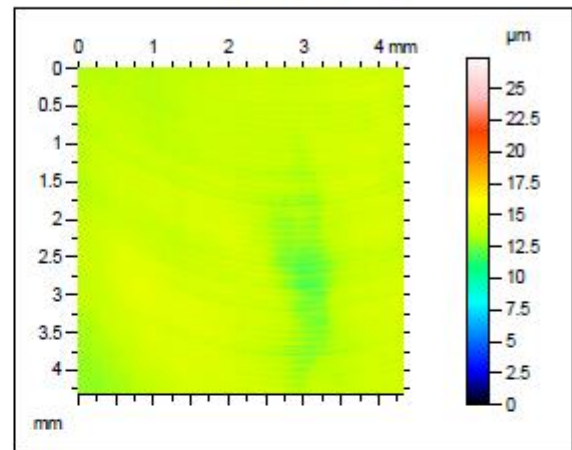
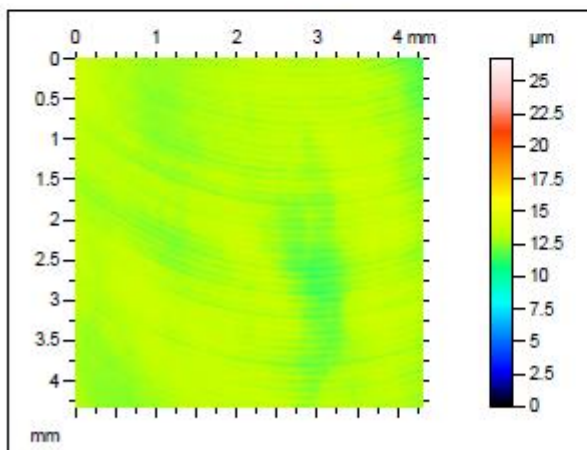
## Canal 04

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

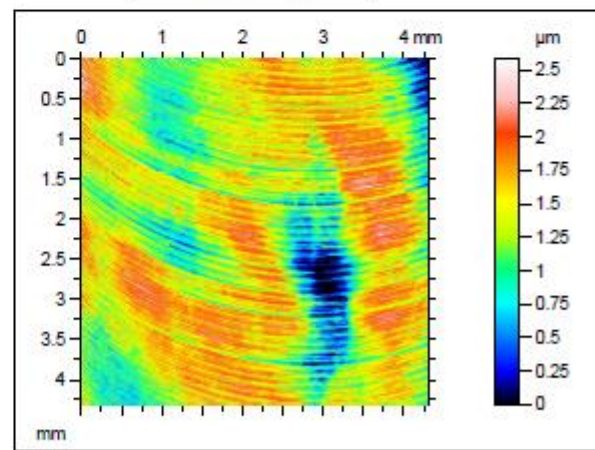
Superfície coletada



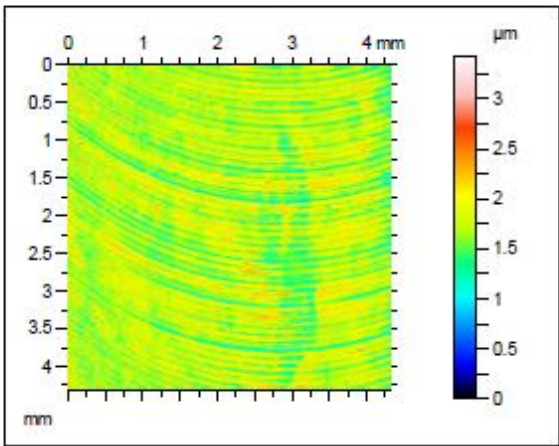
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

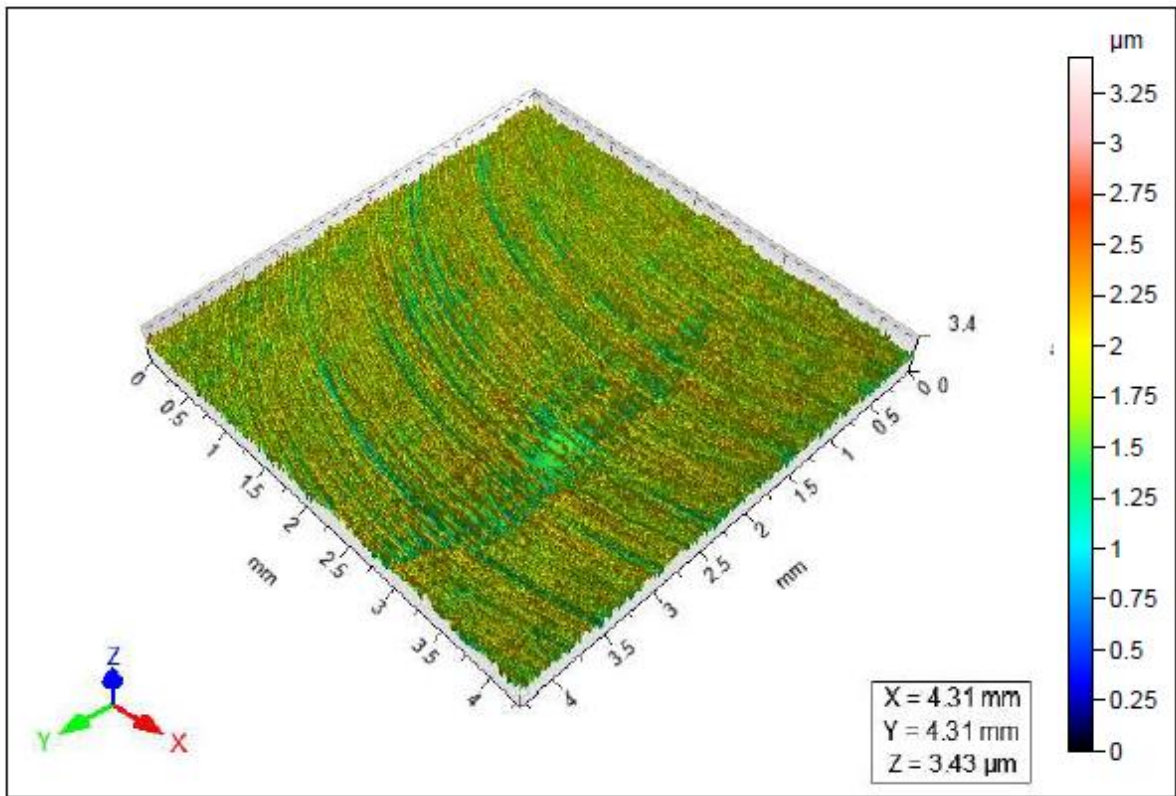
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.248	μm
Ssk	-0.146	
Sku	3.25	
Sp	1.70	μm
Sv	1.73	μm
Sz	3.43	μm
Sa	0.195	μm



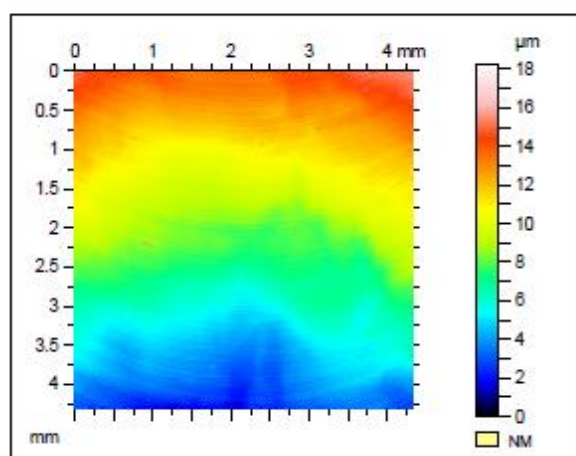


## Ti6Al4V\_Seco

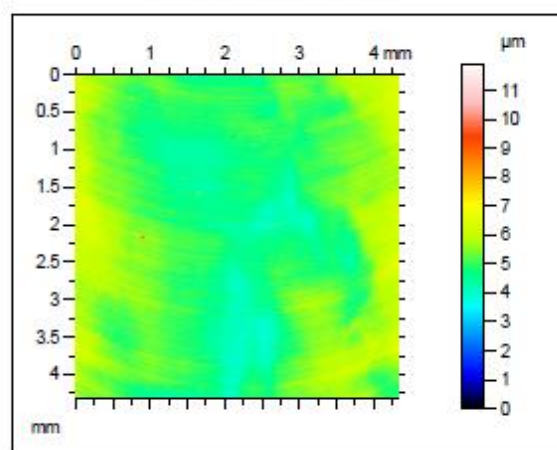
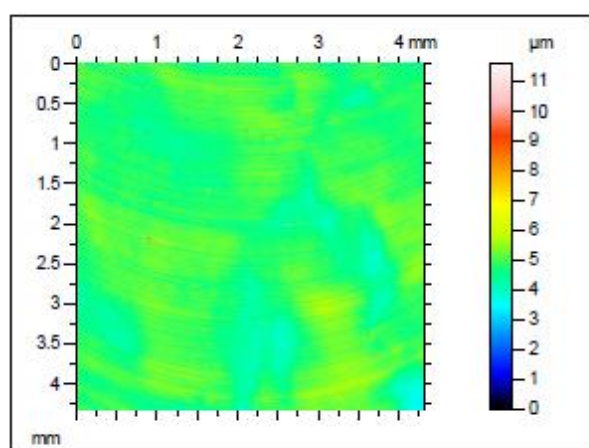
Canal 05

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

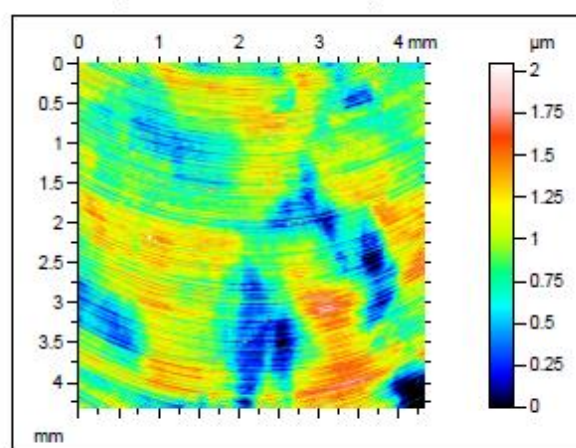
Superfície coletada



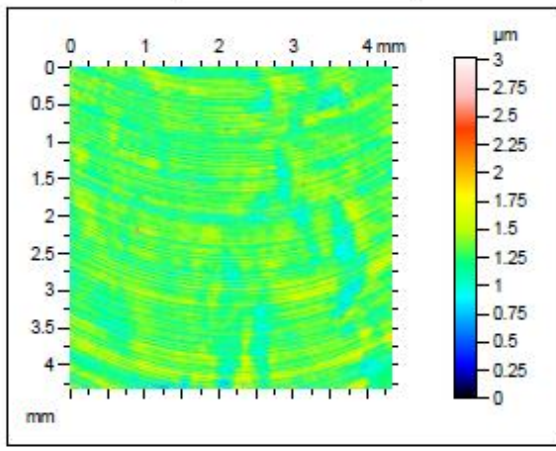
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

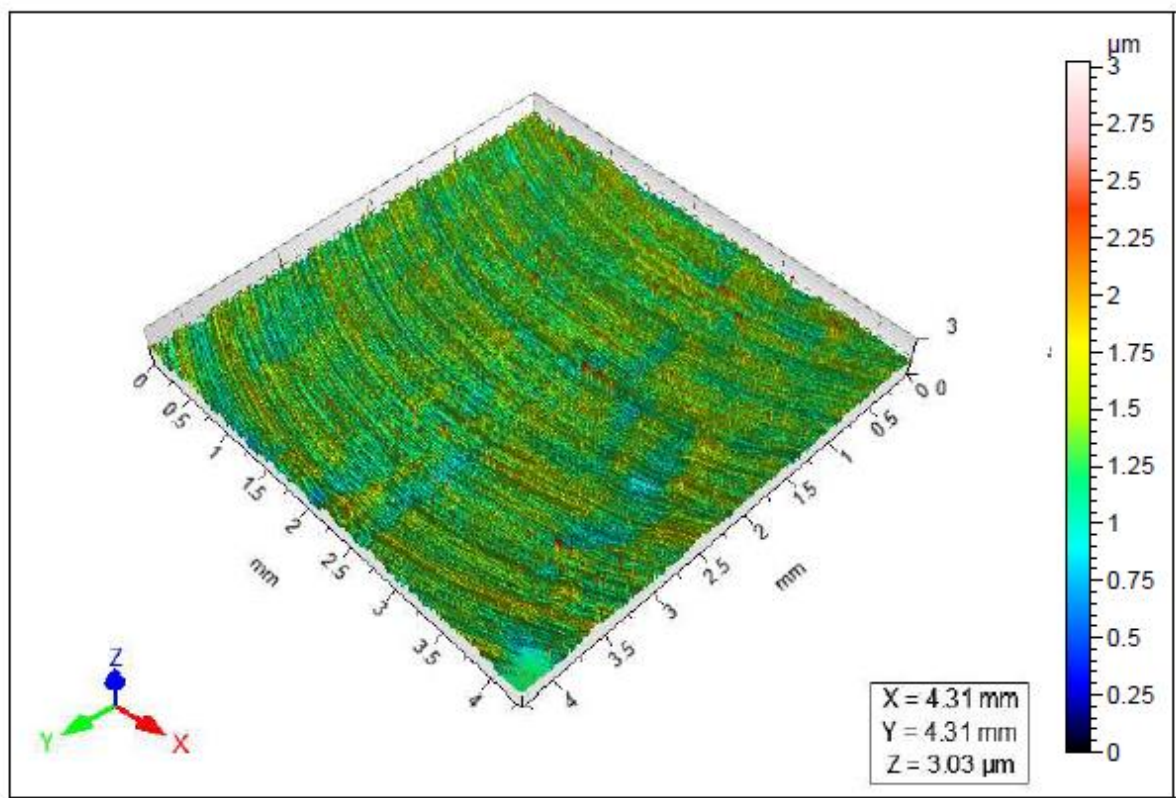
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.188	μm
Ssk	0.536	
Sku	5.46	
Sp	1.74	μm
Sv	1.29	μm
Sz	3.03	μm
Sa	0.144	μm

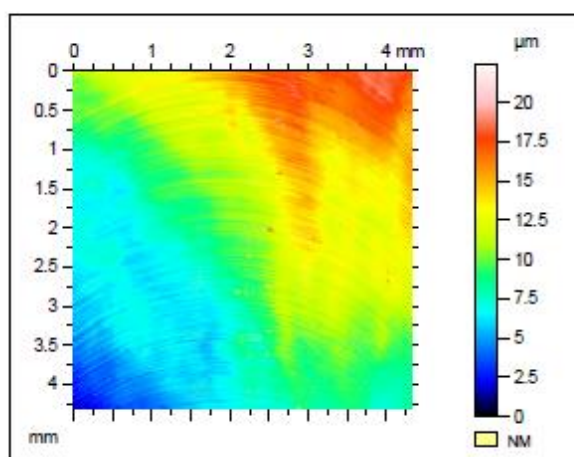


## Ti6Al4V\_Seco

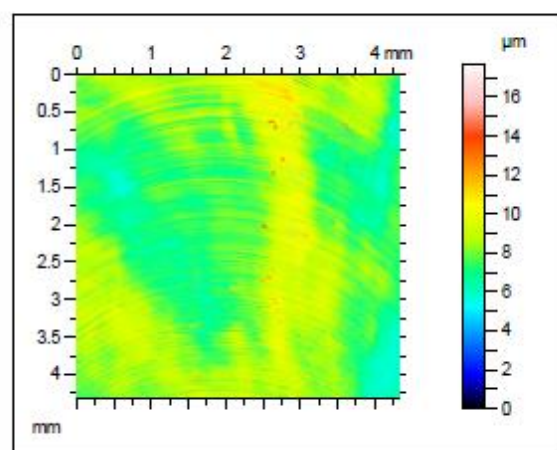
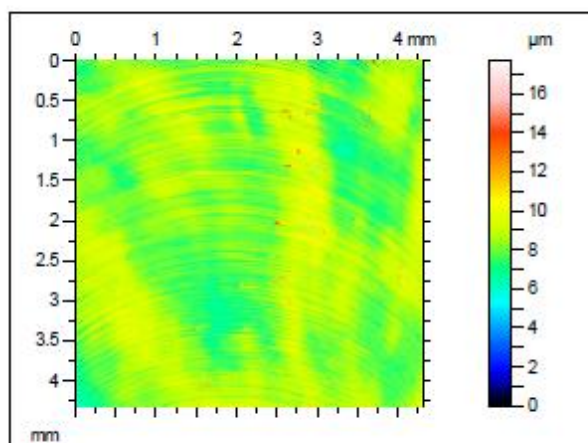
Canal 06

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

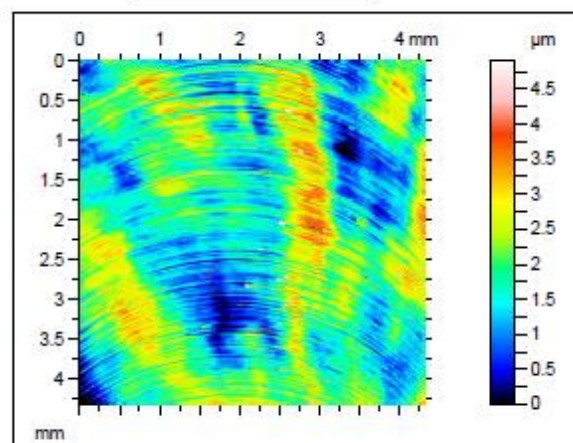
Superfície coletada



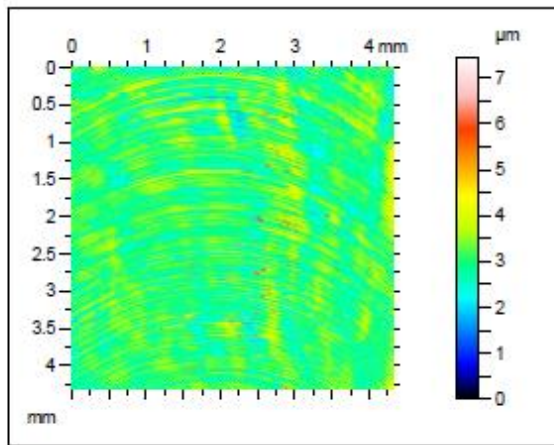
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

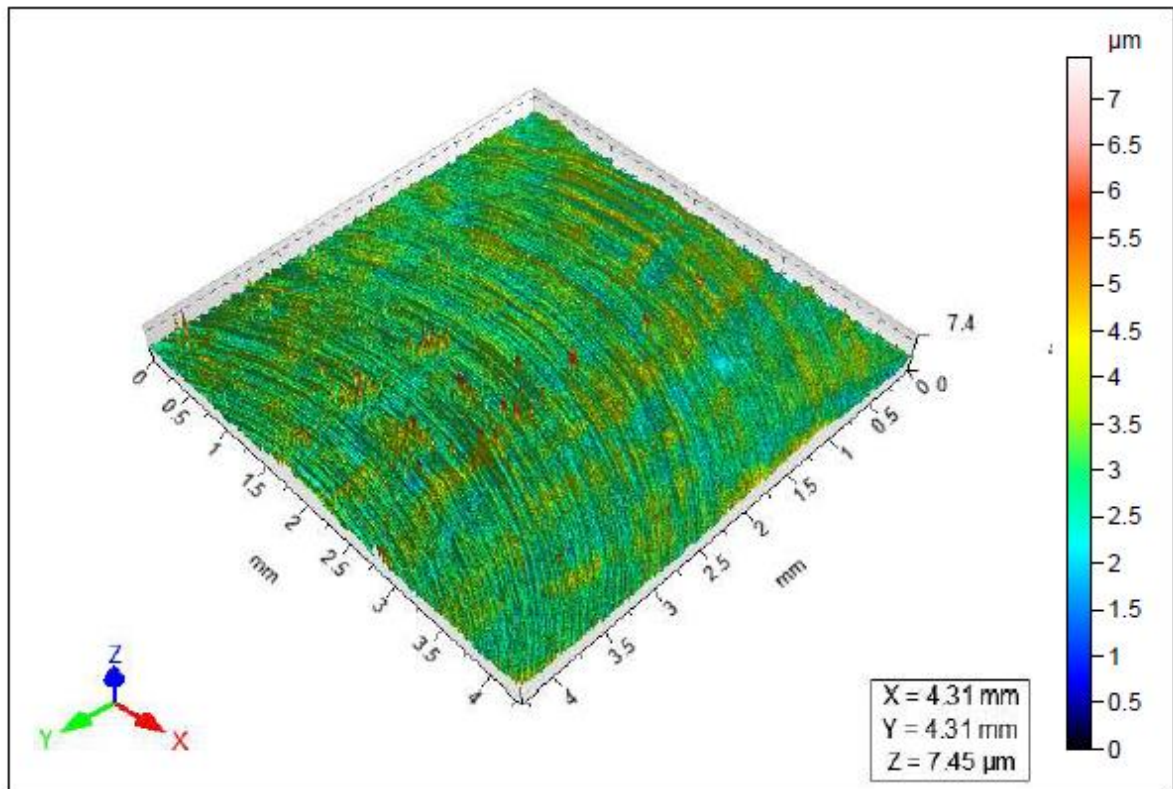
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.446	μm
Ssk	0.746	
Sku	8.04	
Sp	4.41	μm
Sv	3.04	μm
Sz	7.45	μm
Sa	0.332	μm

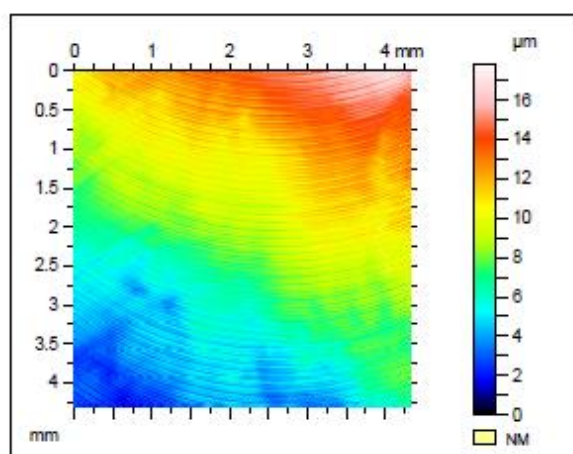


## Ti6Al4V\_Seco

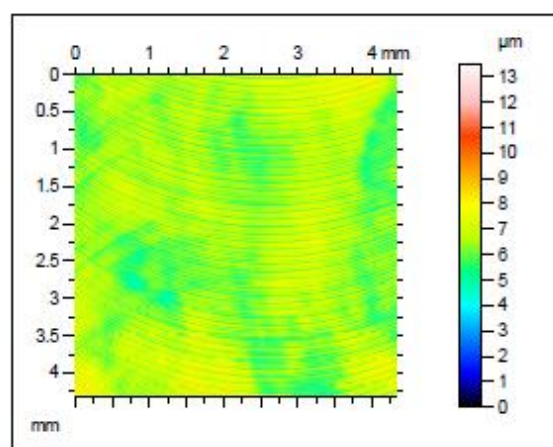
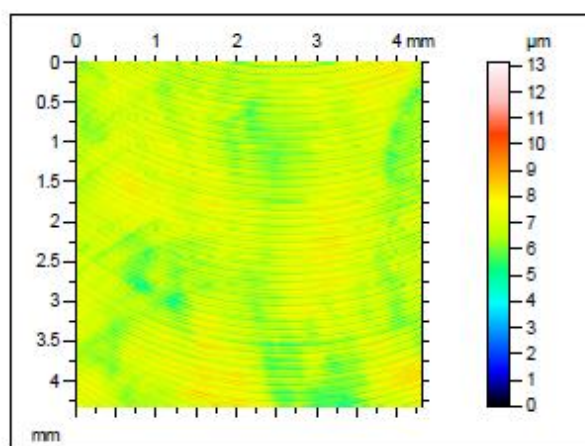
Canal 07

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

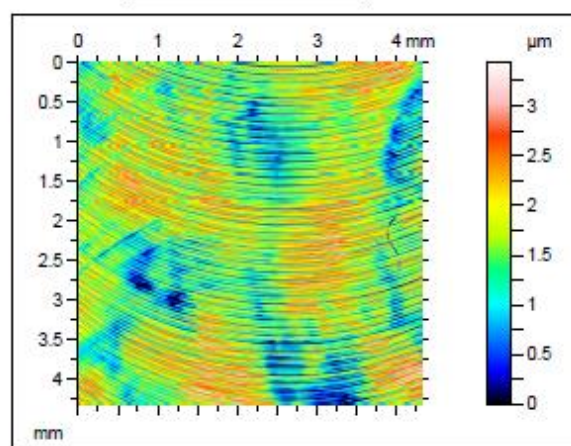
Superfície coletada



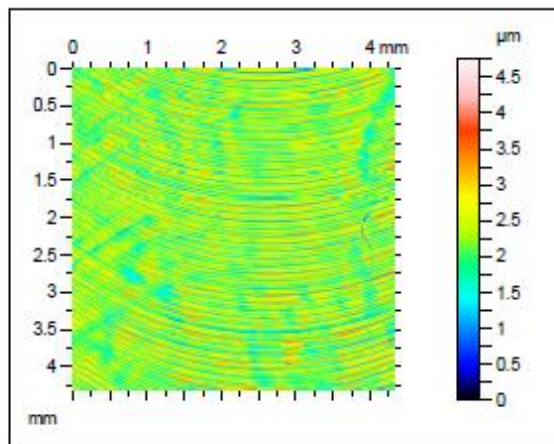
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

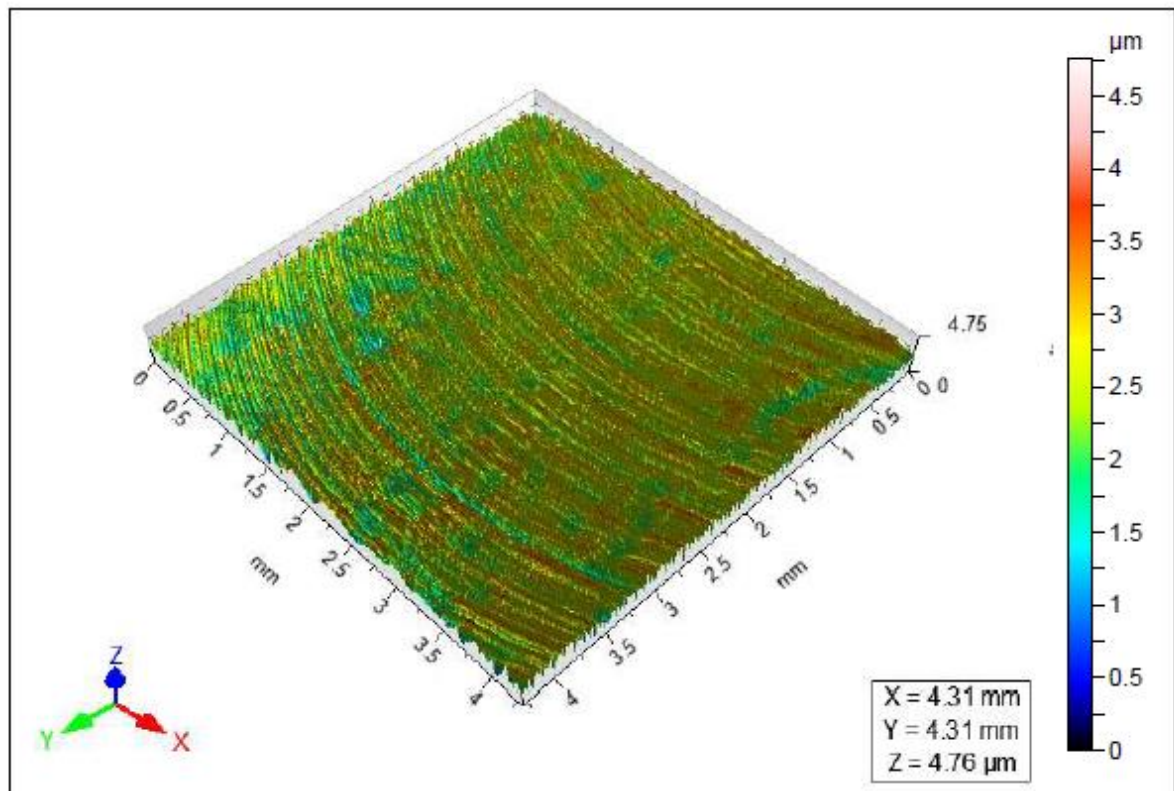
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.520	$\mu\text{m}$
Ssk	-0.178	
Sku	2.70	
Sp	2.51	$\mu\text{m}$
Sv	2.25	$\mu\text{m}$
Sz	4.76	$\mu\text{m}$
Sa	0.419	$\mu\text{m}$

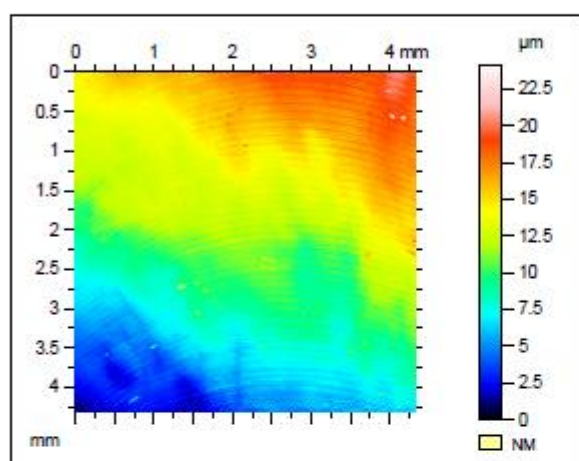


Ti6Al4V\_Seco

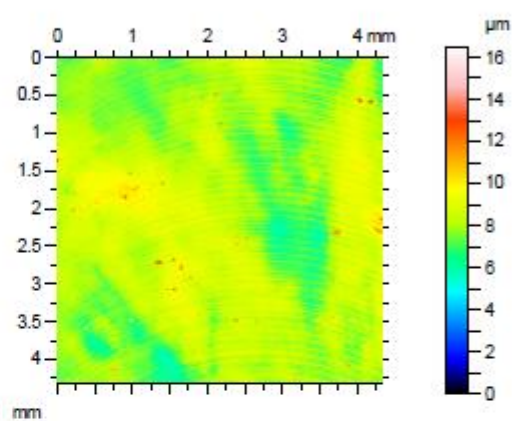
Canal 08

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

Superfície coletada



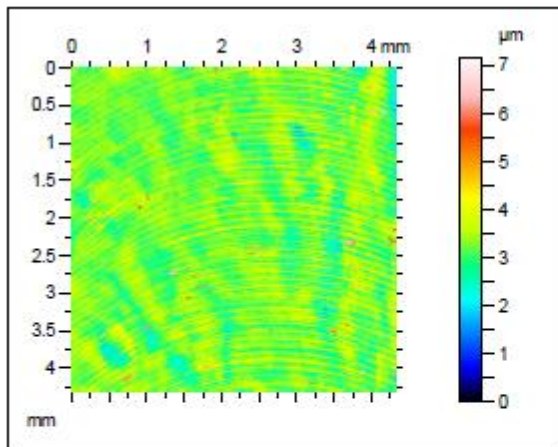
Superfície Nivelada



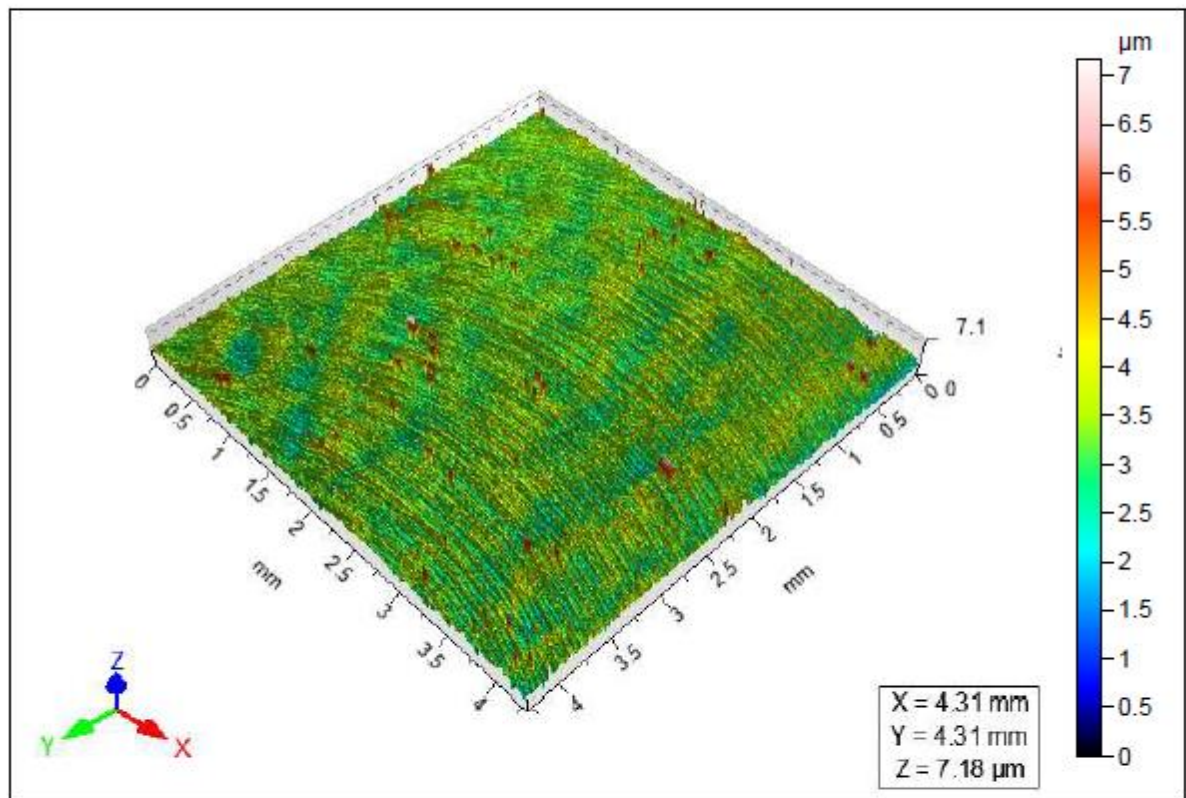
Superfície com  
remoção de forma

Thresholding

Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.420	µm
Ssk	0.656	
Sku	10.5	
Sp	3.92	µm
Sv	3.25	µm
Sz	7.18	µm
Sa	0.298	µm



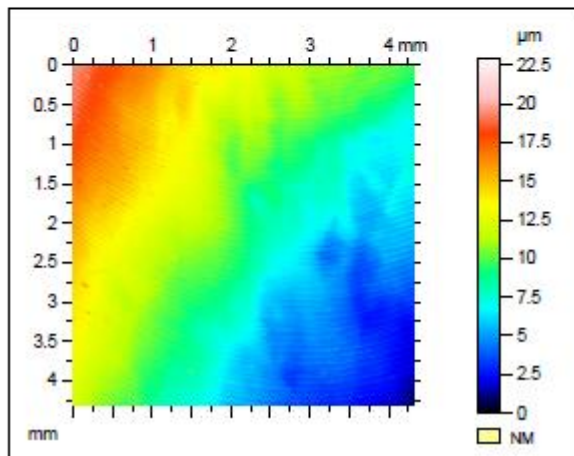


## Ti6Al4V\_Seco

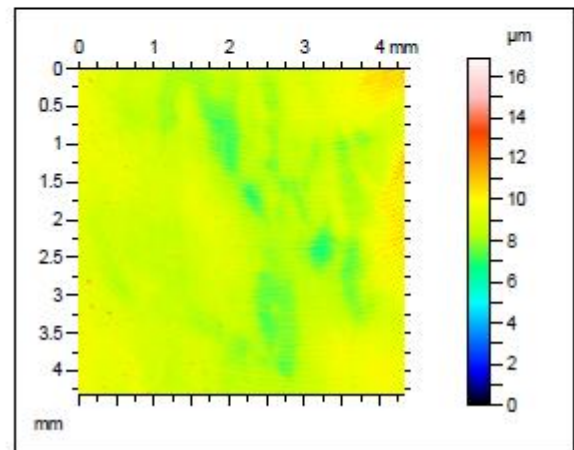
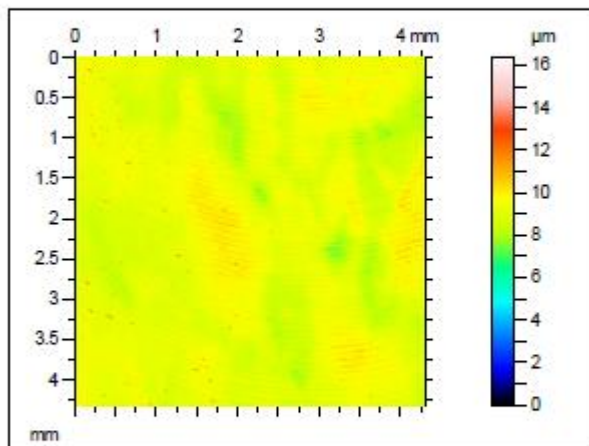
Canal 09

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

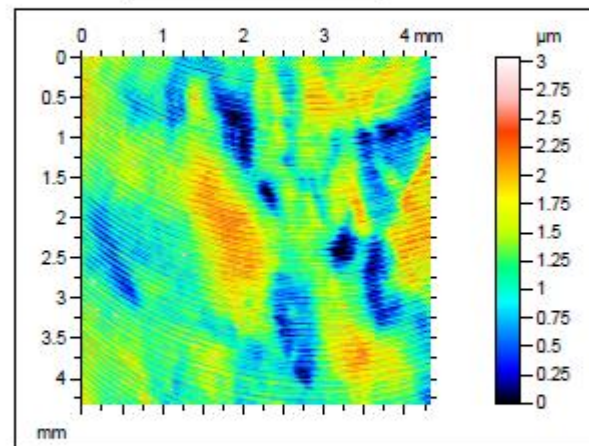
Superfície coletada



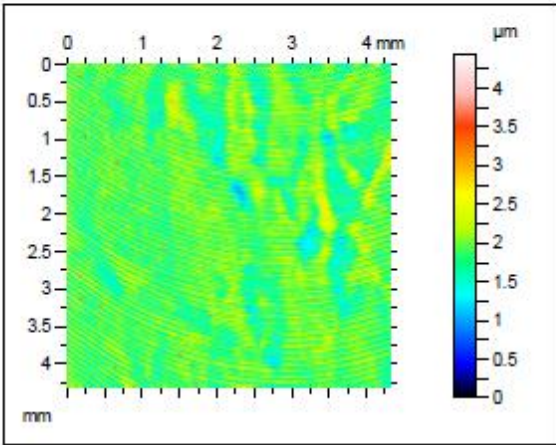
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

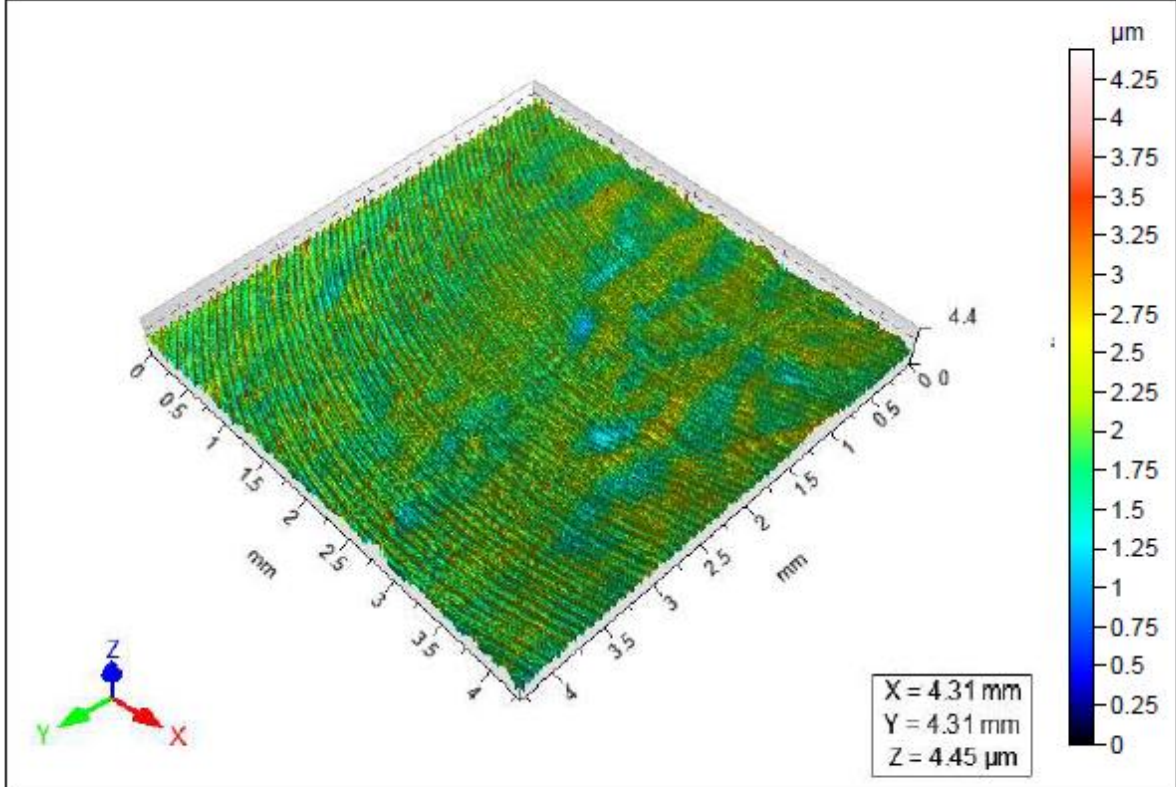
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.293	µm
Ssk	0.460	
Sku	5.23	
Sp	2.55	µm
Sv	1.90	µm
Sz	4.45	µm
Sa	0.227	µm

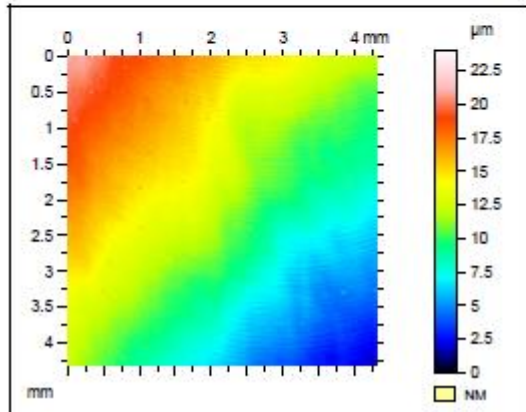


Ti6Al4V\_Seco

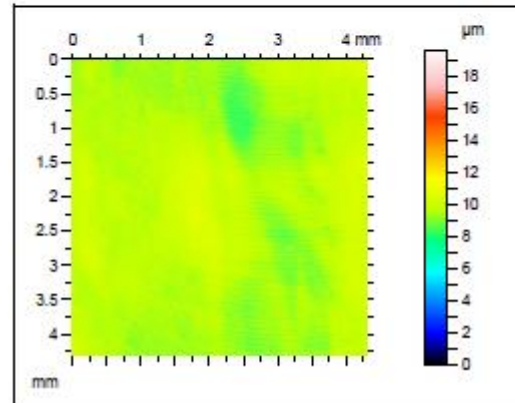
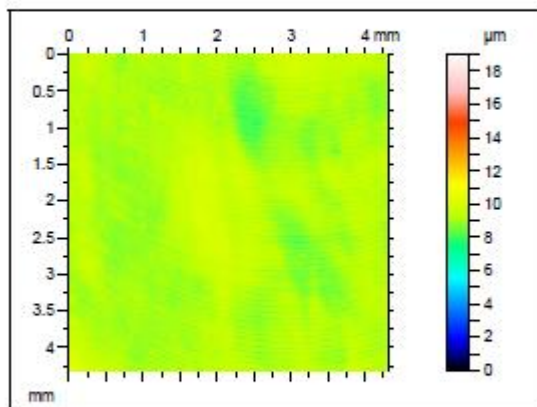
Canal 10

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

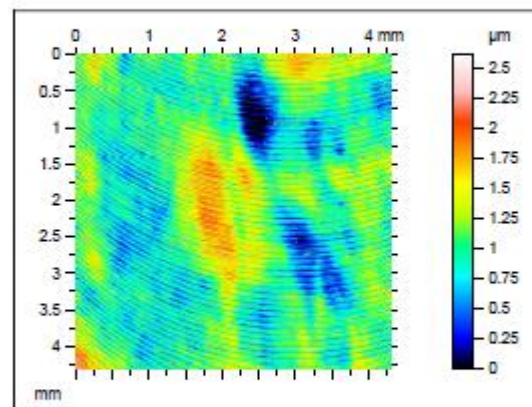
Superfície coletada



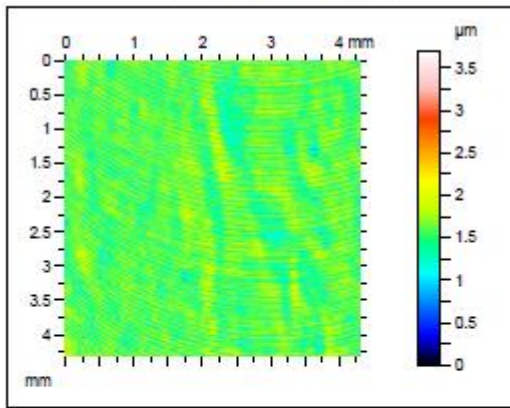
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

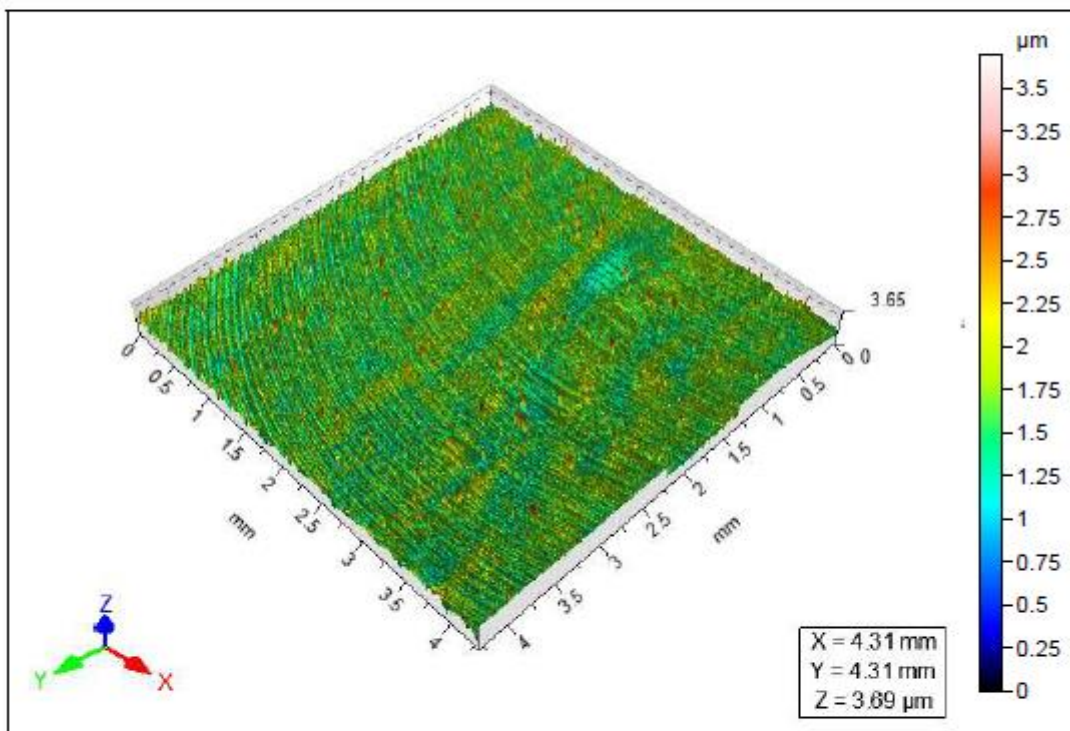
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.241	μm
Ssk	0.548	
Sku	6.92	
Sp	2.10	μm
Sv	1.59	μm
Sz	3.69	μm
Sa	0.182	μm

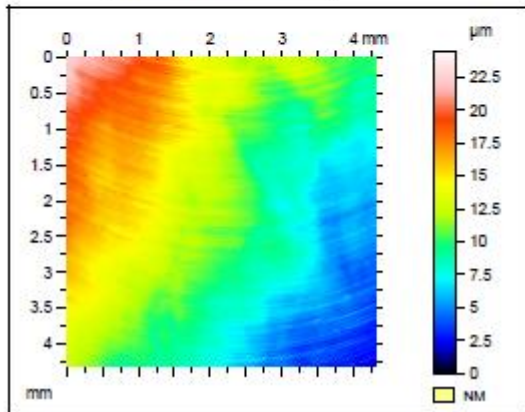


## Ti6Al4V\_Seco

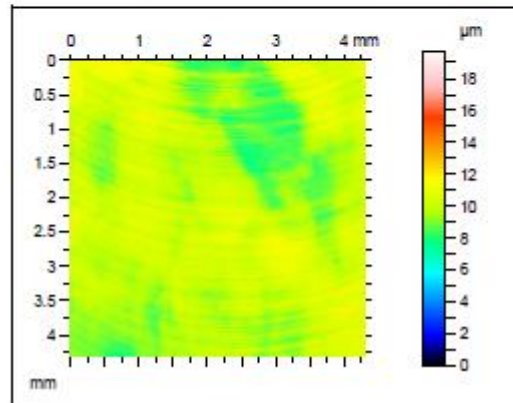
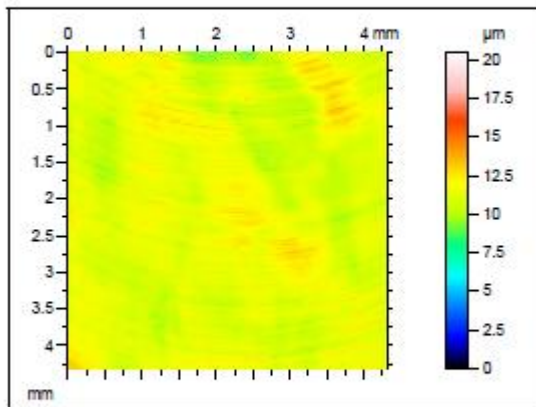
Canal 11

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

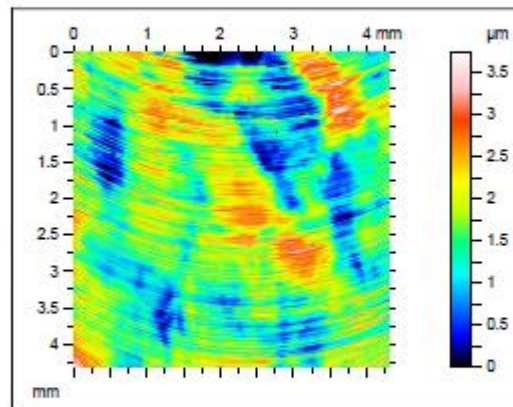
Superfície coletada



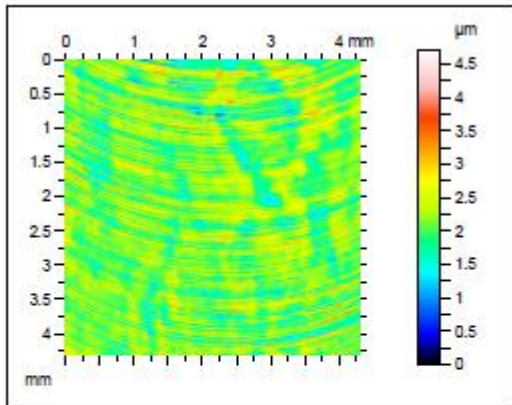
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

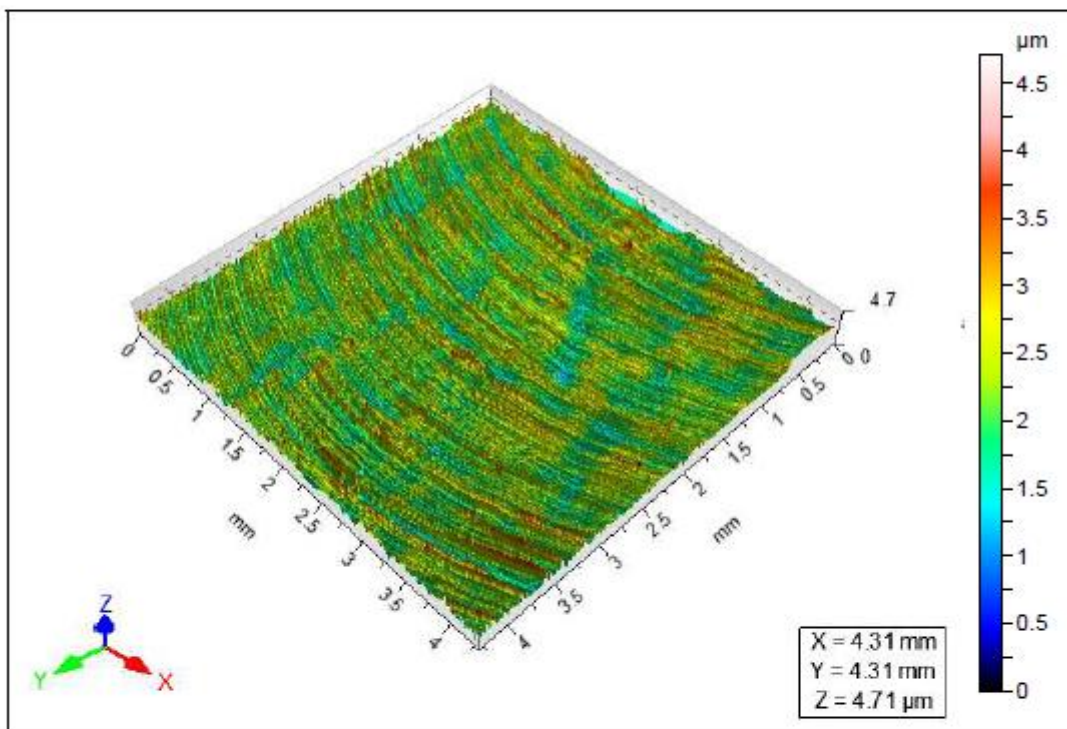
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.375	μm
Ssk	0.396	
Sku	4.29	
Sp	2.58	μm
Sv	2.13	μm
Sz	4.71	μm
Sa	0.267	μm

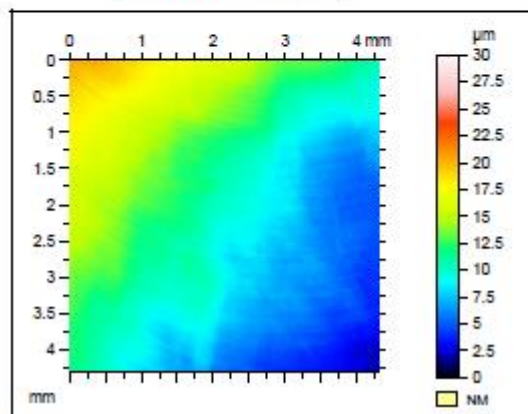


Ti6Al4V\_Seco

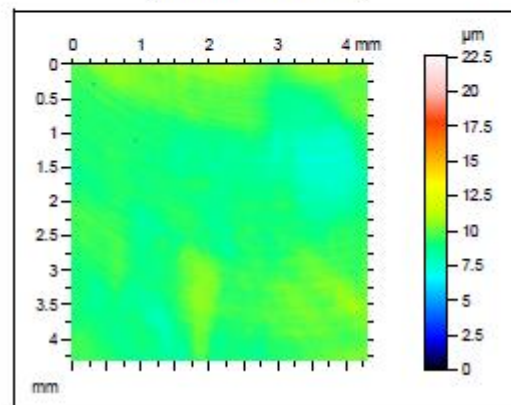
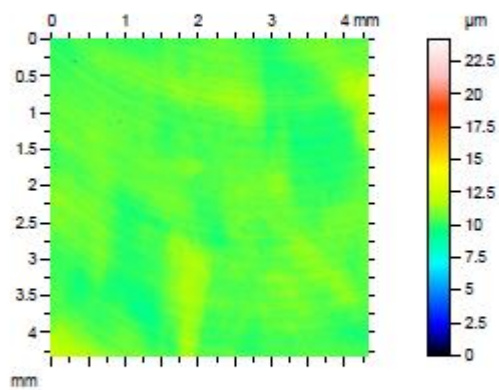
Canal 12

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

Superfície coletada

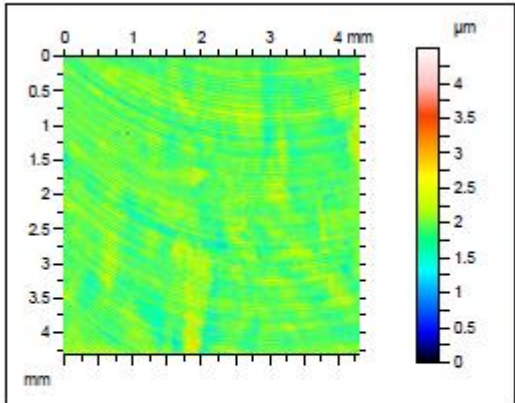


Superfície Nivelada

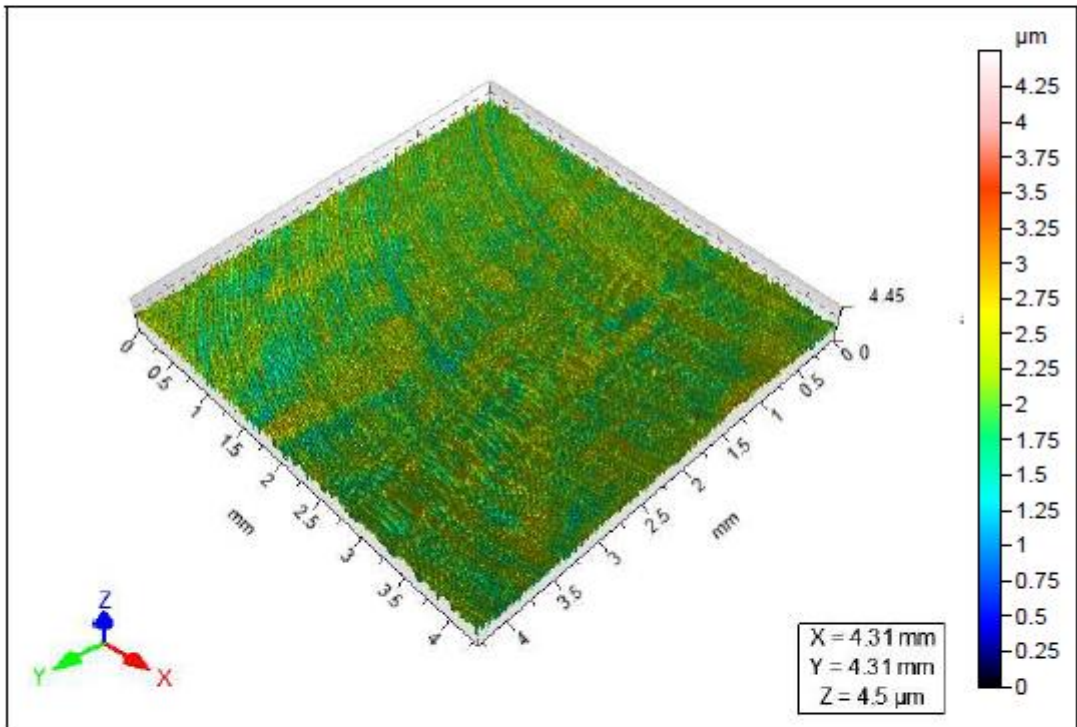
Superfície com  
remoção de forma

Thresholding

Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.344	μm
Sak	0.113	
Sku	2.84	
Sp	2.53	μm
Sv	1.97	μm
Sz	4.50	μm
Sa	0.281	μm



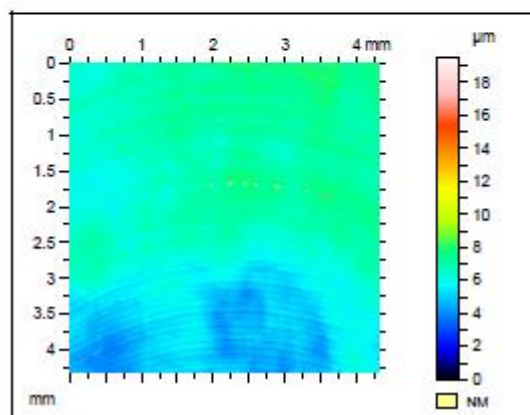


Ti6Al4V\_Seco

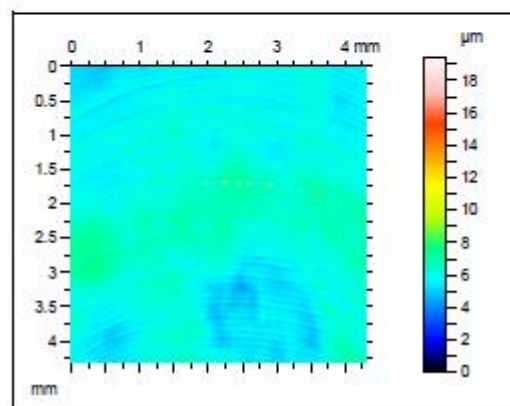
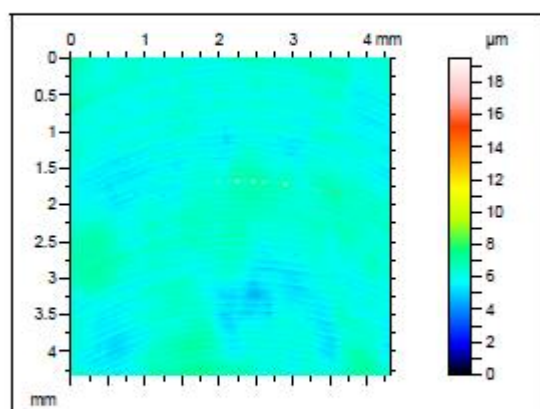
Canal 13

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

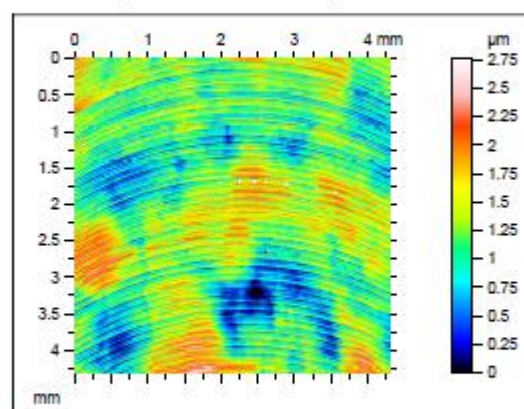
Superfície coletada



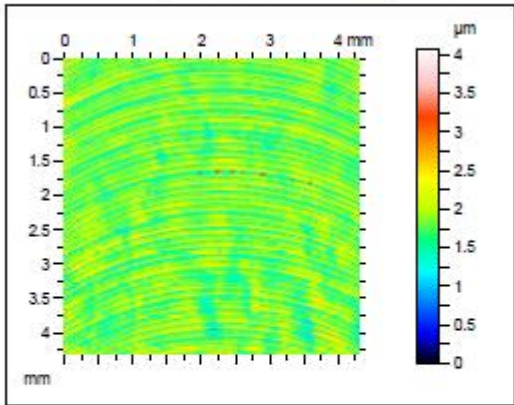
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

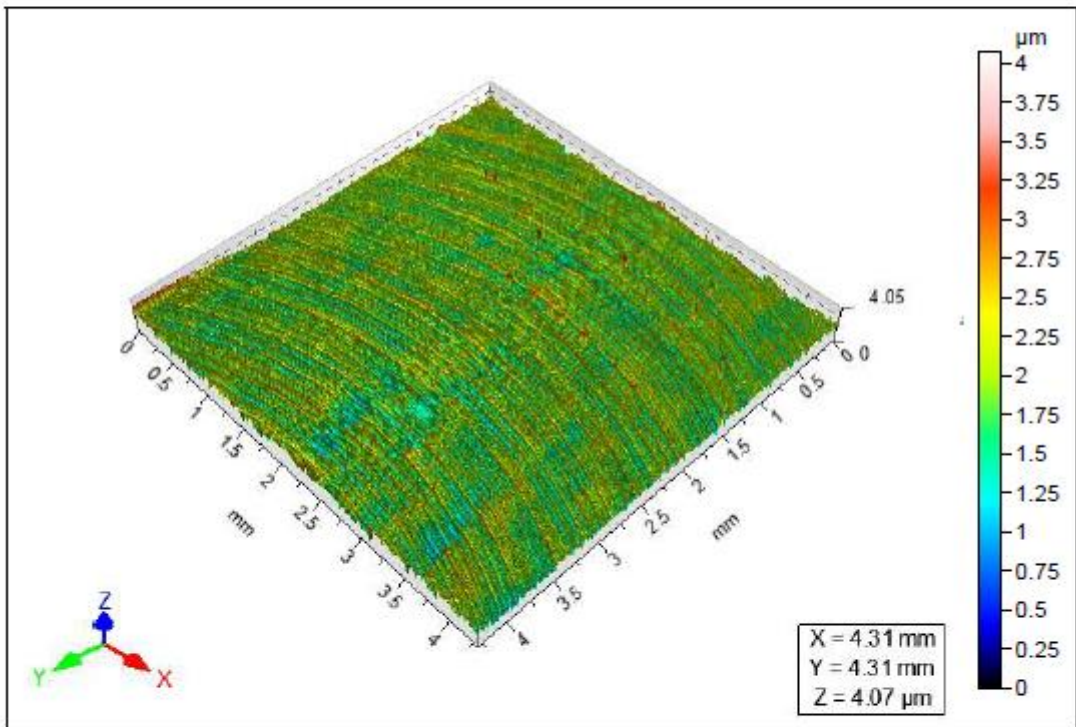
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.311	µm
Ssk	-0.139	
Sku	3.29	
Sp	2.24	µm
Sv	1.83	µm
Sz	4.07	µm
Sa	0.247	µm

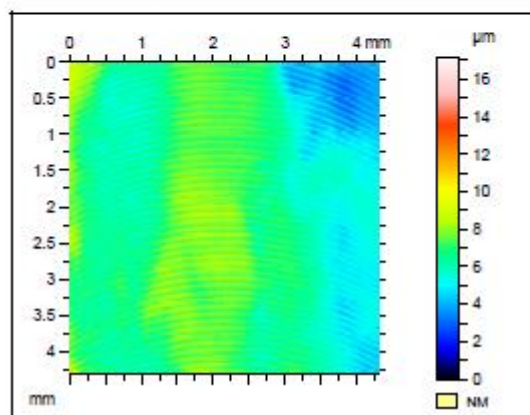


Ti6Al4V\_Seco

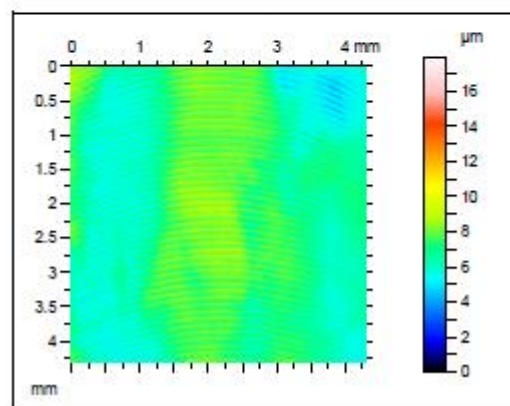
Canal 14

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

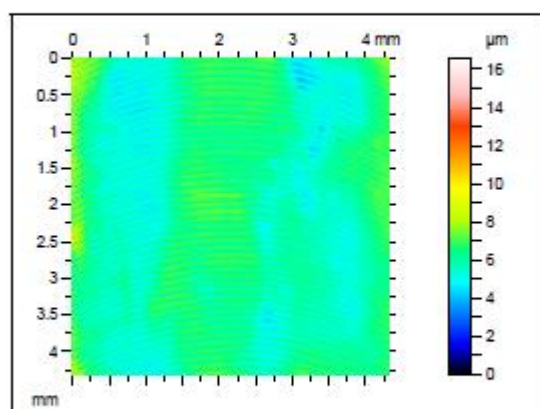
Superfície coletada



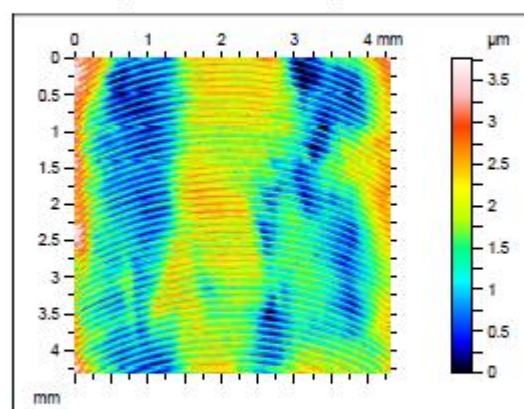
Superfície Nivelada



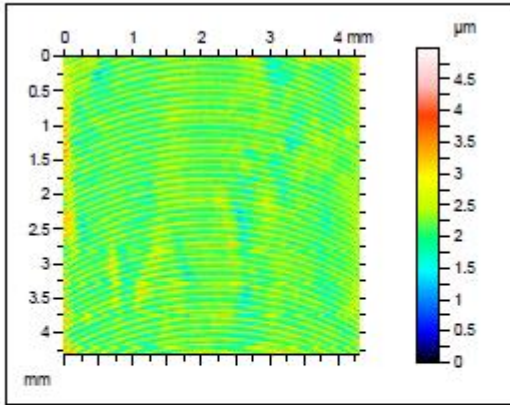
Superfície com  
remoção de forma



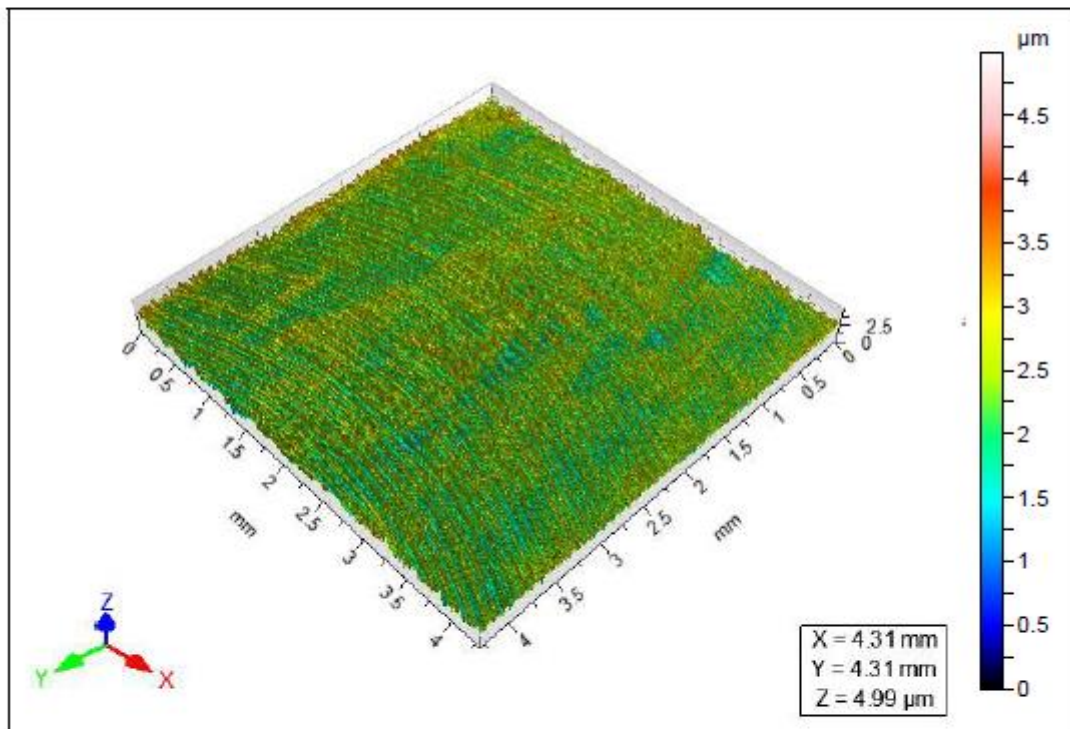
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
<b>Sq</b>	0.394	μm
<b>Ssk</b>	0.288	
<b>Sku</b>	3.18	
<b>Sp</b>	2.76	μm
<b>Sv</b>	2.23	μm
<b>Sz</b>	4.99	μm
<b>Sa</b>	0.314	μm

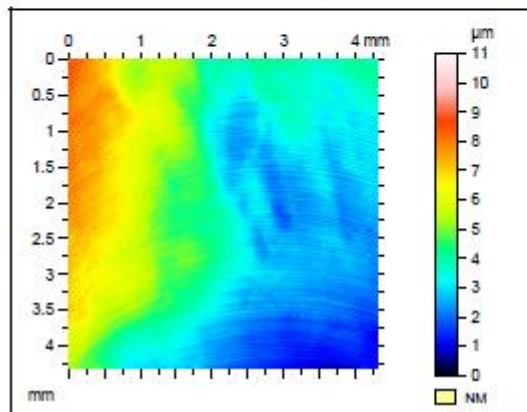


Ti6Al4V\_Seco

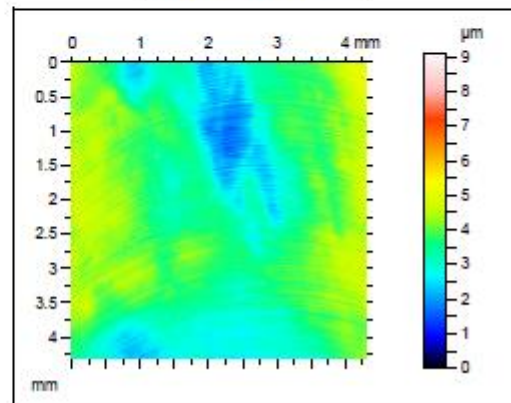
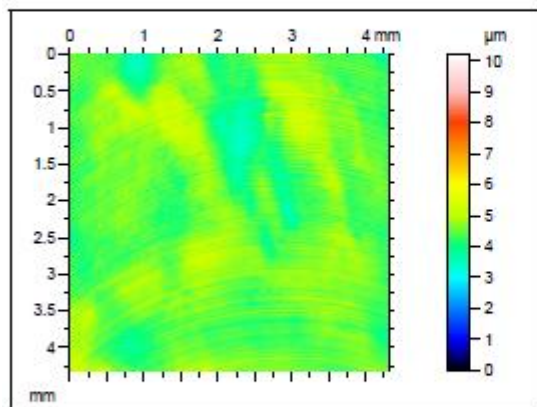
Canal 15

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

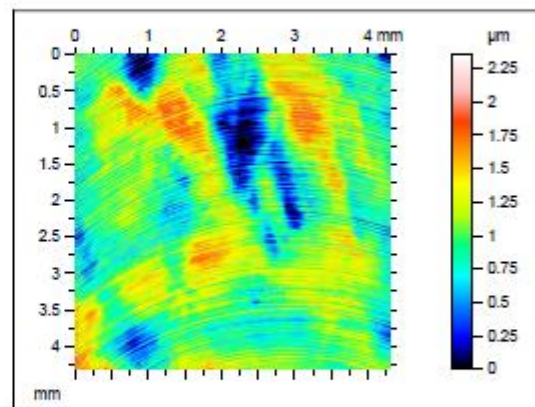
Superfície coletada



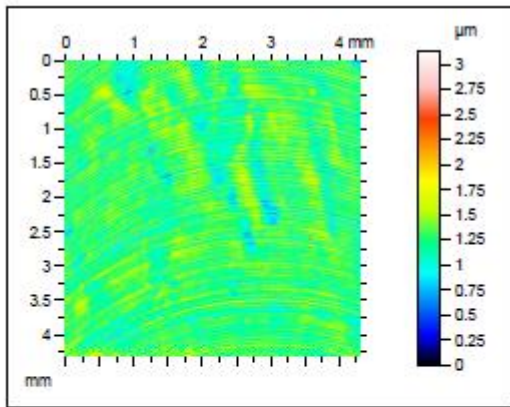
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

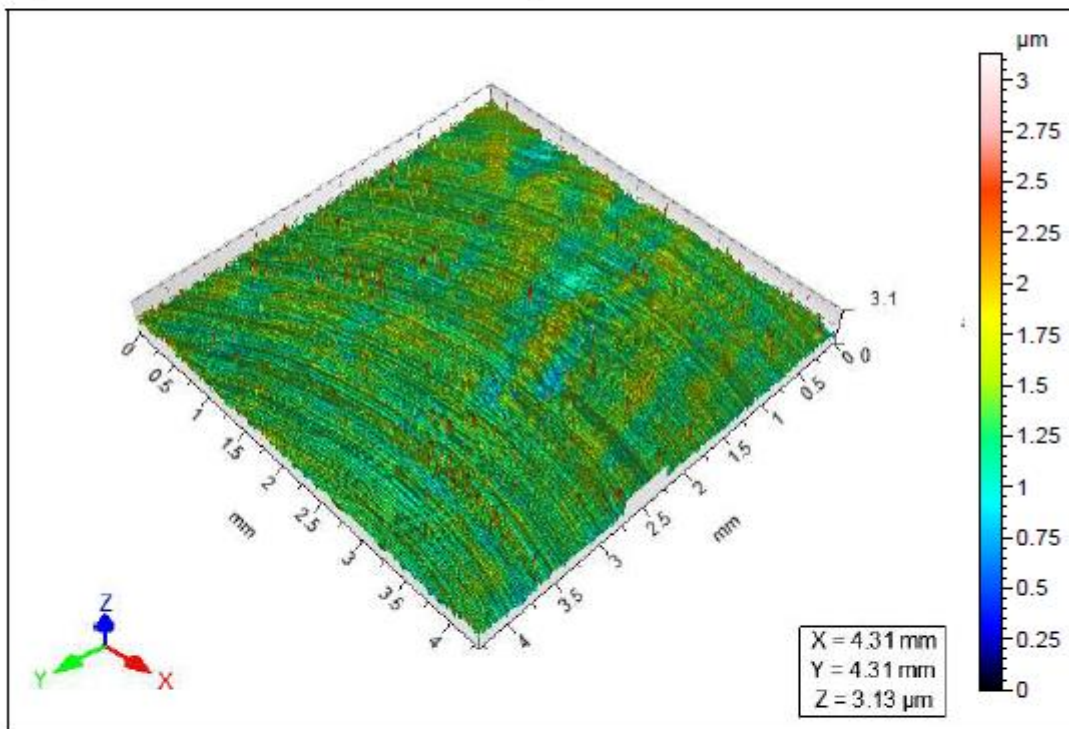
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
<b>Sq</b>	0.207	µm
<b>Ssk</b>	0.733	
<b>Sku</b>	6.64	
<b>Sp</b>	1.86	µm
<b>Sv</b>	1.27	µm
<b>Sz</b>	3.13	µm
<b>Sa</b>	0.158	µm

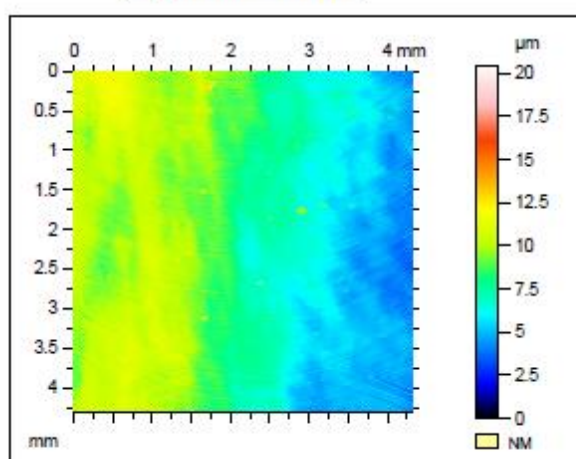


## Ti6Al4V\_Seco

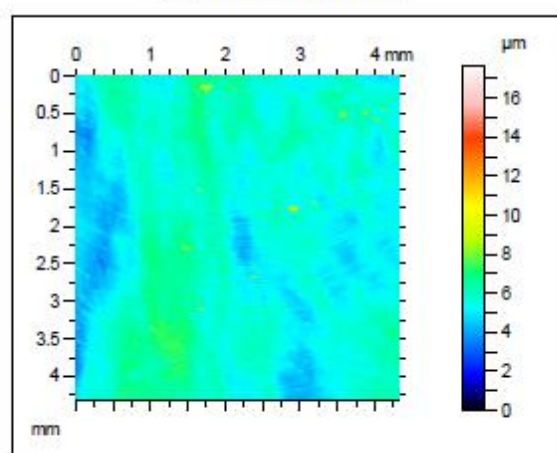
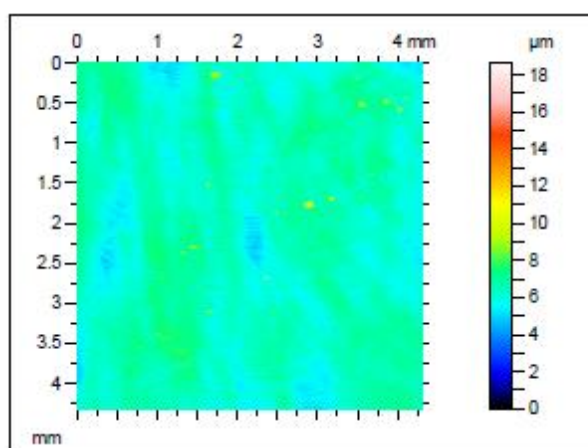
## Canal 16

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

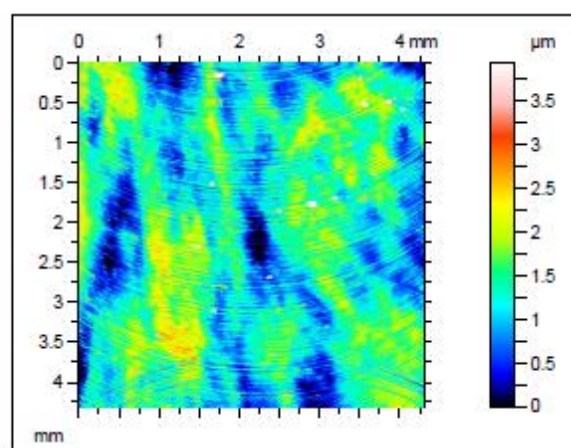
Superfície coletada



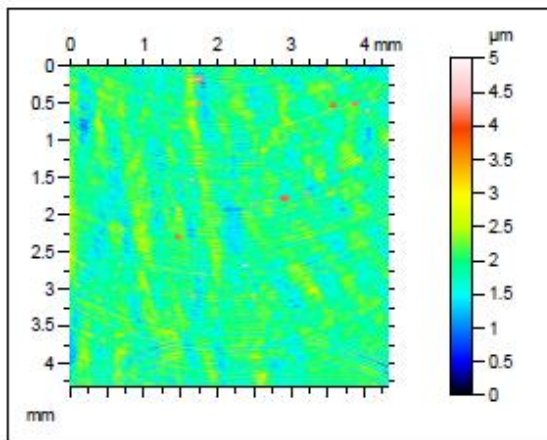
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

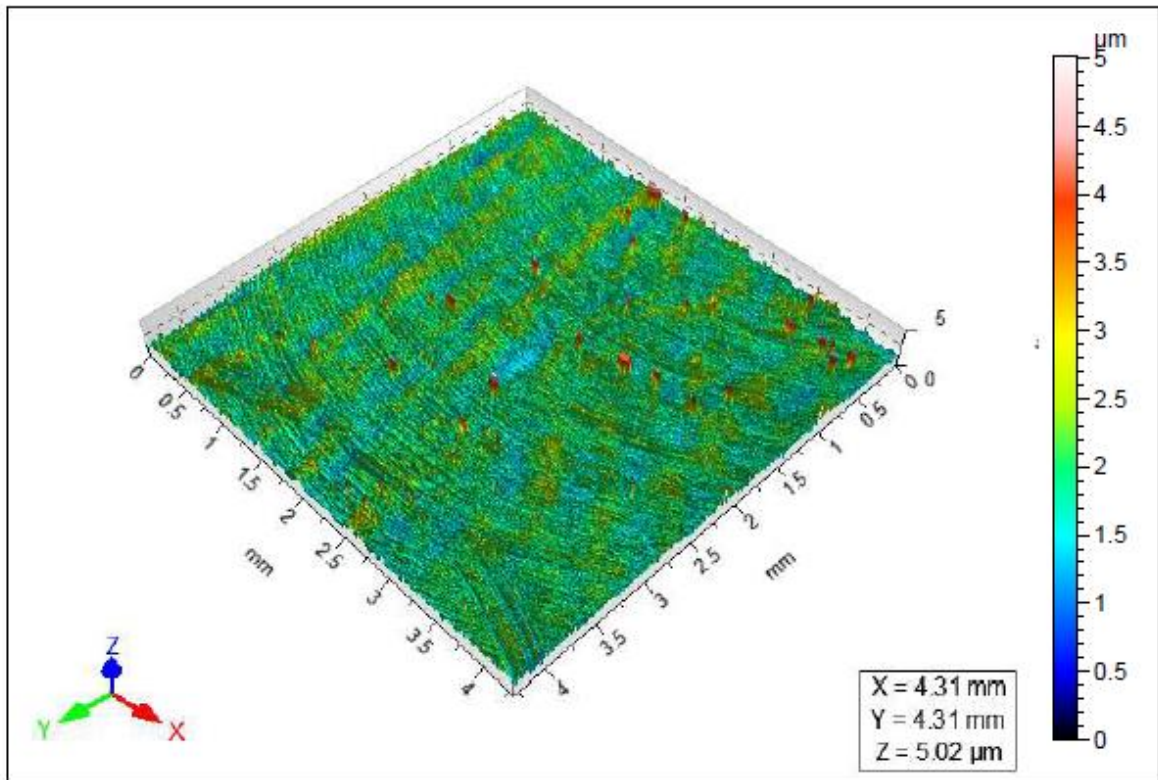
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.337	$\mu\text{m}$
Ssk	1.16	
Sku	0.83	
Sp	3.11	$\mu\text{m}$
Sv	1.91	$\mu\text{m}$
Sz	5.02	$\mu\text{m}$
Sa	0.251	$\mu\text{m}$



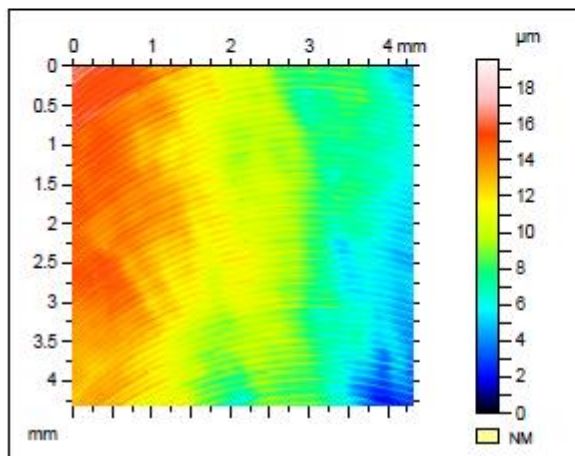


## Ti6Al4V\_Seco

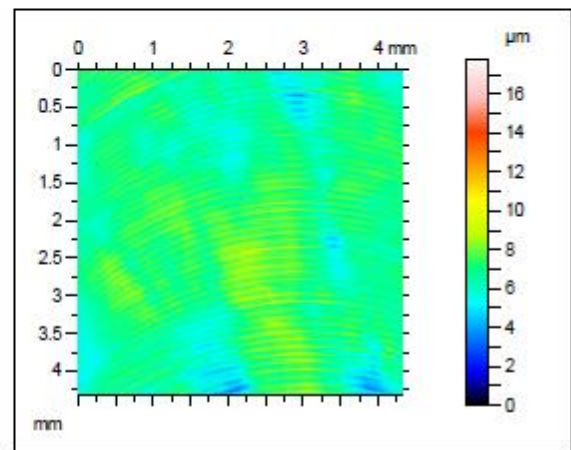
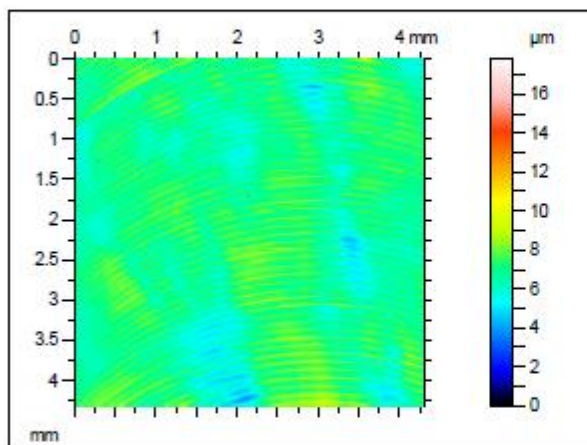
## Canal 17

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

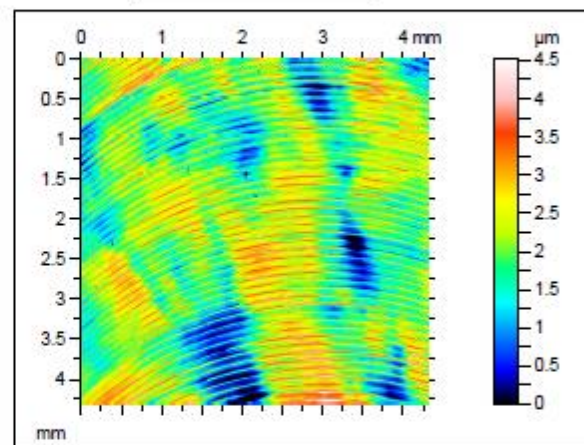
Superfície coletada



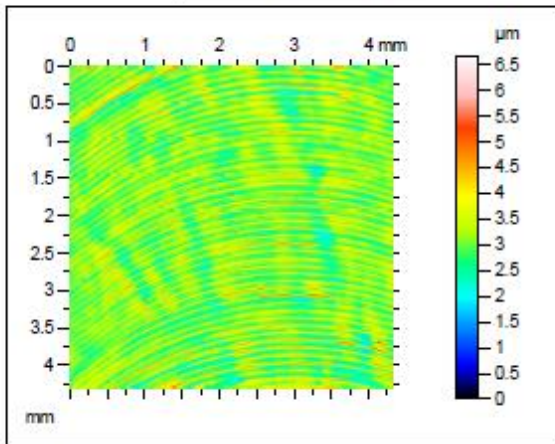
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

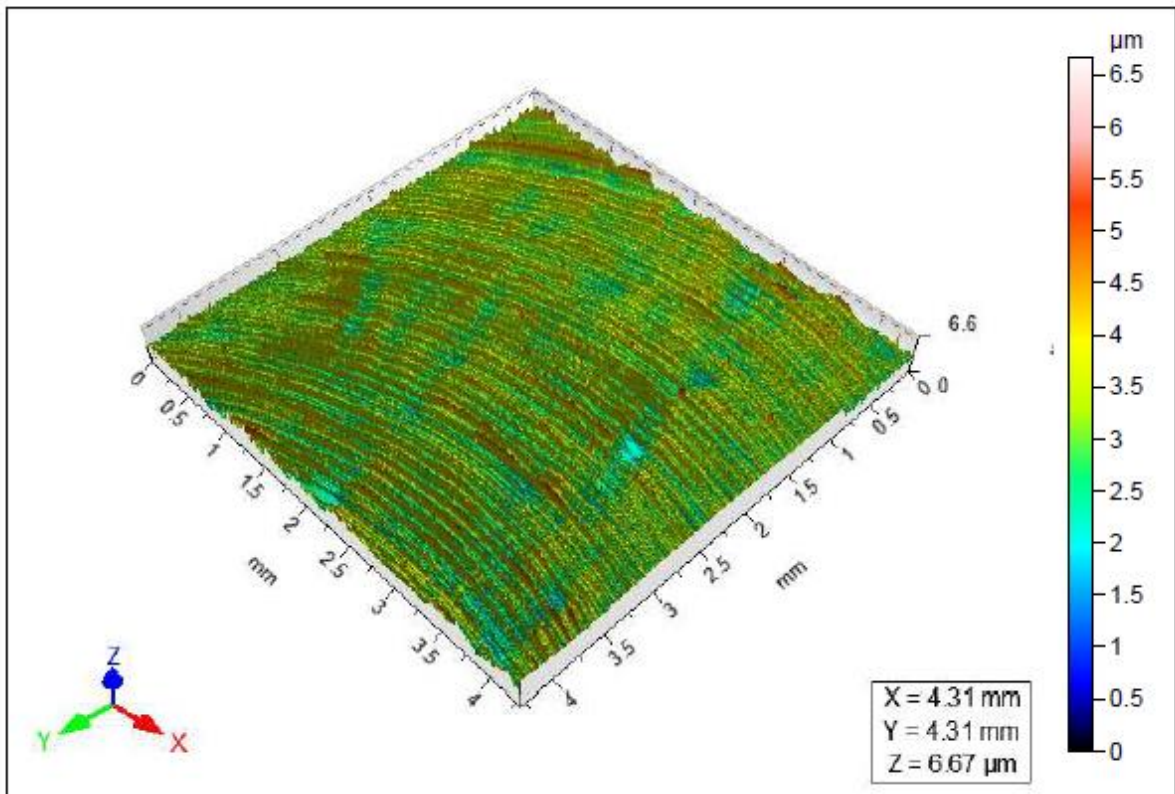
Thresholding



**Filtro Gaussiano**



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.486	μm
Ssk	0.565	
Sku	4.32	
Sp	3.57	μm
Sv	3.11	μm
Sz	6.67	μm
Sa	0.369	μm

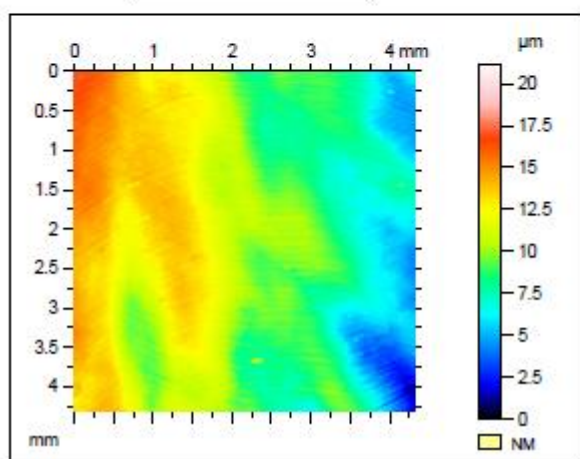


## Ti6Al4V\_Seco

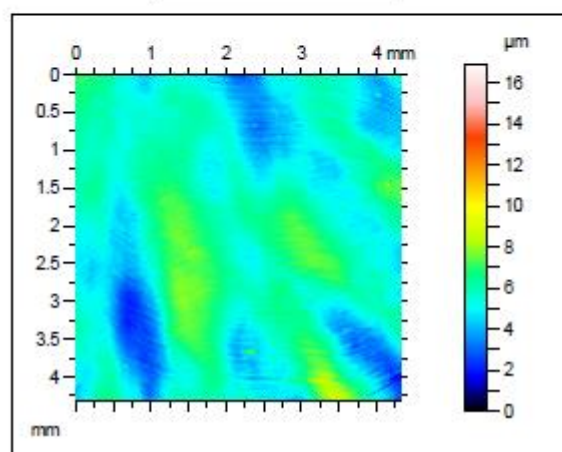
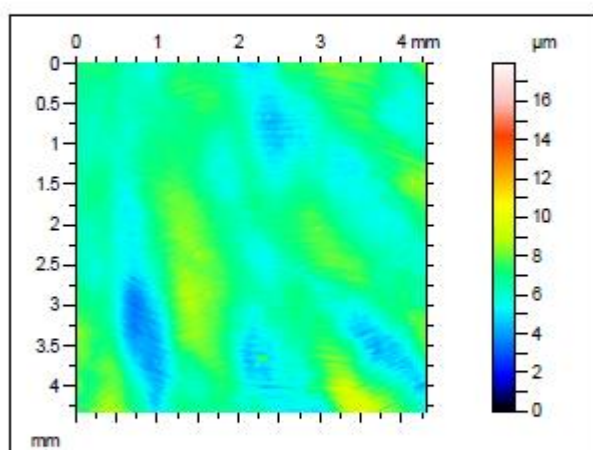
Canal 18

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

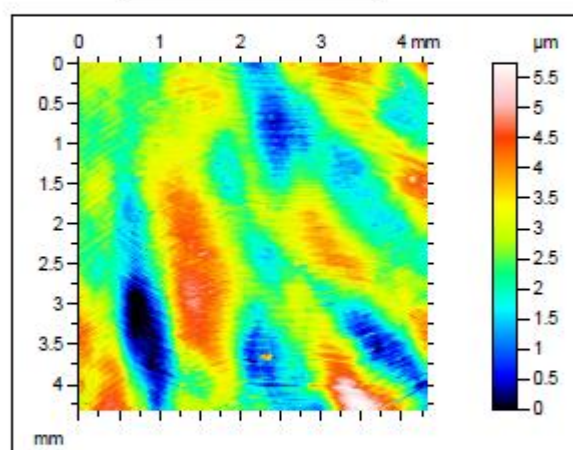
Superfície coletada



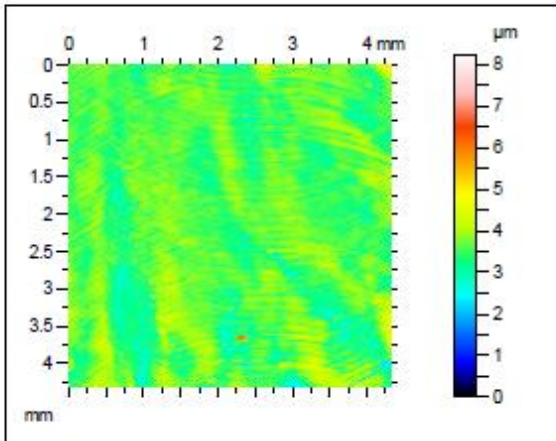
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

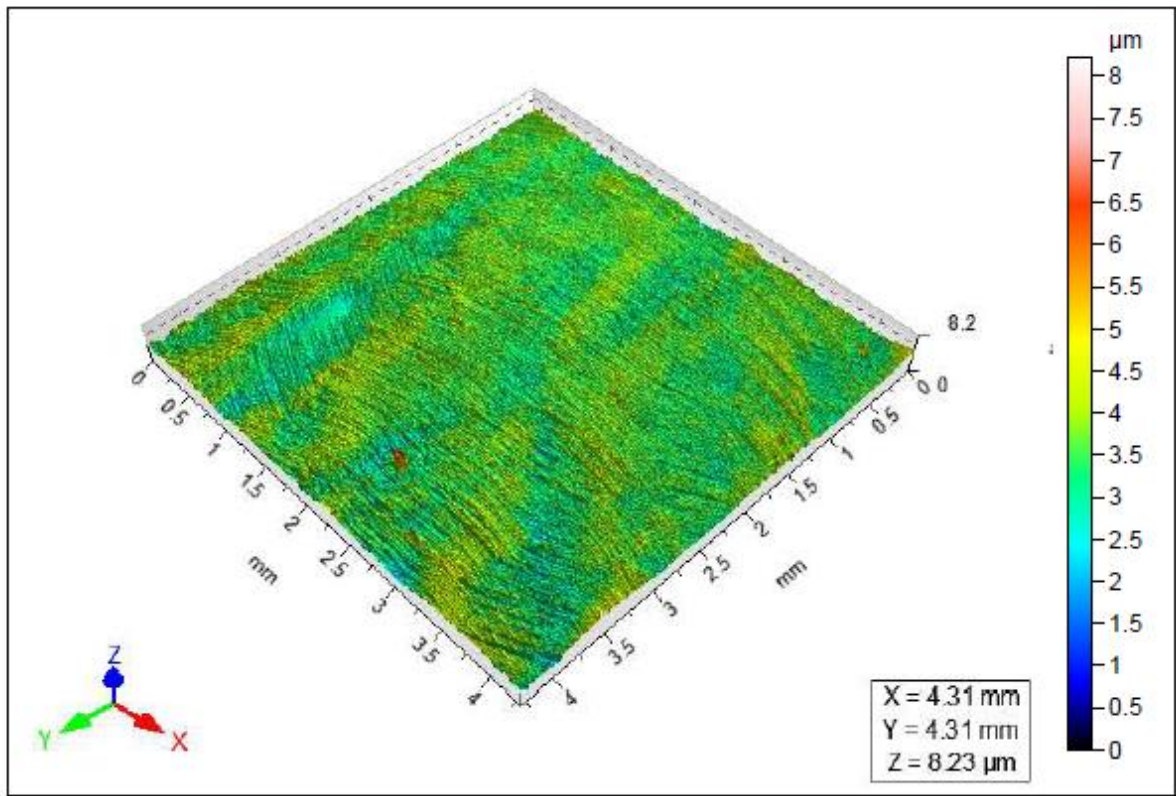
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.346	μm
Ssk	0.0037	
Sku	4.96	
Sp	4.68	μm
Sv	3.55	μm
Sz	8.23	μm
Sa	0.266	μm

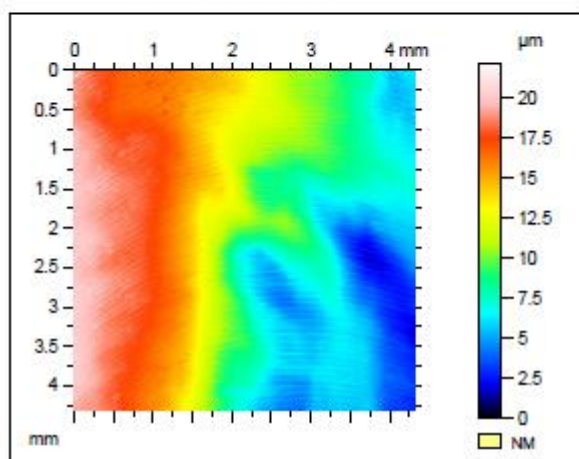


## Ti6Al4V\_Seco

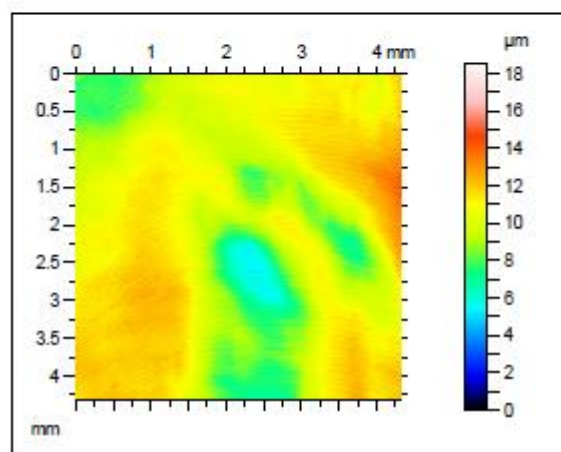
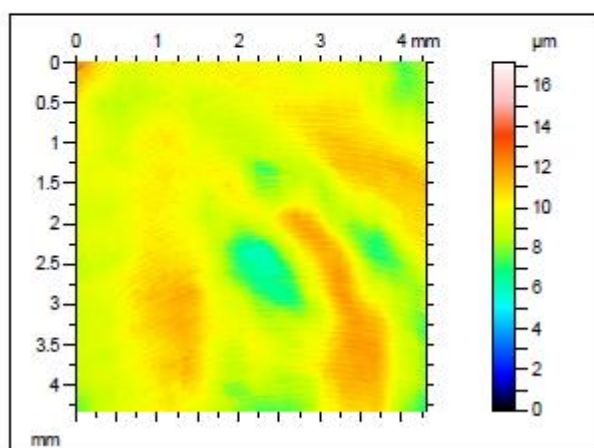
Canal 19

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

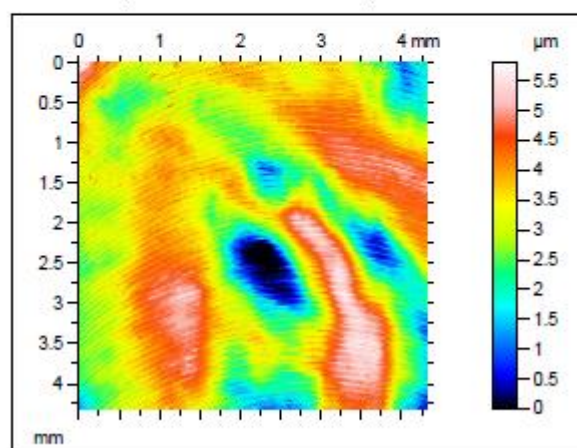
Superfície coletada



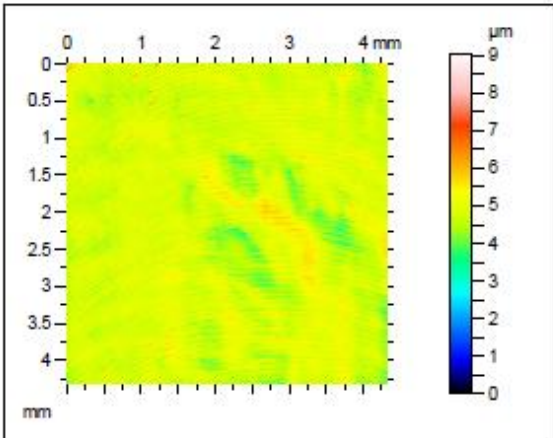
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

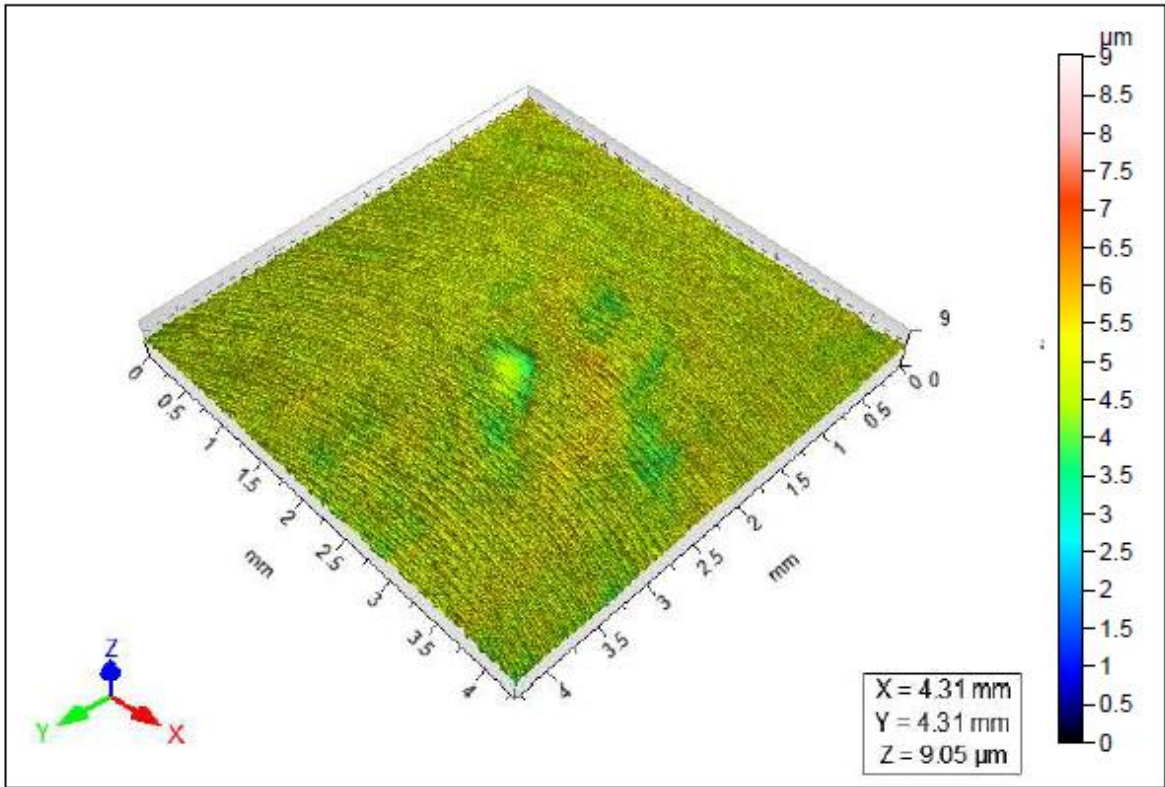
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.338	μm
Ssk	-0.0819	
Sku	3.91	
Sp	4.23	μm
Sv	4.81	μm
Sz	9.05	μm
Sa	0.262	μm

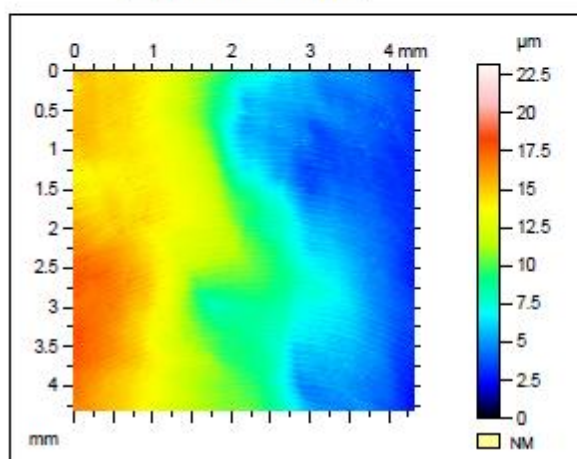


## Ti6Al4V\_Seco

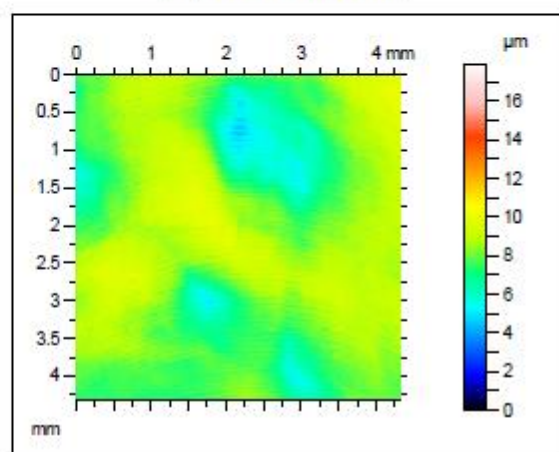
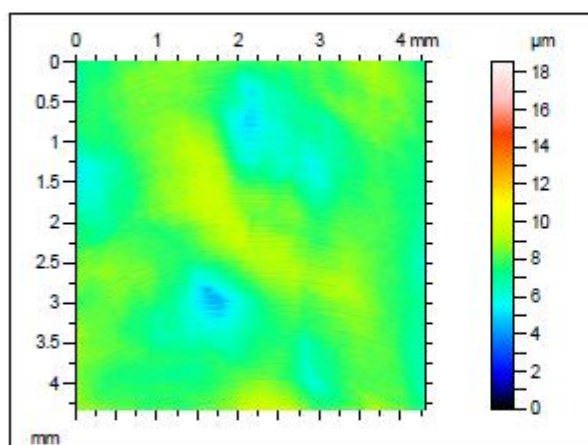
Canal 20

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

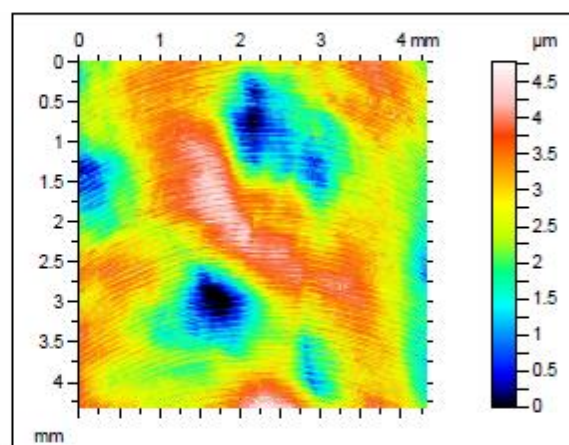
Superfície coletada



Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

Thresholding



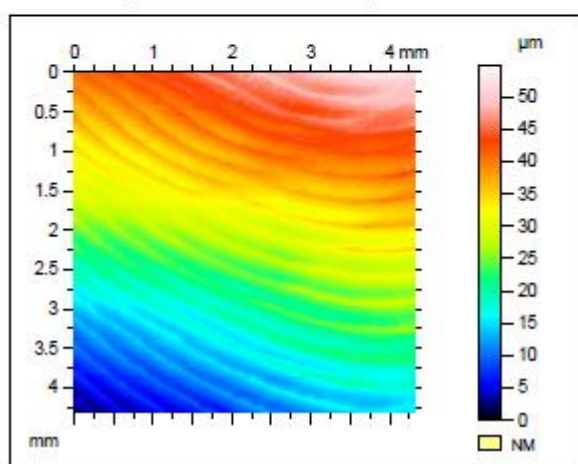
## Apêndice B- Medições 3D usinagem com lubrificante

Ti6Al4V\_Óleo

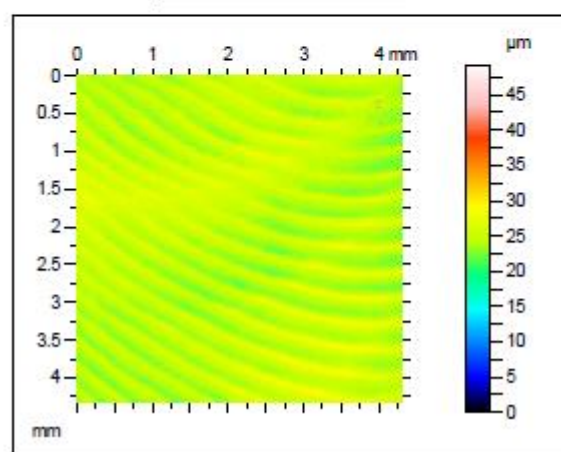
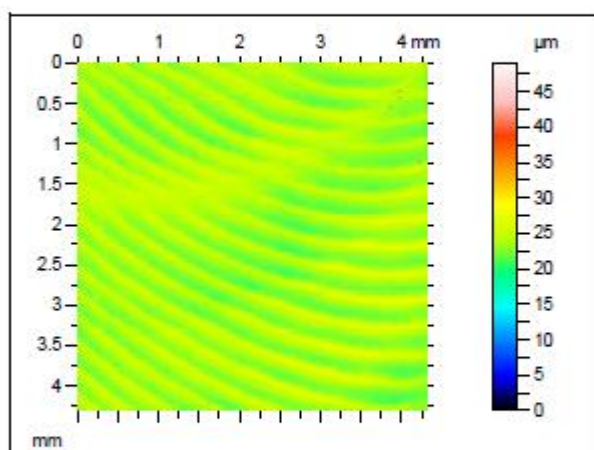
Canal 01

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

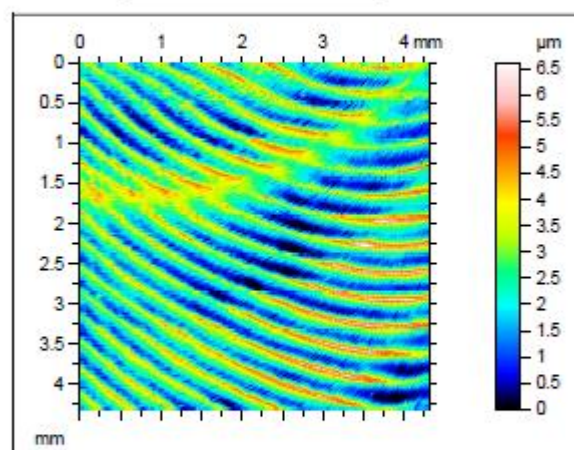
Superfície coletada



Superfície Nivelada

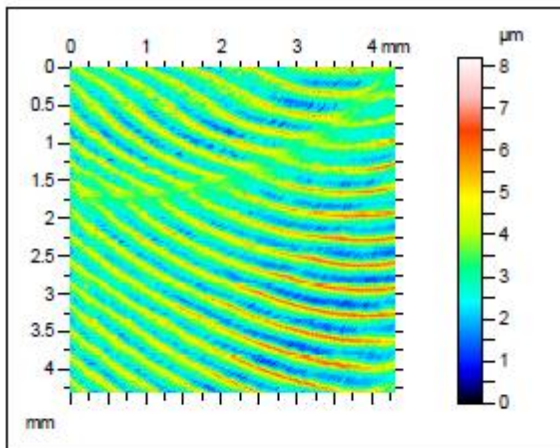
Superfície com  
remoção de forma

Thresholding

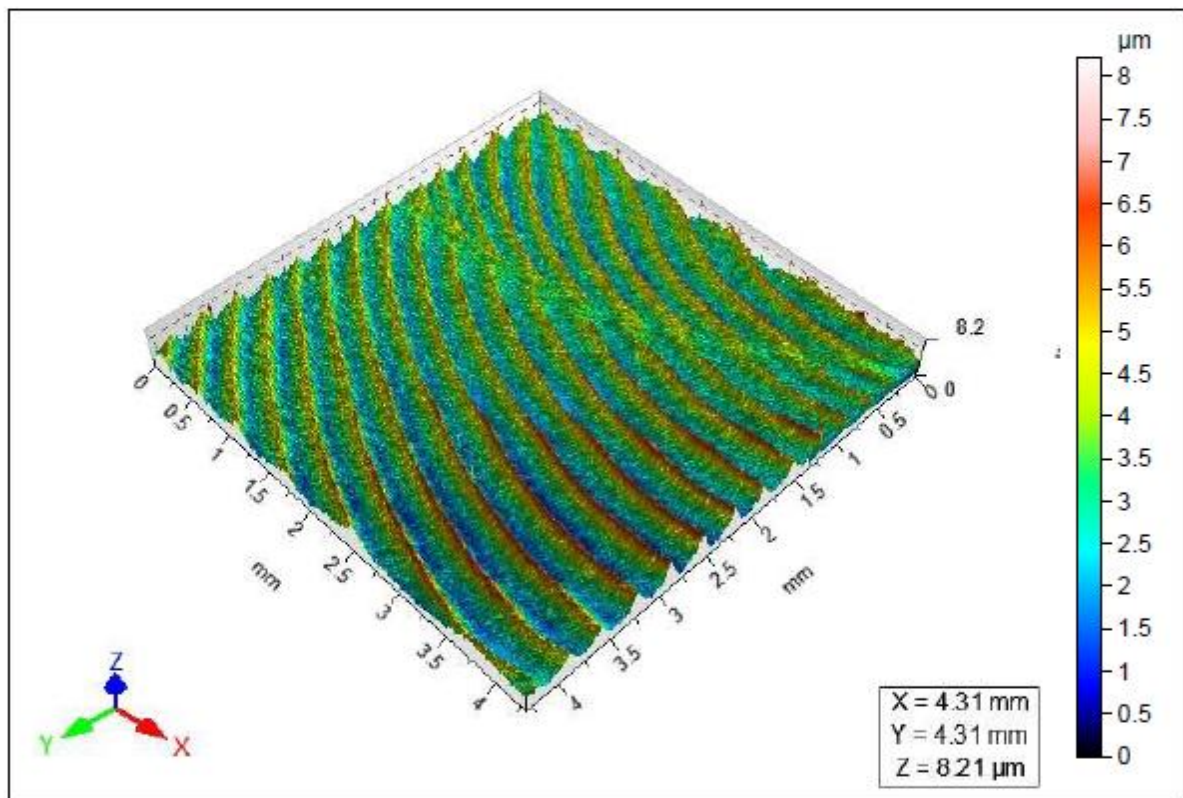




Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Parâmetros de altura		
Sq	1.08	μm
Ssk	0.504	
Sku	2.98	
Sp	4.89	μm
Sv	3.32	μm
Sz	8.21	μm
Sa	0.877	μm

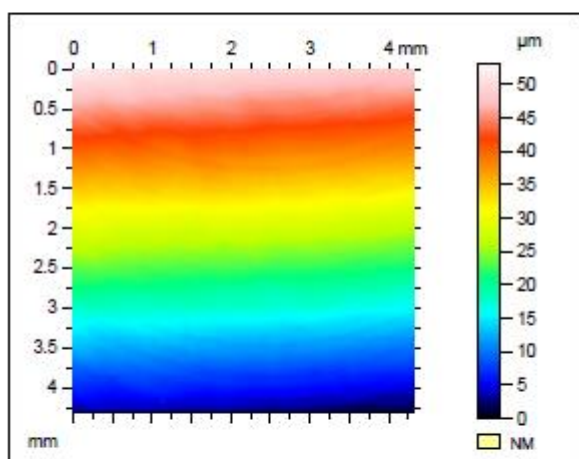


## Ti6Al4V\_Óleo

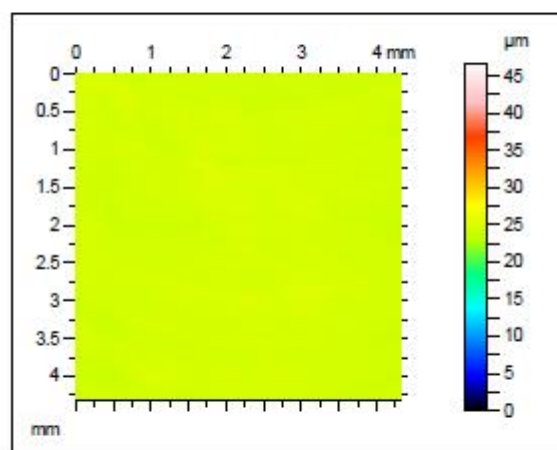
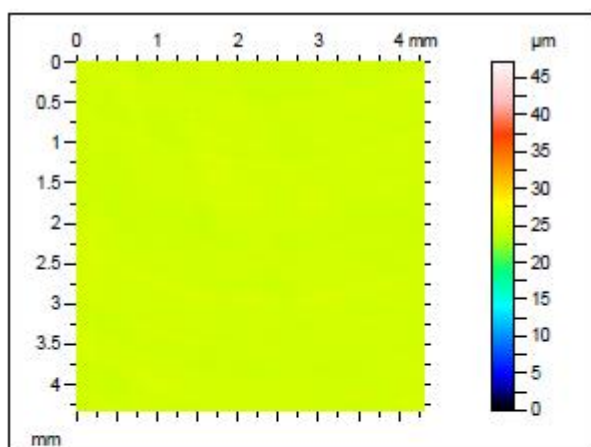
Canal 02

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

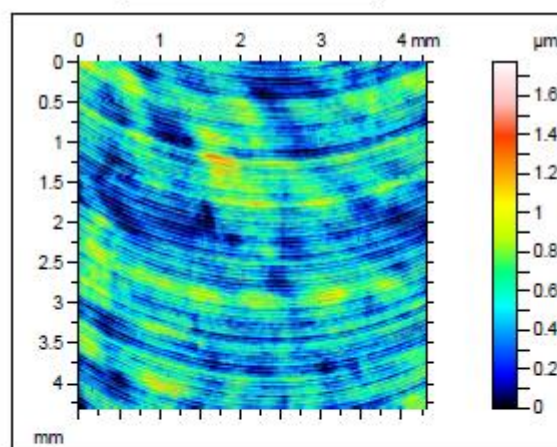
Superfície coletada

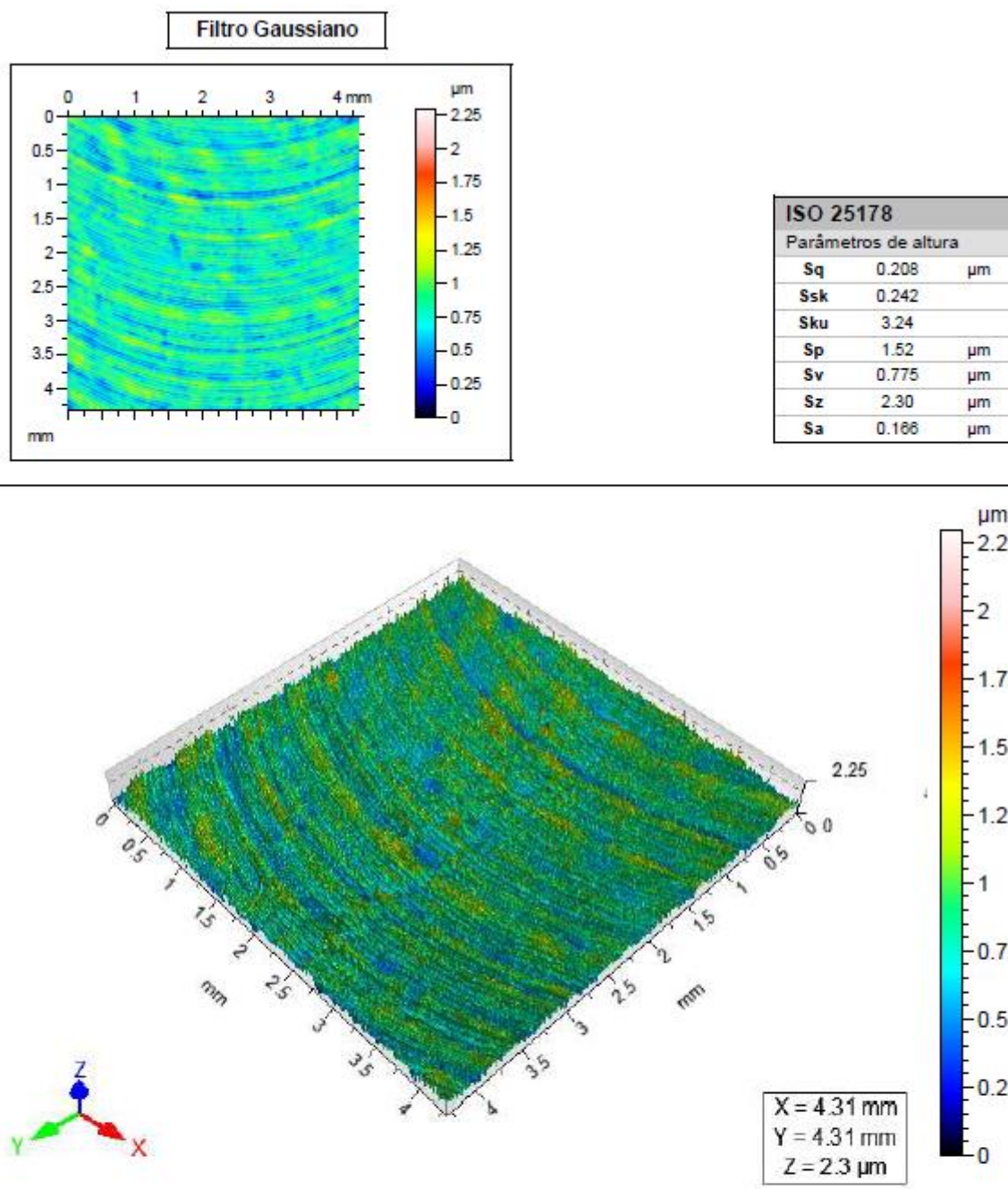


Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

Thresholding



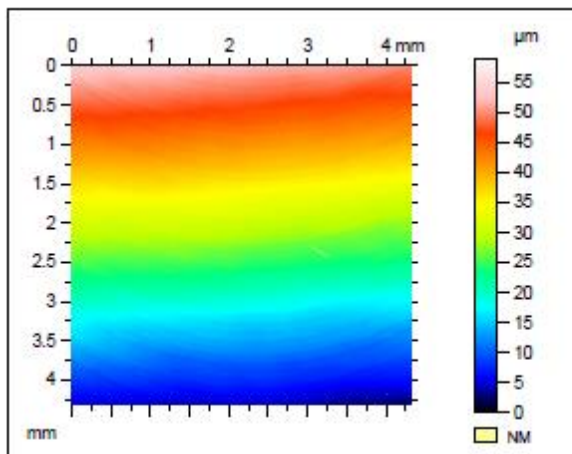


Ti6Al4V\_Óleo

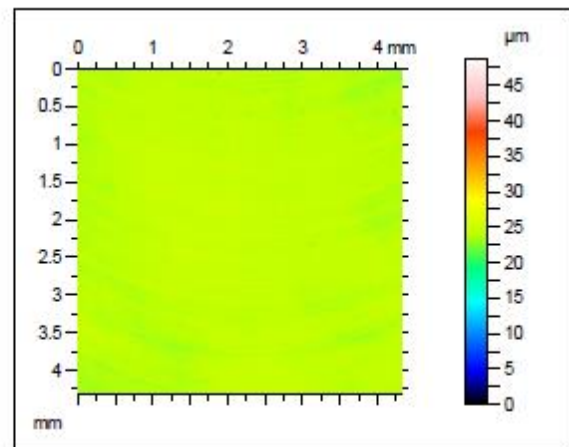
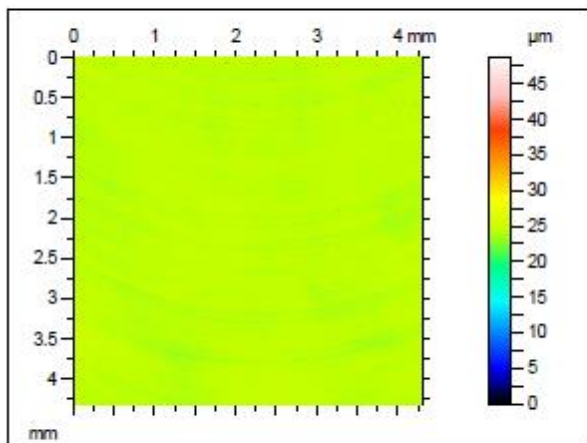
Canal 03

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

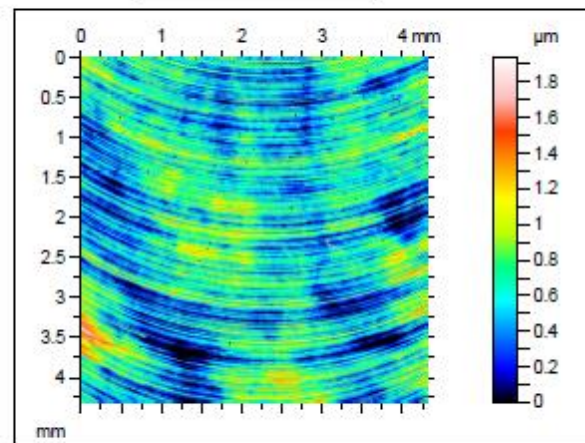
Superfície coletada



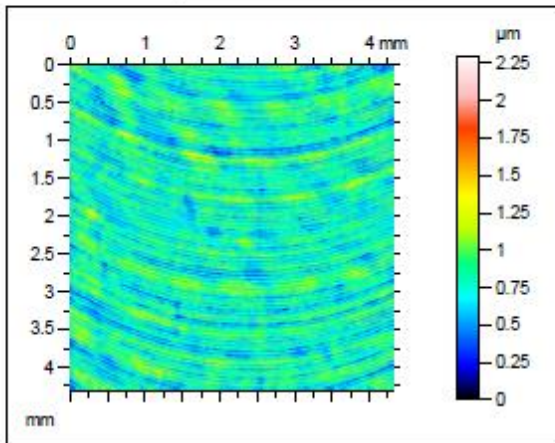
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

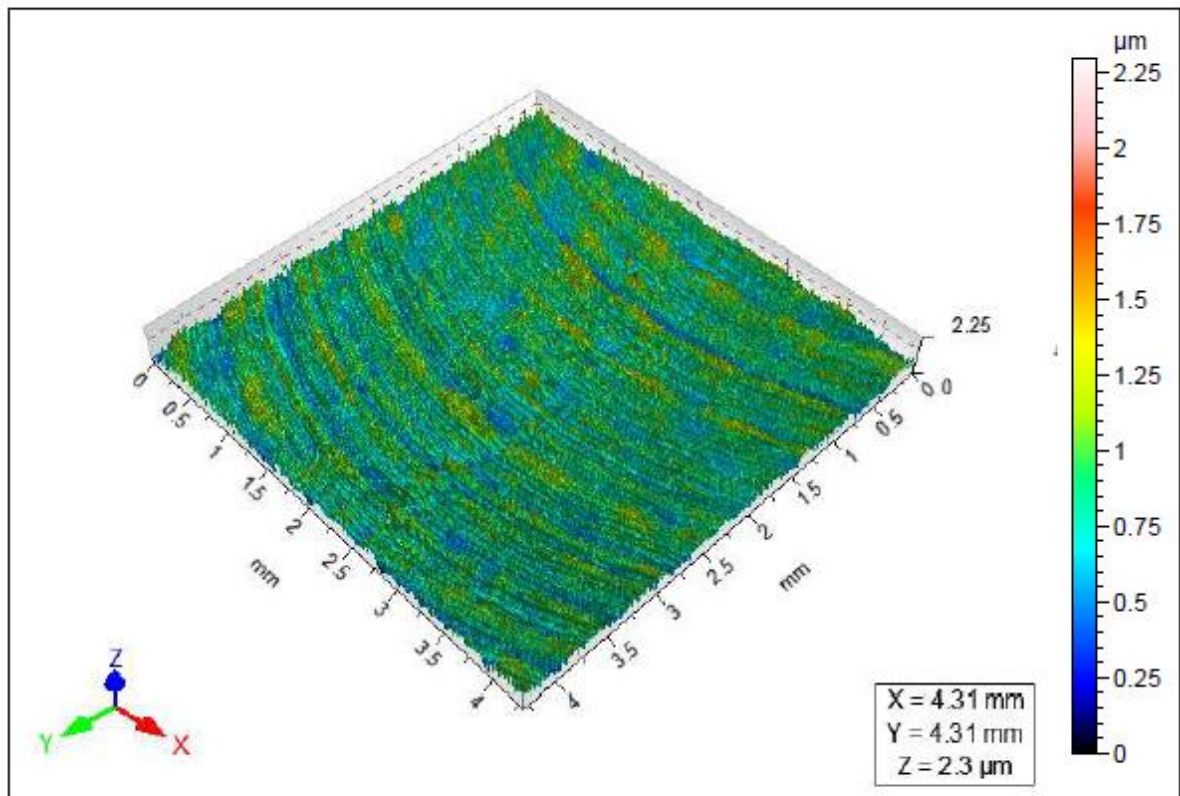
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Parâmetros de altura		
Sq	0.208	µm
Ssk	0.242	
Sku	3.24	
Sp	1.52	µm
Sv	0.775	µm
Sz	2.30	µm
Sa	0.166	µm

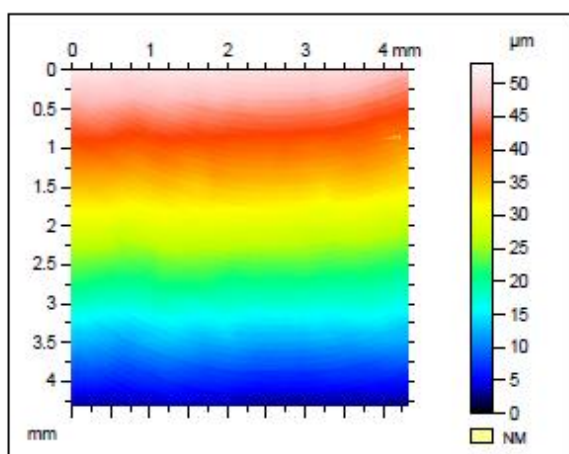


## Ti6Al4V\_Óleo

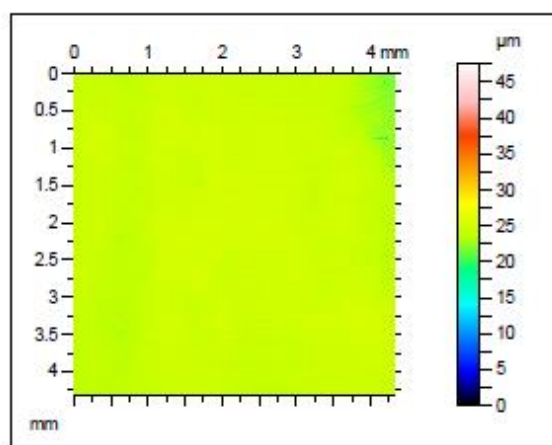
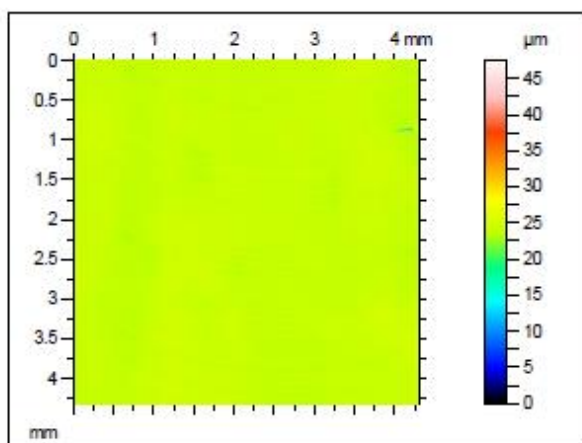
Canal 04

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

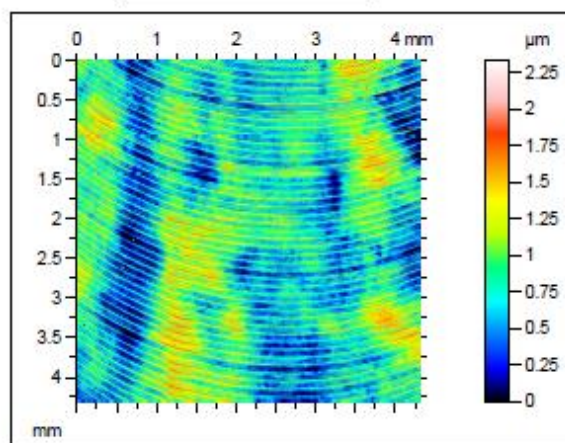
Superfície coletada



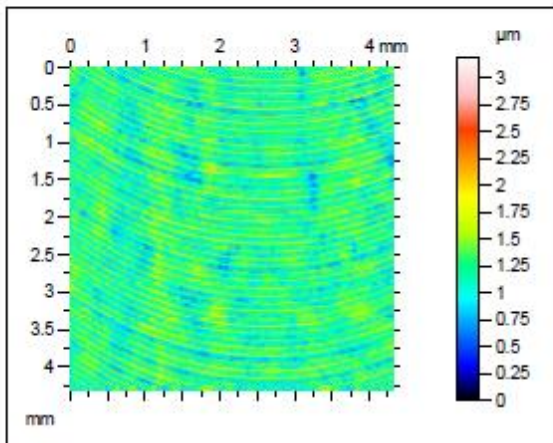
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

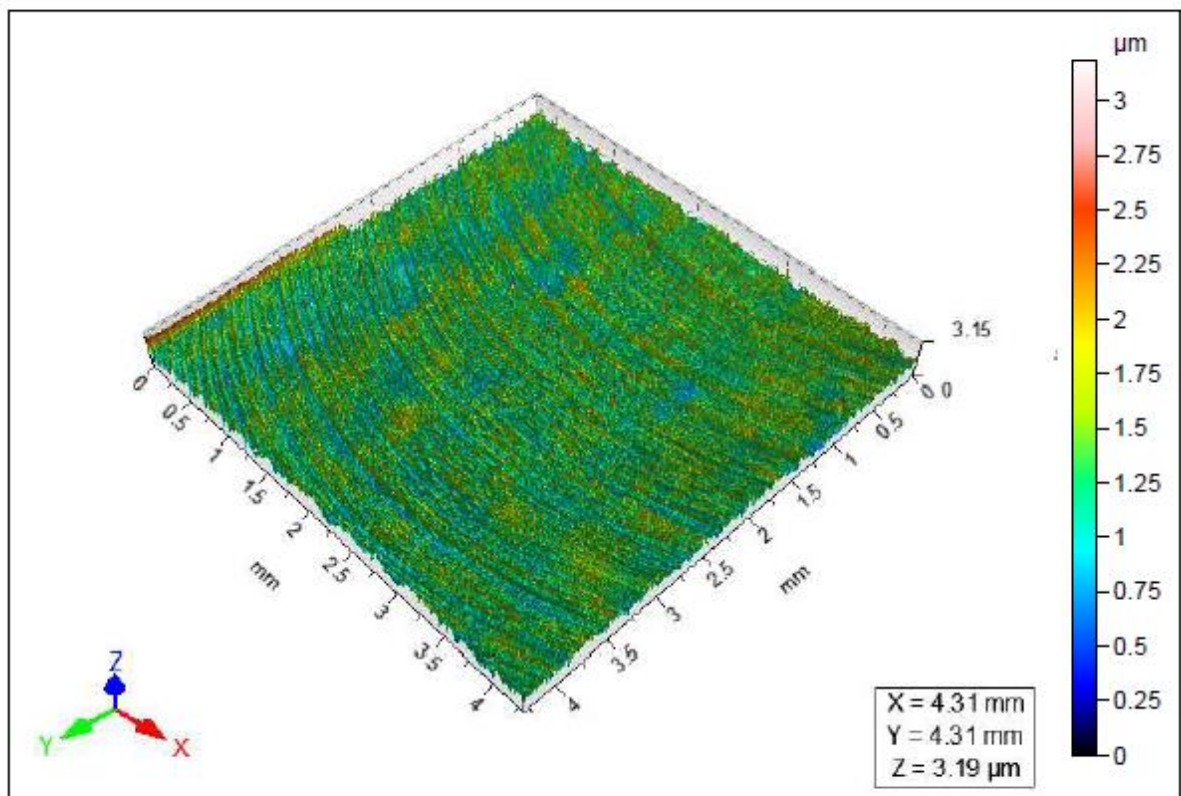
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Parâmetros de altura		
Sq	0.270	μm
Ssk	0.214	
Sku	3.33	
Sp	1.98	μm
Sv	1.21	μm
Sz	3.19	μm
Sa	0.217	μm

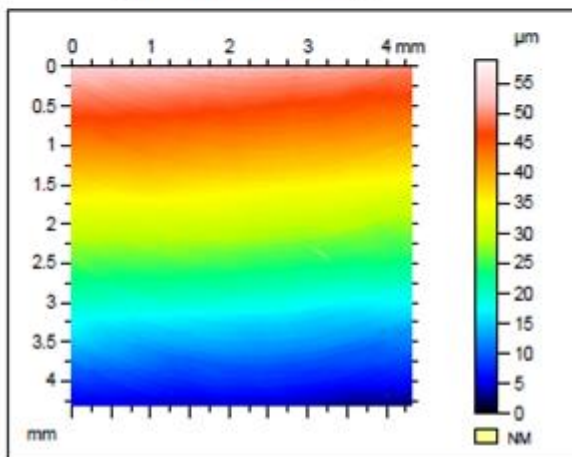


Ti6Al4V\_Óleo

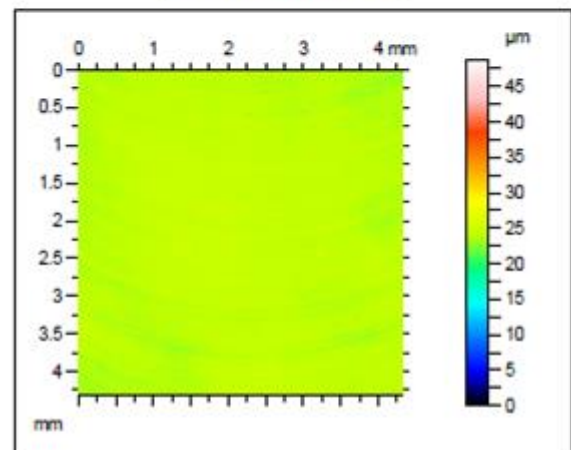
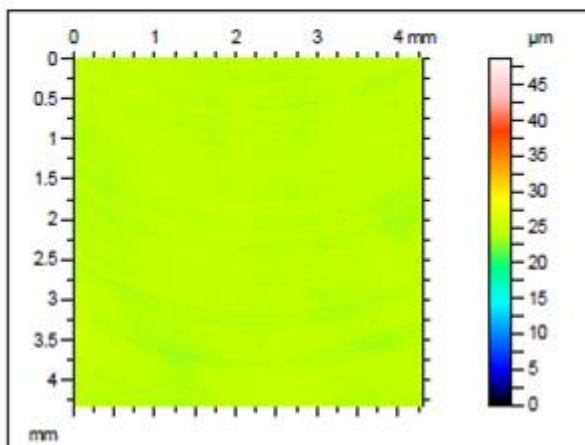
Canal 05

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

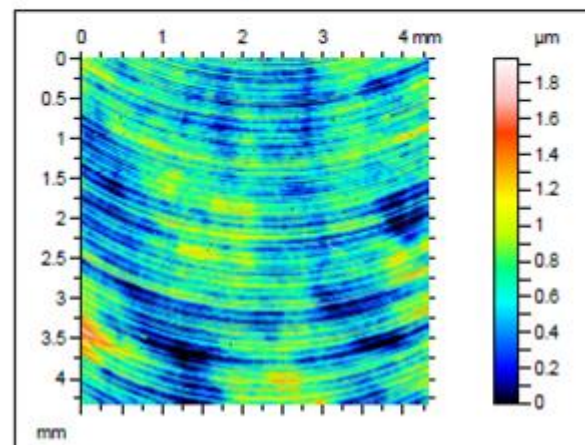
Superfície coletada



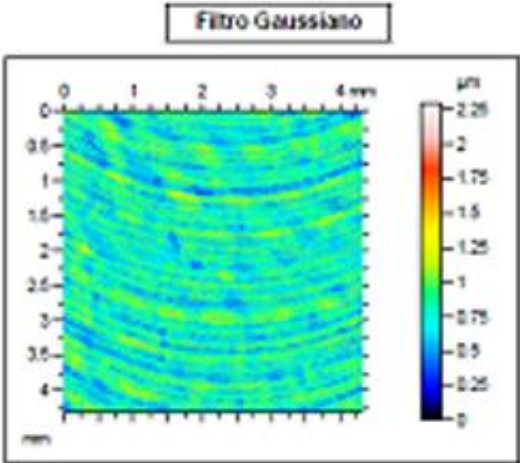
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

Thresholding



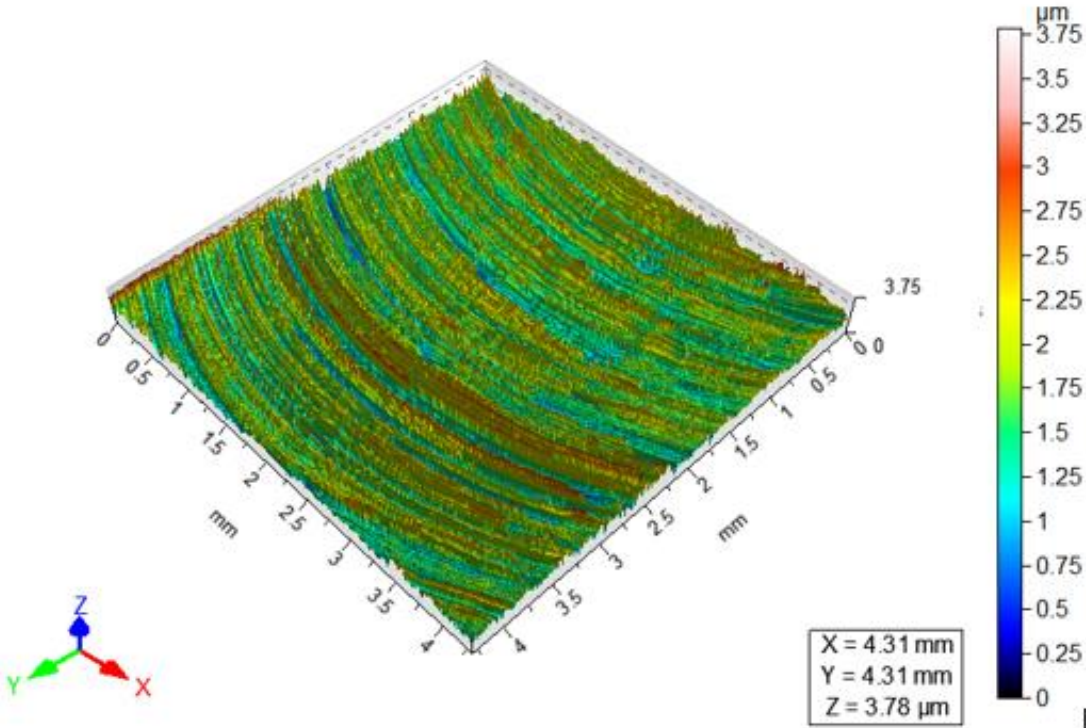




**ISO 25178**

Parámetros de altura

$S_q$	0.223	$\mu\text{m}$
$S_{sk}$	0.300	
$S_{ku}$	0.253	
$S_p$	1.12	$\mu\text{m}$
$S_v$	0.772	$\mu\text{m}$
$S_a$	3.78	$\mu\text{m}$
$S_e$	0.189	$\mu\text{m}$

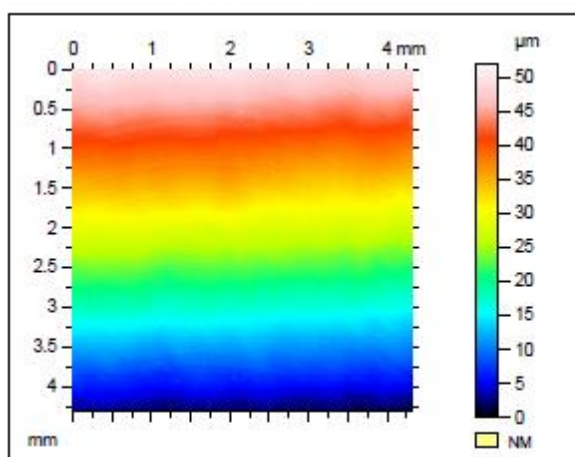


## Ti6Al4V\_Óleo

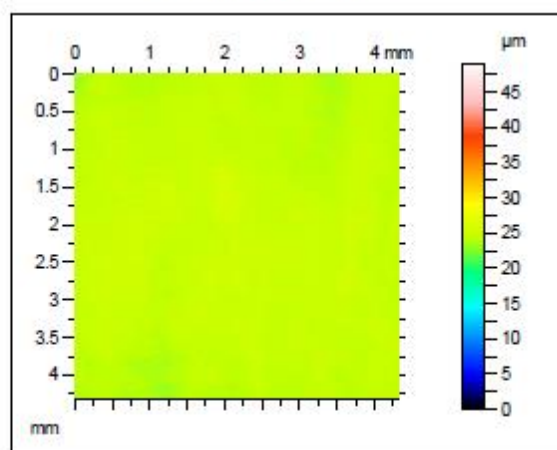
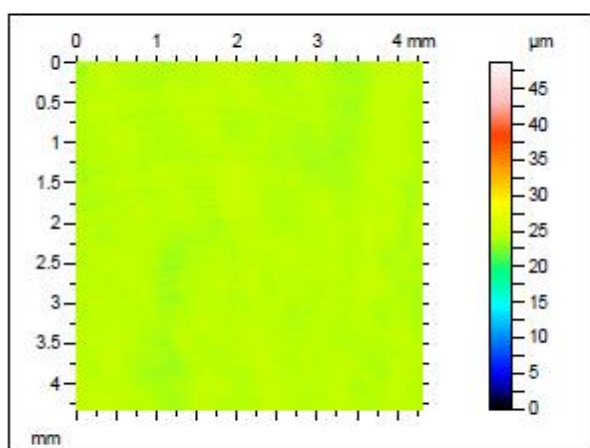
Canal 06

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

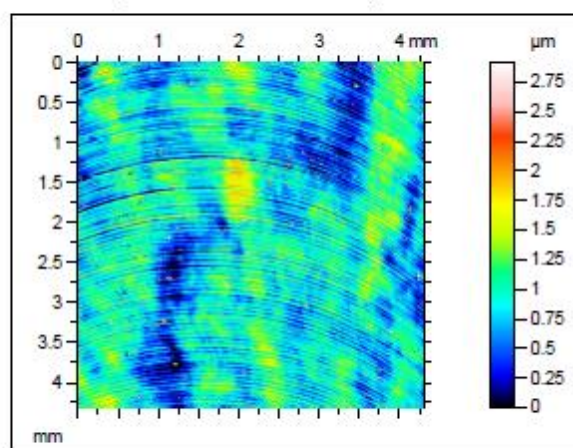
Superfície coletada



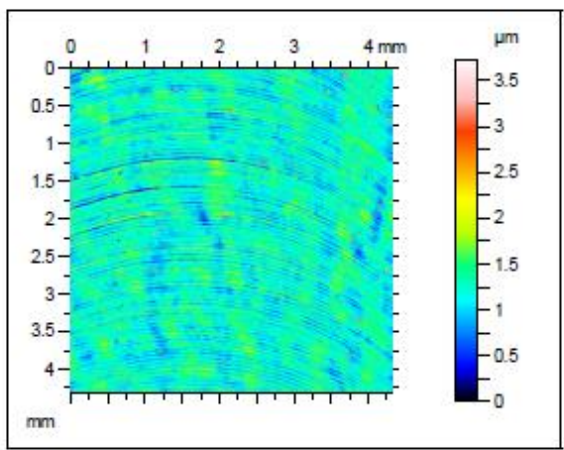
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

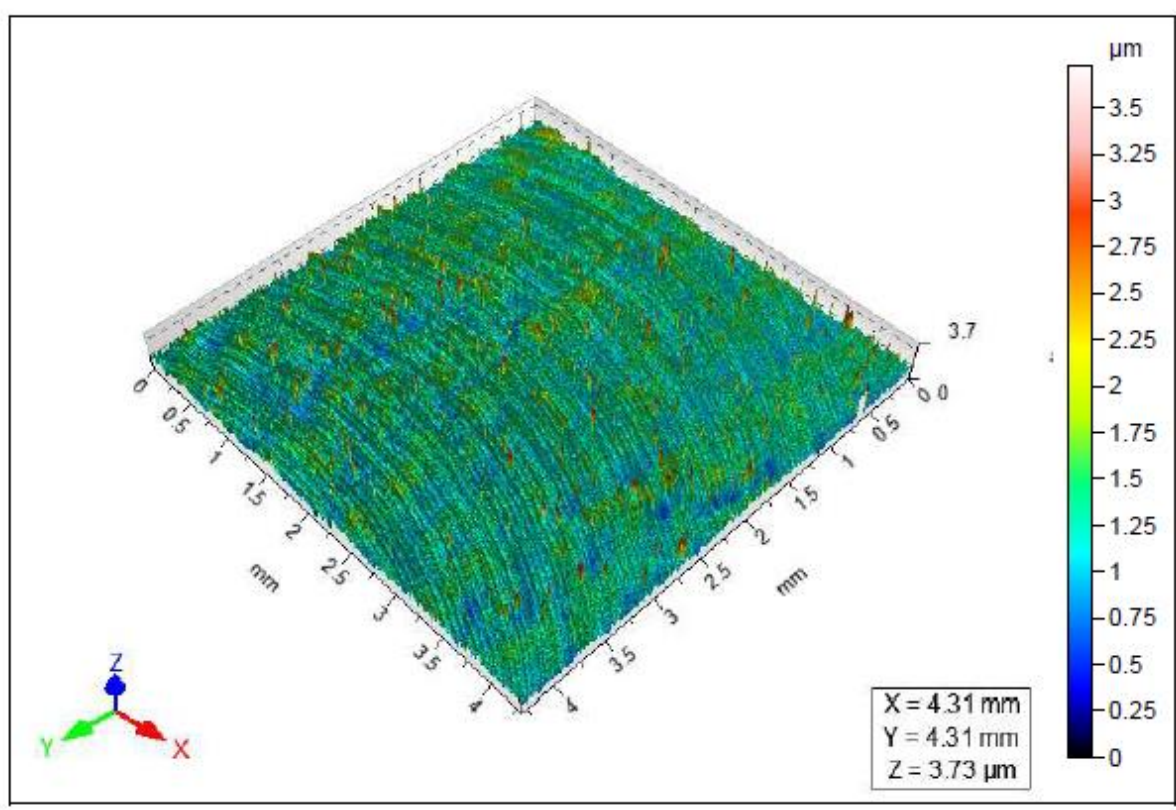
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Parâmetros de altura		
Sq	0.285	µm
Ssk	1.07	
Sku	8.66	
Sp	2.50	µm
Sv	1.23	µm
Sz	3.73	µm
Sa	0.213	µm

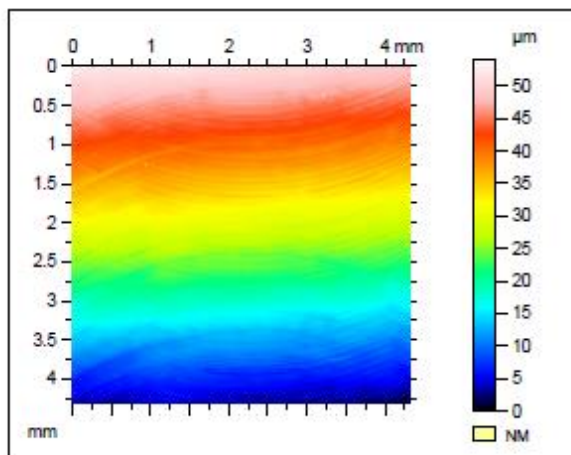


Ti6Al4V\_Óleo

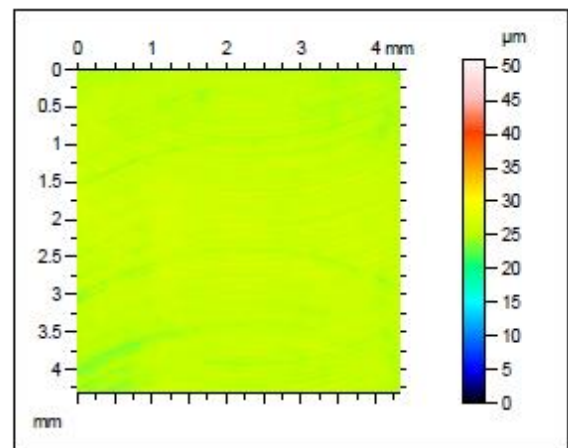
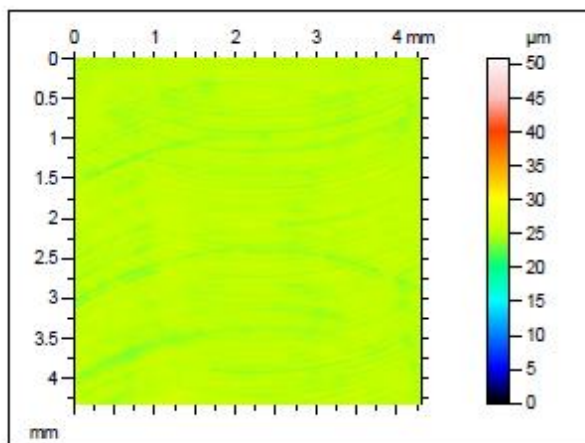
Canal 07

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

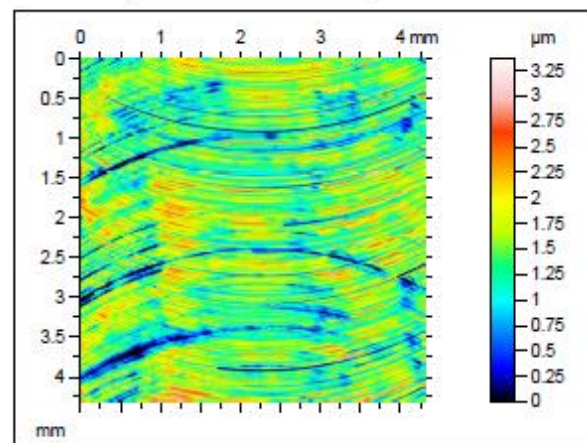
Superfície coletada



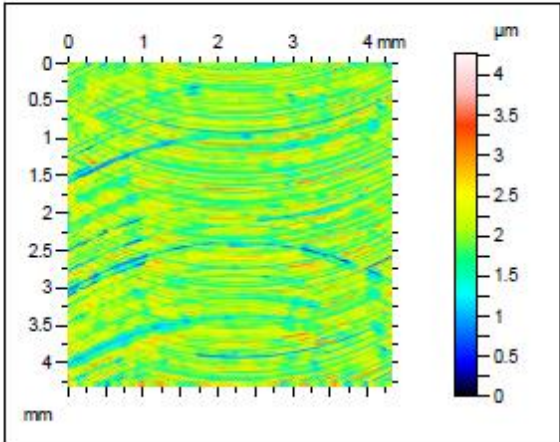
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

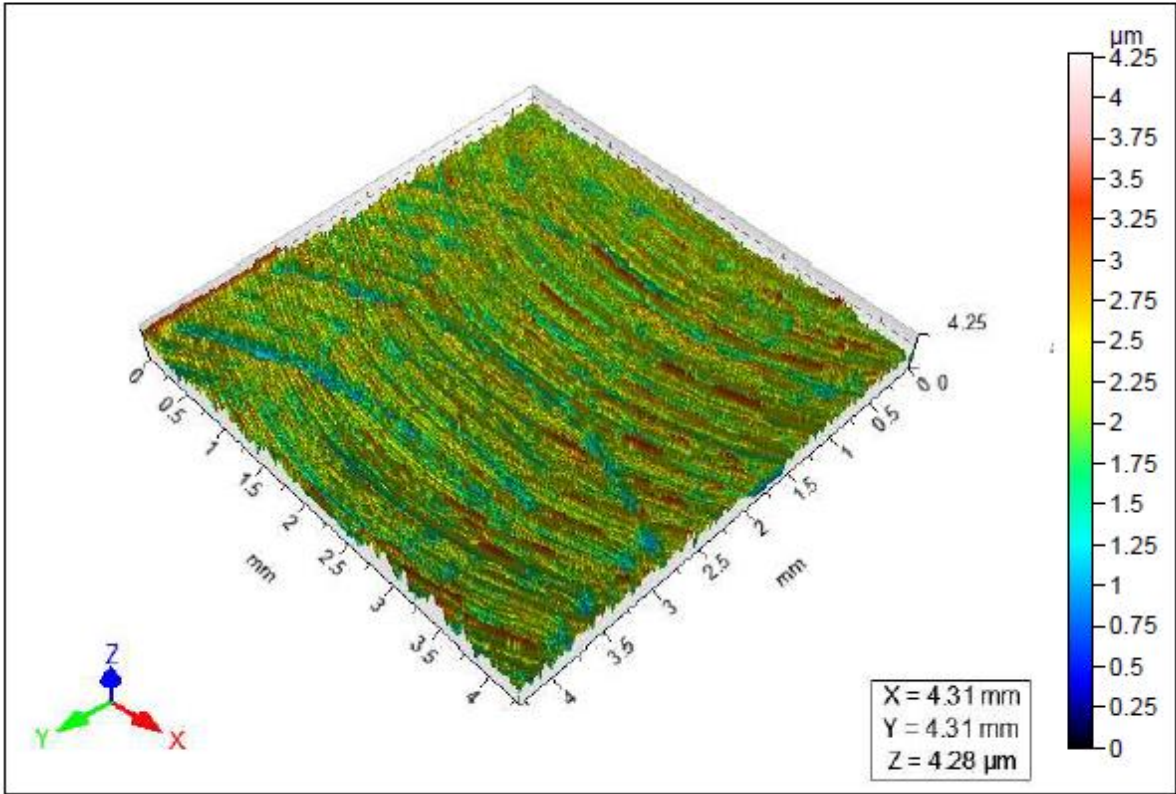
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.426	$\mu\text{m}$
Ssk	-0.0428	
Sku	3.85	
Sp	2.27	$\mu\text{m}$
Sv	2.01	$\mu\text{m}$
Sz	4.28	$\mu\text{m}$
Sa	0.327	$\mu\text{m}$

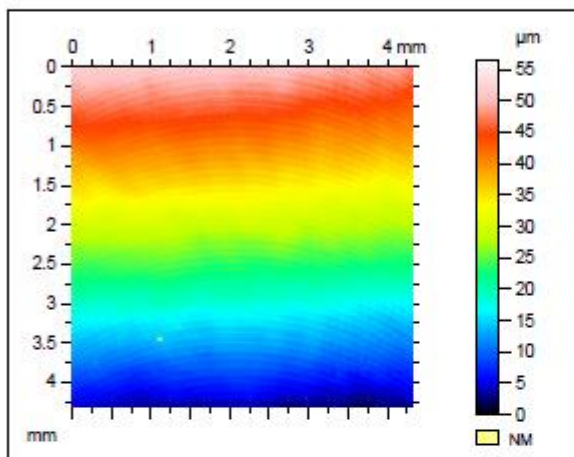


Ti6Al4V\_Óleo

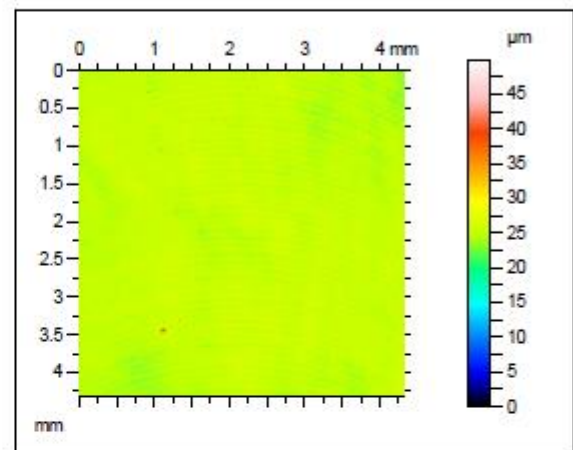
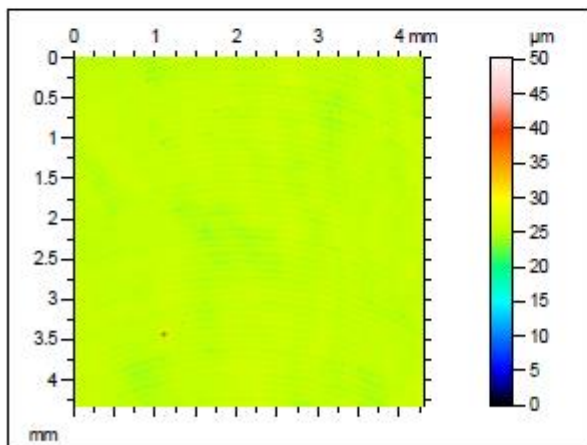
Canal 08

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

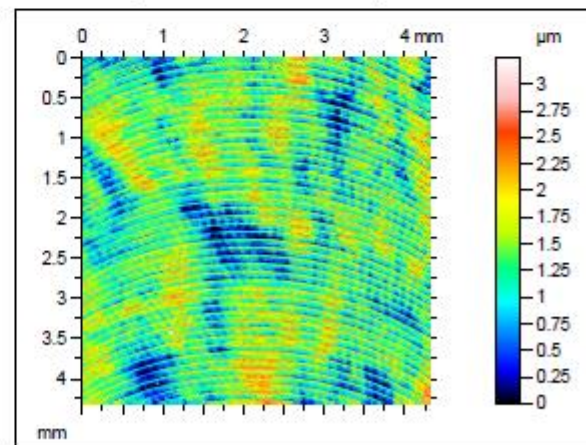
Superfície coletada

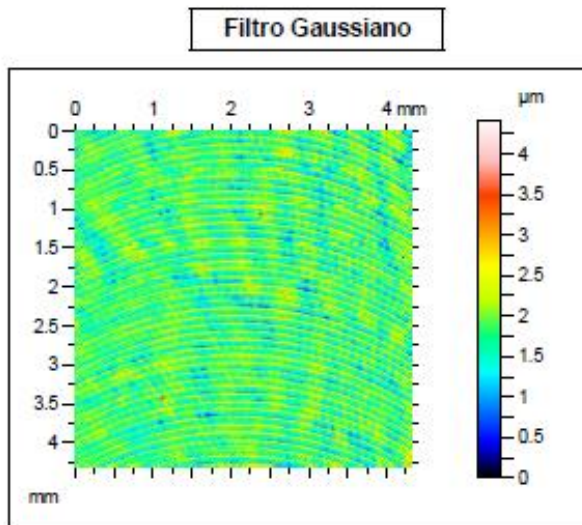


Superfície Nivelada

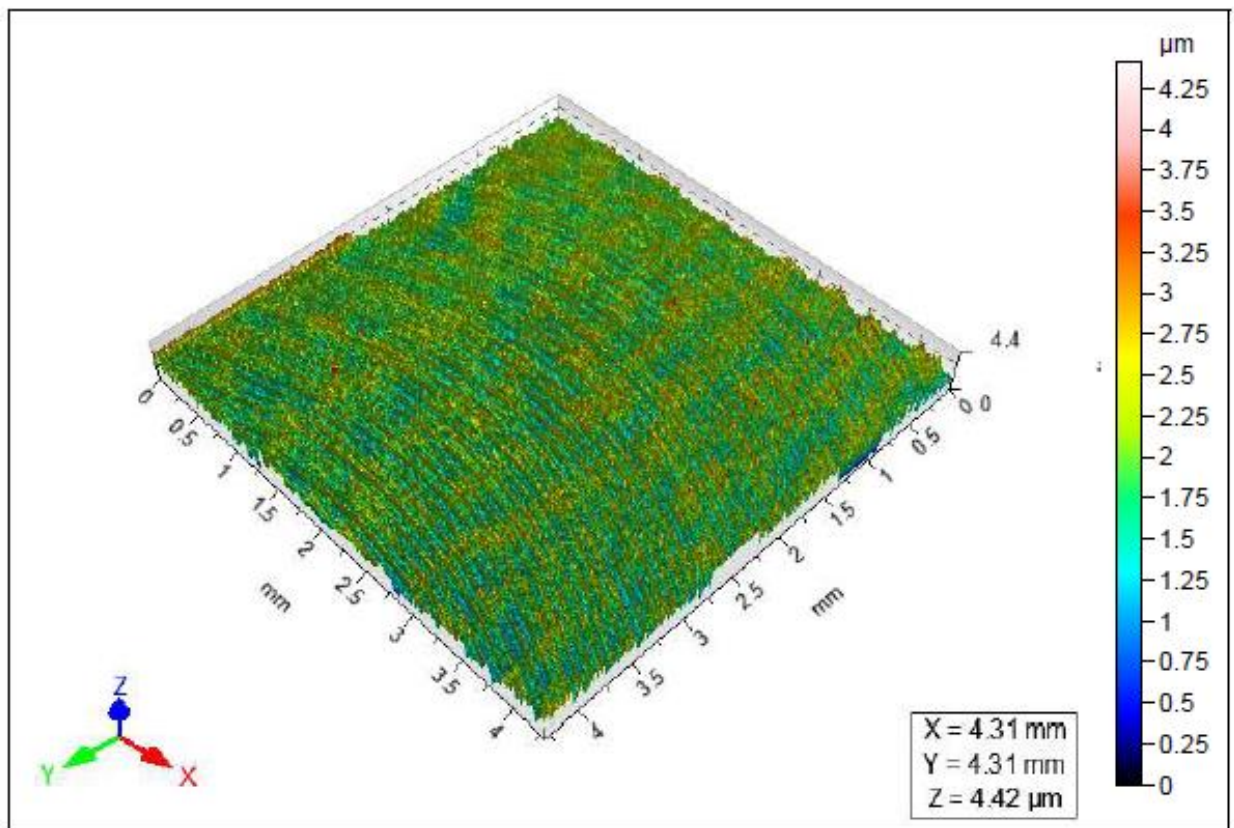
Superfície com  
remoção de forma

Thresholding





ISO 25178		
Height Parameters		
<b>Sq</b>	0.440	$\mu\text{m}$
<b>Ssk</b>	0.158	
<b>Sku</b>	3.03	
<b>Sp</b>	2.61	$\mu\text{m}$
<b>Sv</b>	1.81	$\mu\text{m}$
<b>Sz</b>	4.42	$\mu\text{m}$
<b>Sa</b>	0.351	$\mu\text{m}$

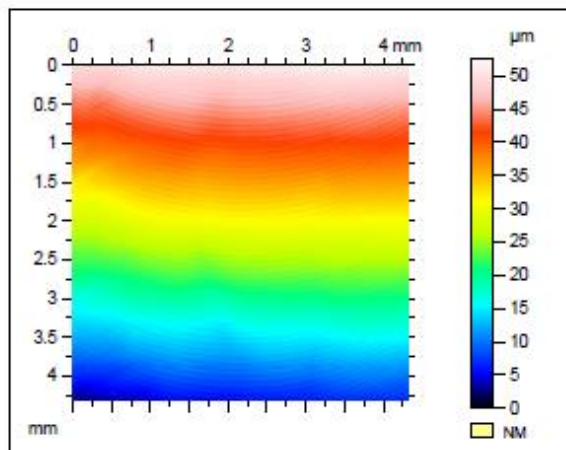


## Ti6Al4V\_Óleo

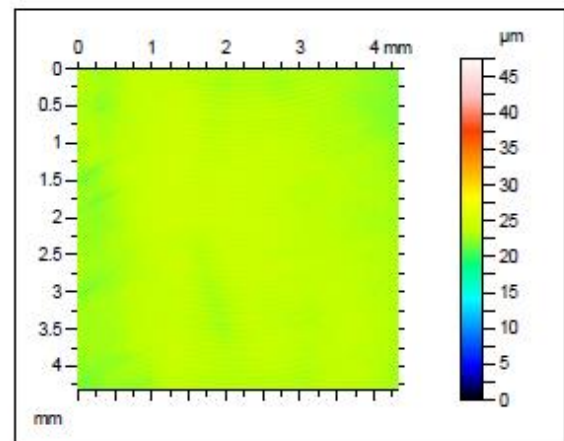
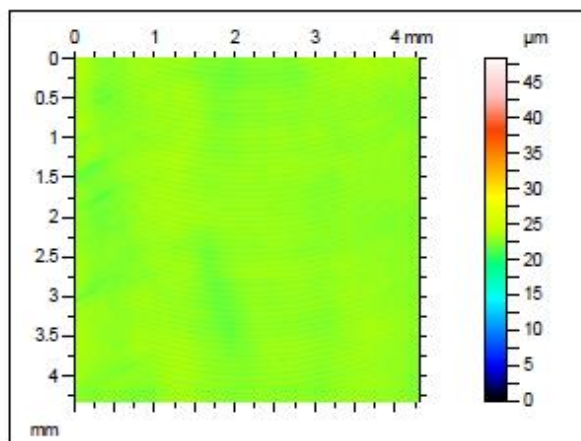
Canal 09

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

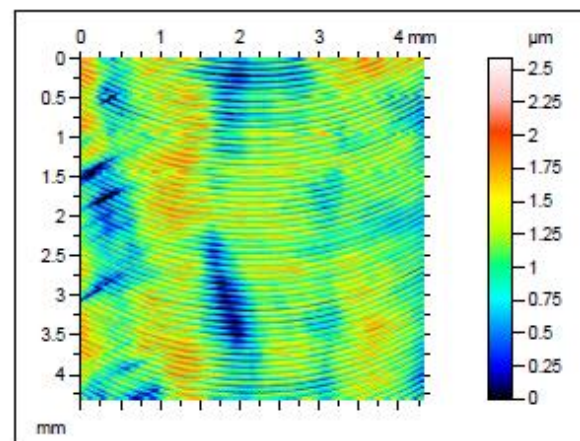
Superfície coletada



Superfície Nivelada

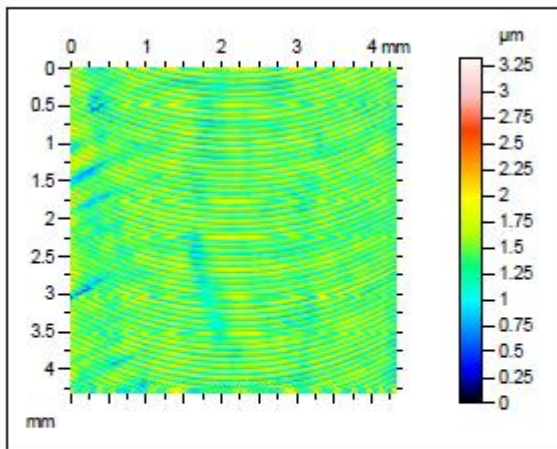
Superfície com  
remoção de forma

Thresholding

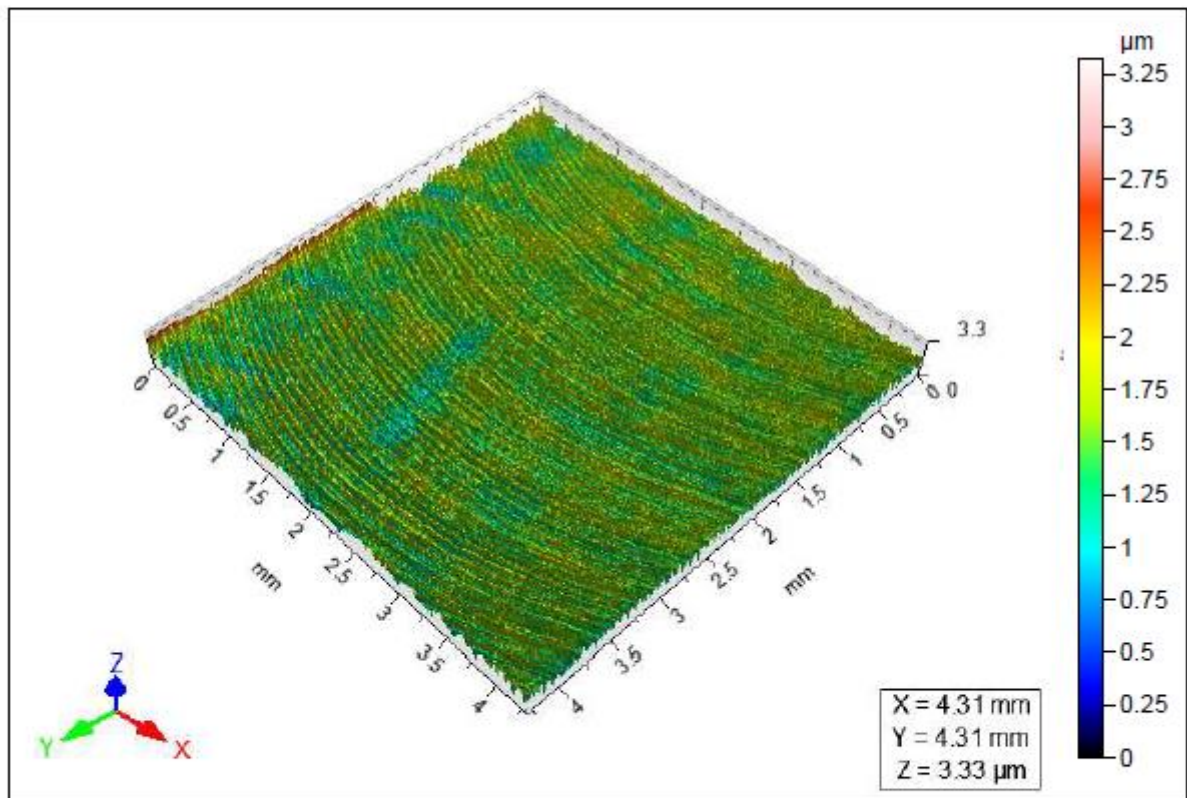




Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.310	$\mu\text{m}$
Ssk	-0.263	
Sku	2.54	
Sp	1.92	$\mu\text{m}$
Sv	1.41	$\mu\text{m}$
Sz	3.33	$\mu\text{m}$
Sa	0.256	$\mu\text{m}$

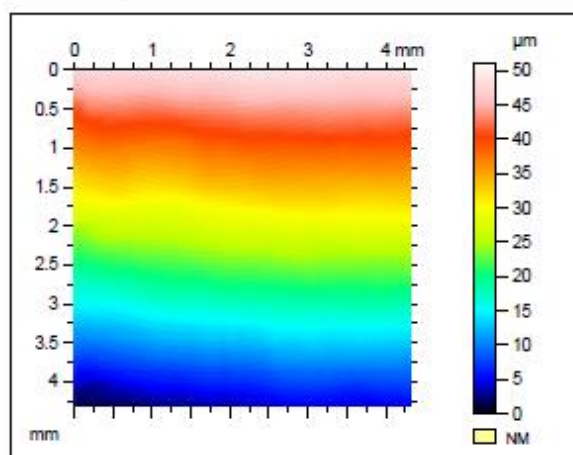


## Ti6Al4V\_Óleo

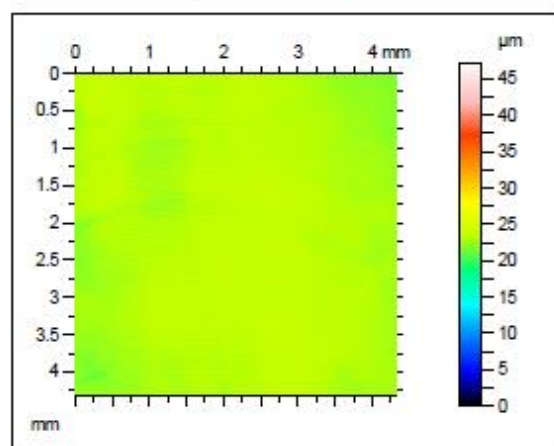
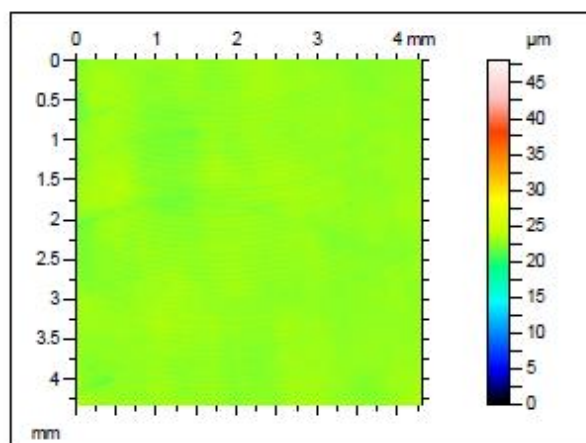
Canal 10

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

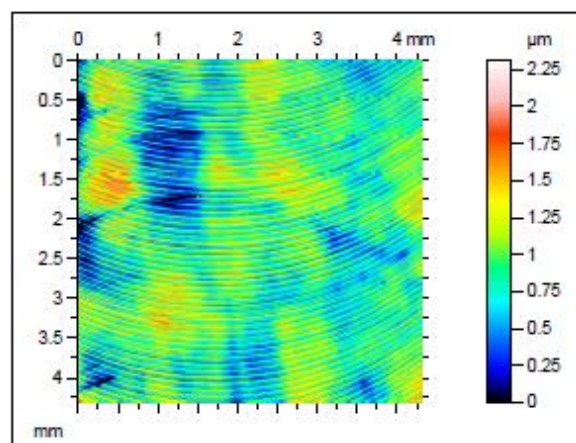
Superfície coletada



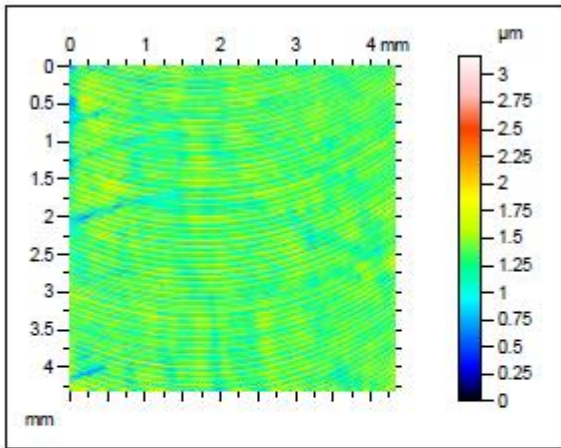
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

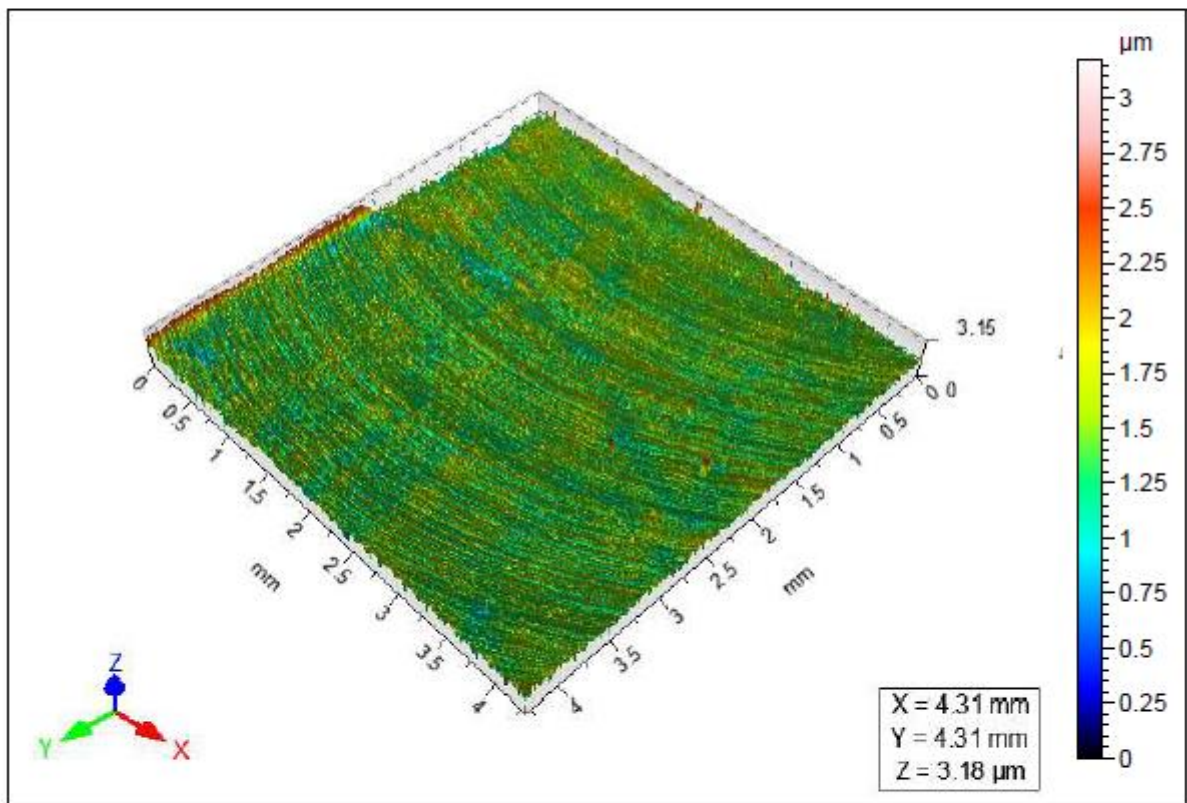
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.259	µm
Ssk	-0.115	
Sku	3.60	
Sp	1.85	µm
Sv	1.33	µm
Sz	3.18	µm
Sa	0.205	µm

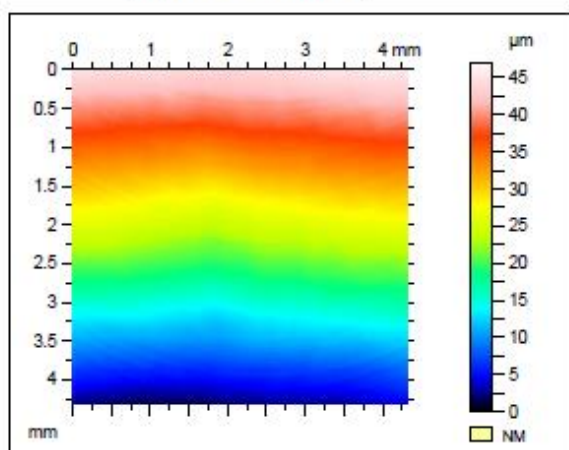


## Ti6Al4V\_Óleo

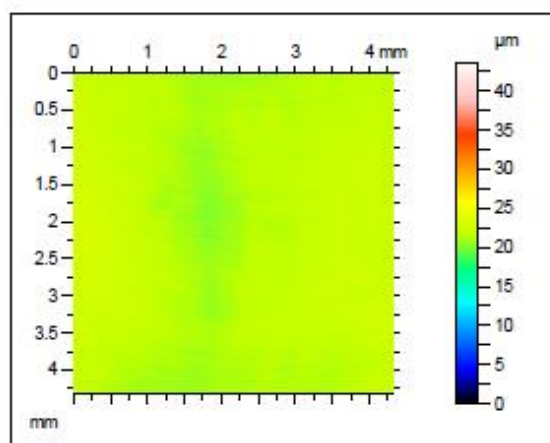
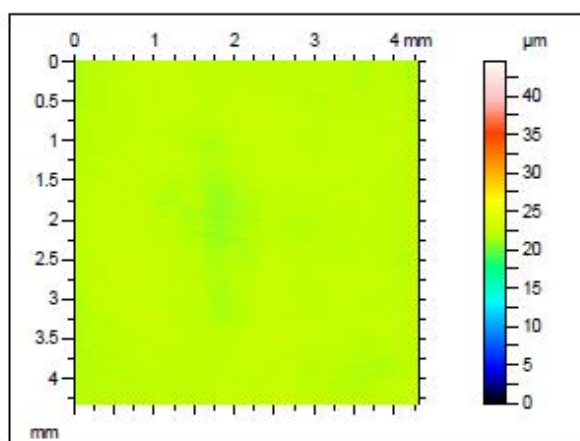
Canal 11

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

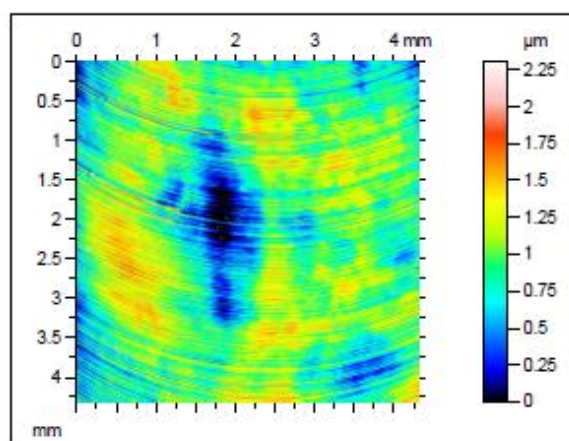
Superfície coletada



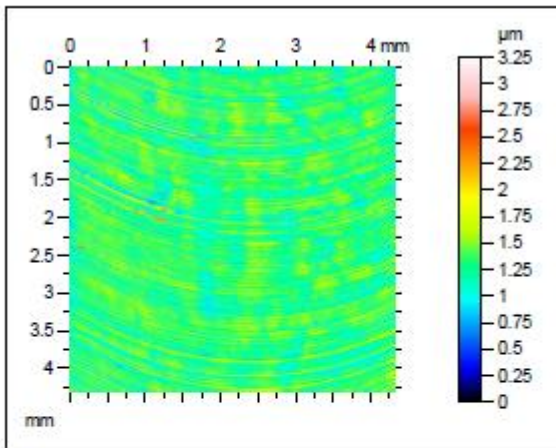
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

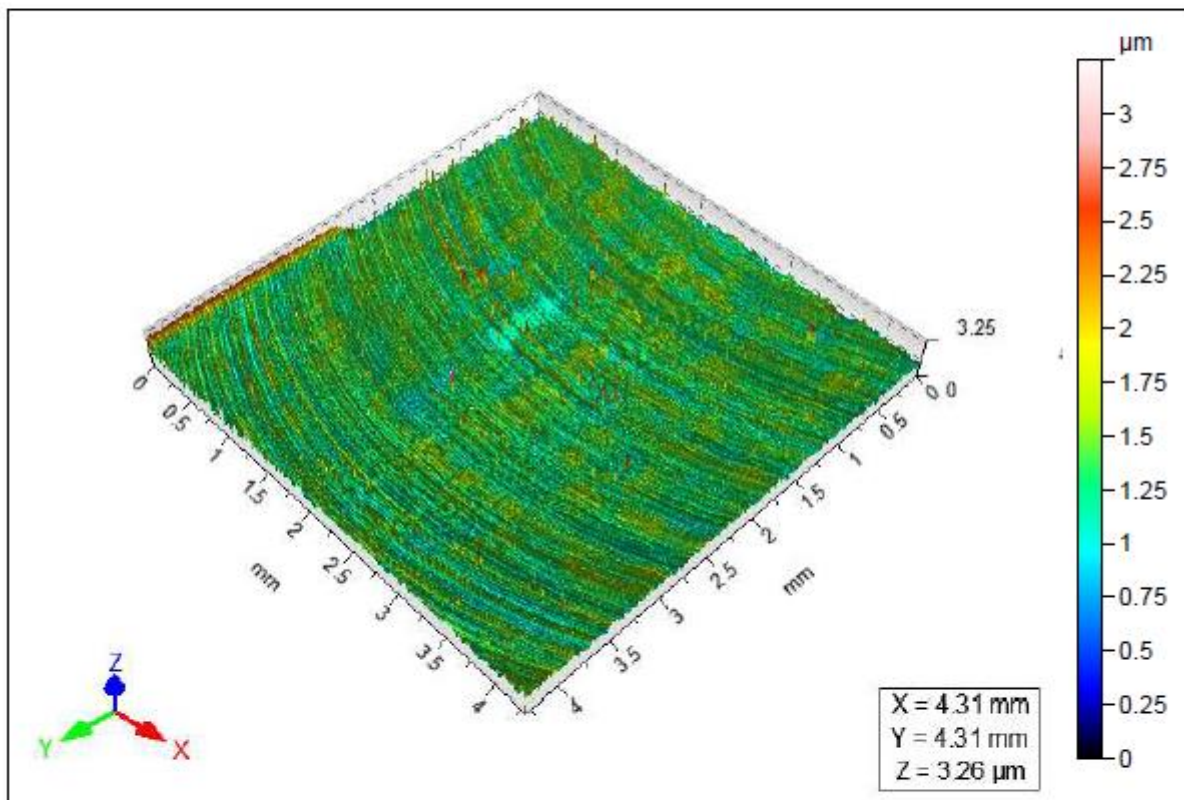
Thresholding



**Filtro Gaussiano**



ISO 25178		
Height Parameters		
<b>Sq</b>	0.201	µm
<b>Ssk</b>	0.482	
<b>Sku</b>	5.98	
<b>Sp</b>	1.95	µm
<b>Sv</b>	1.31	µm
<b>Sz</b>	3.26	µm
<b>Sa</b>	0.153	µm

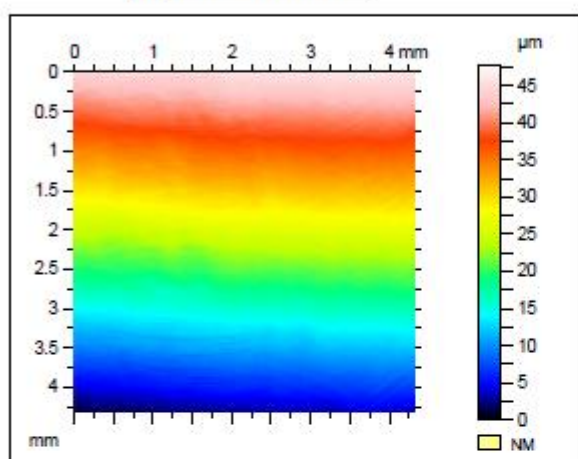


## Ti6Al4V\_Óleo

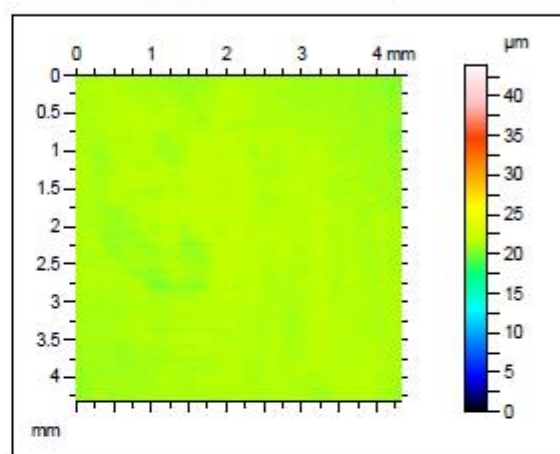
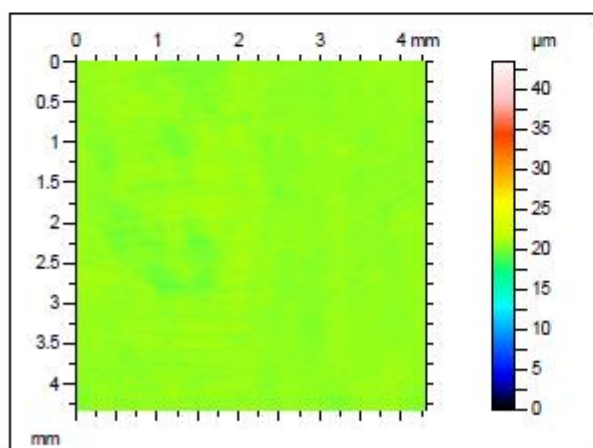
## Canal 12

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

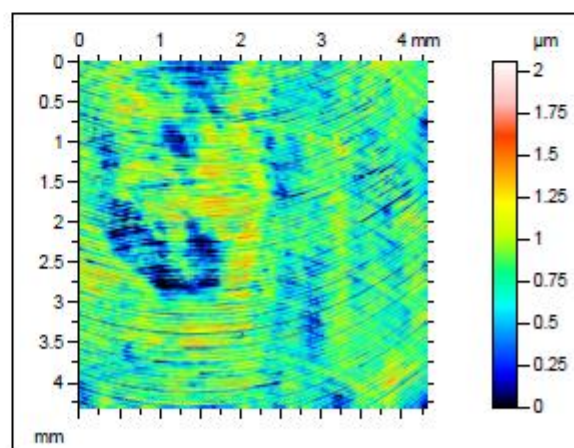
Superfície coletada



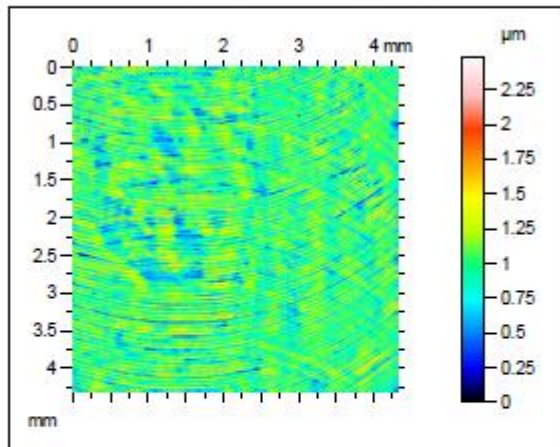
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

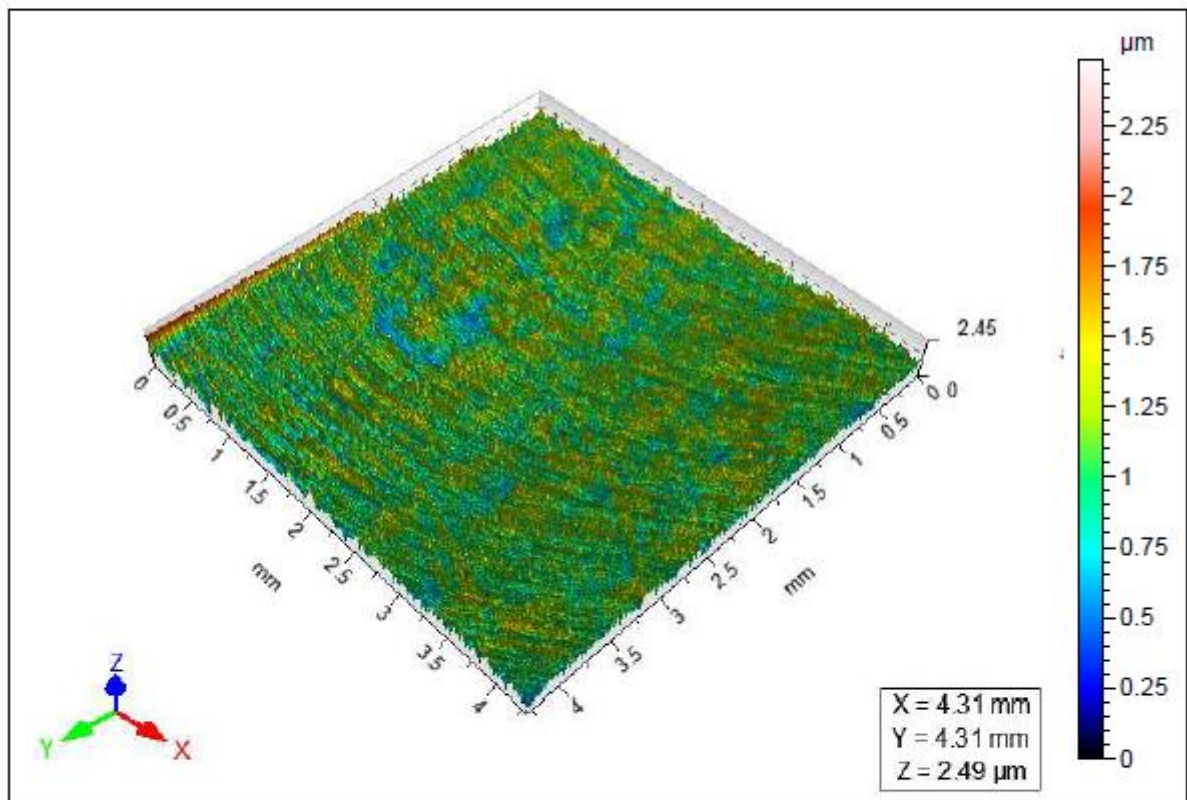
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.245	$\mu\text{m}$
Ssk	0.00309	
Sku	3.22	
Sp	1.51	$\mu\text{m}$
Sv	0.982	$\mu\text{m}$
Sz	2.49	$\mu\text{m}$
Sa	0.195	$\mu\text{m}$

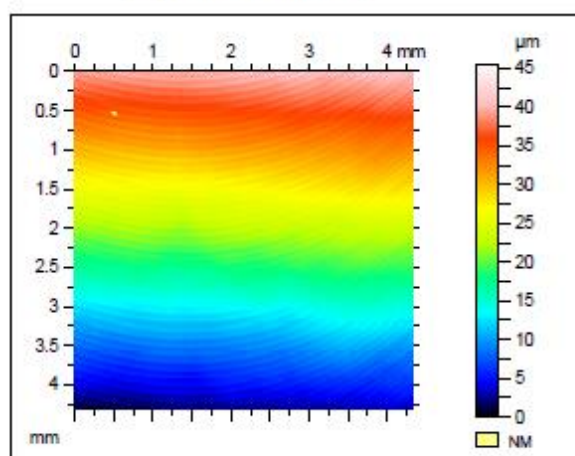


## Ti6Al4V\_Óleo

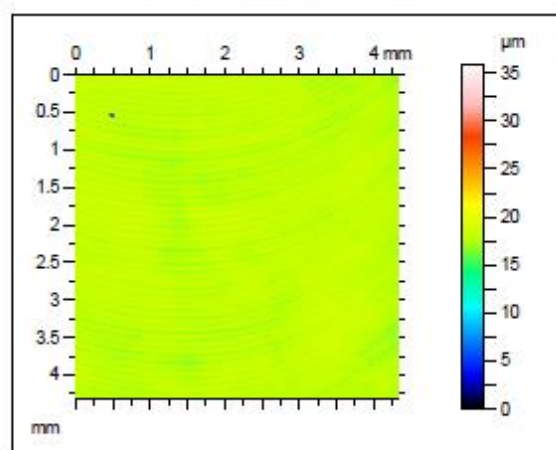
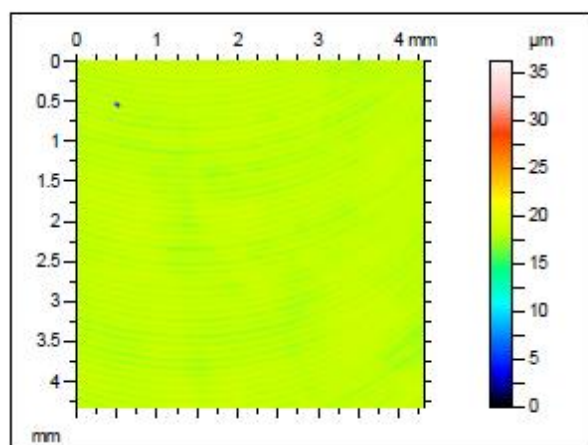
Canal 13

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

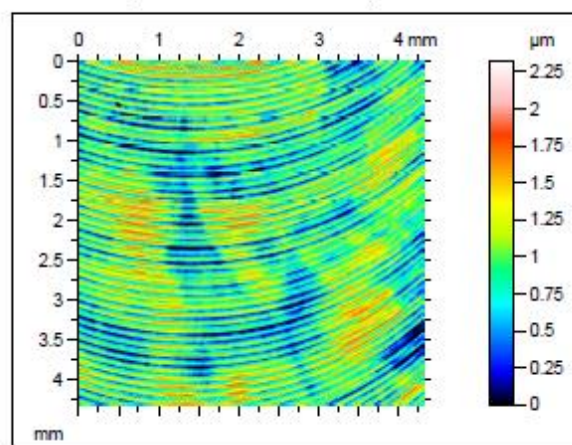
Superfície coletada



Superfície Nivelada

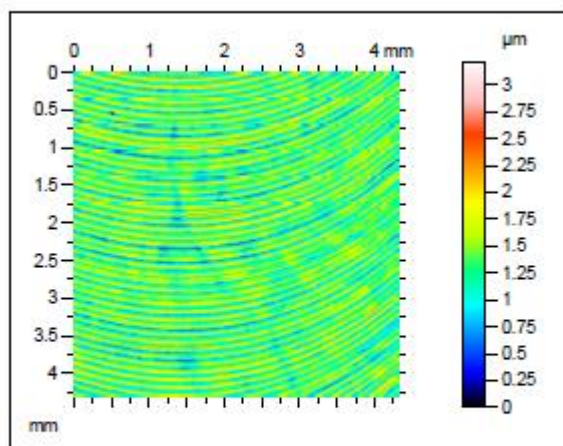
Superfície com  
remoção de forma

Thresholding

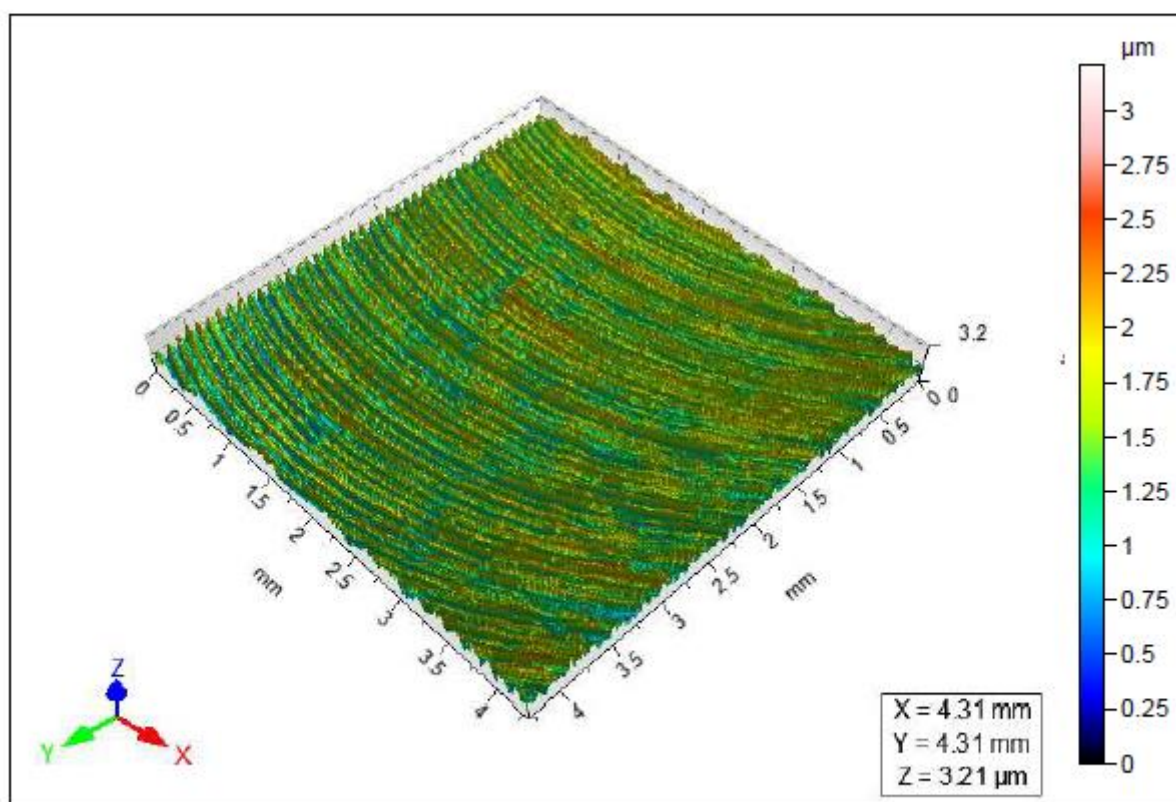




### Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.332	$\mu\text{m}$
Ssk	0.0407	
Sku	2.59	
Sp	1.87	$\mu\text{m}$
Sv	1.34	$\mu\text{m}$
Sz	3.21	$\mu\text{m}$
Sa	0.273	$\mu\text{m}$



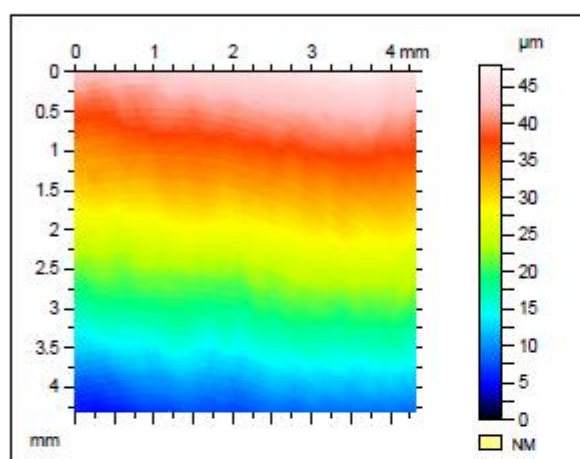
X = 4.31 mm  
Y = 4.31 mm  
Z = 3.21  $\mu\text{m}$

## Ti6Al4V\_Óleo

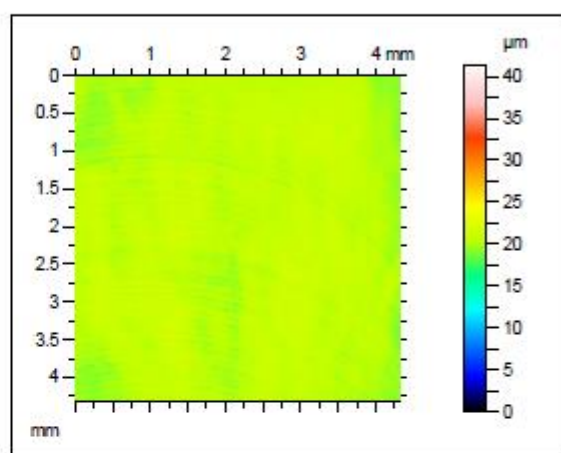
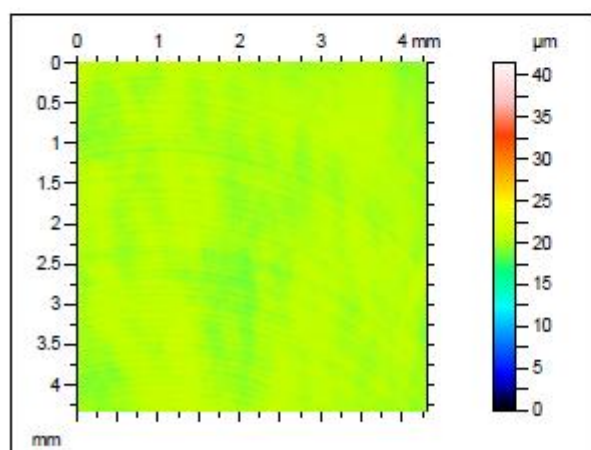
Canal 14

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

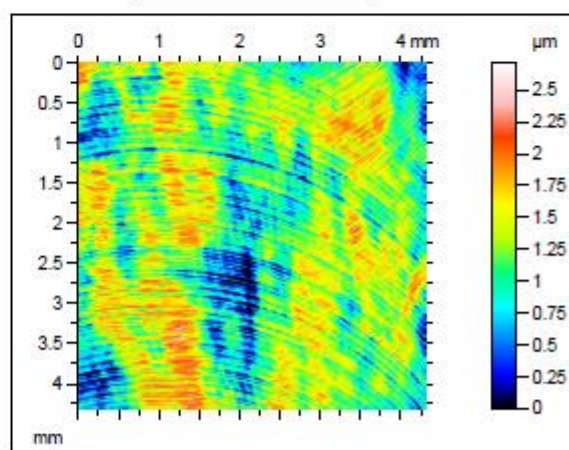
Superfície coletada



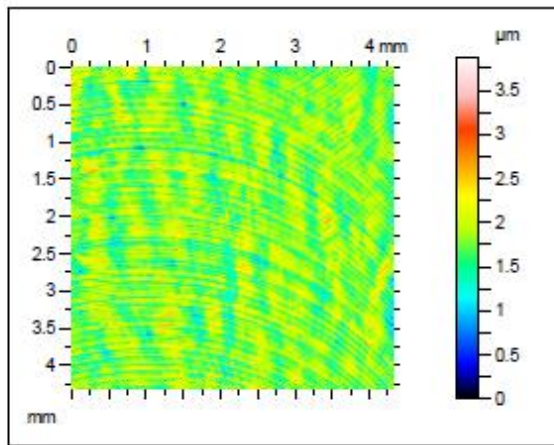
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

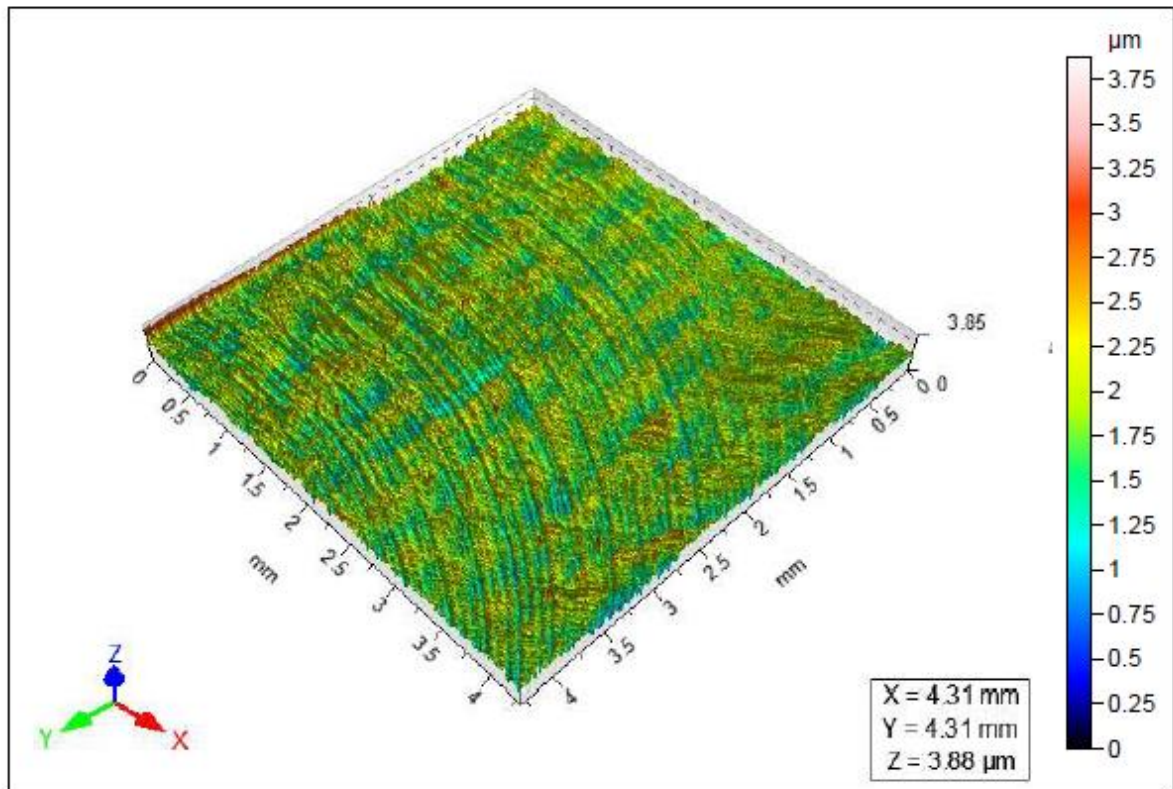
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.280	μm
Ssk	-0.208	
Sku	4.02	
Sp	2.09	μm
Sv	1.79	μm
Sz	3.88	μm
Sa	0.215	μm

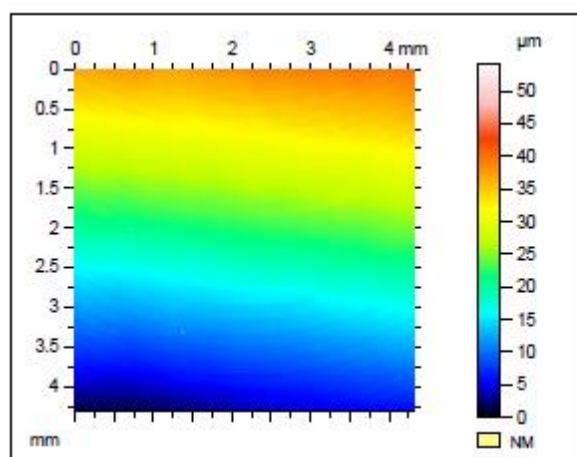


Ti6Al4V\_Óleo

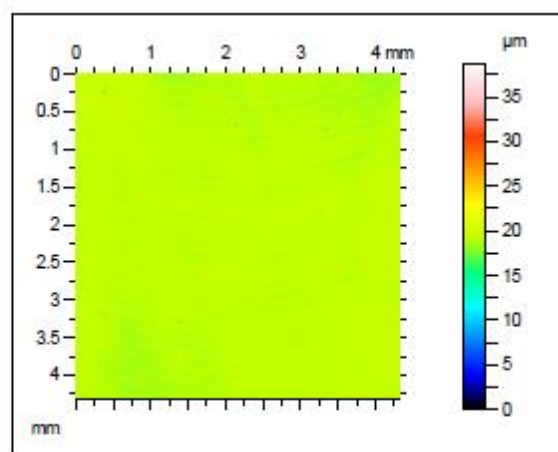
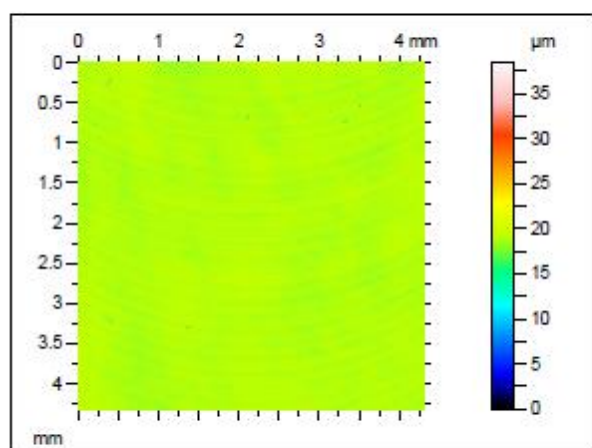
Canal 15

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

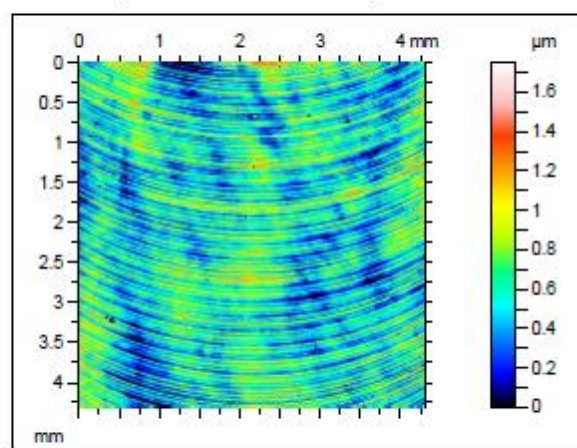
Superfície coletada

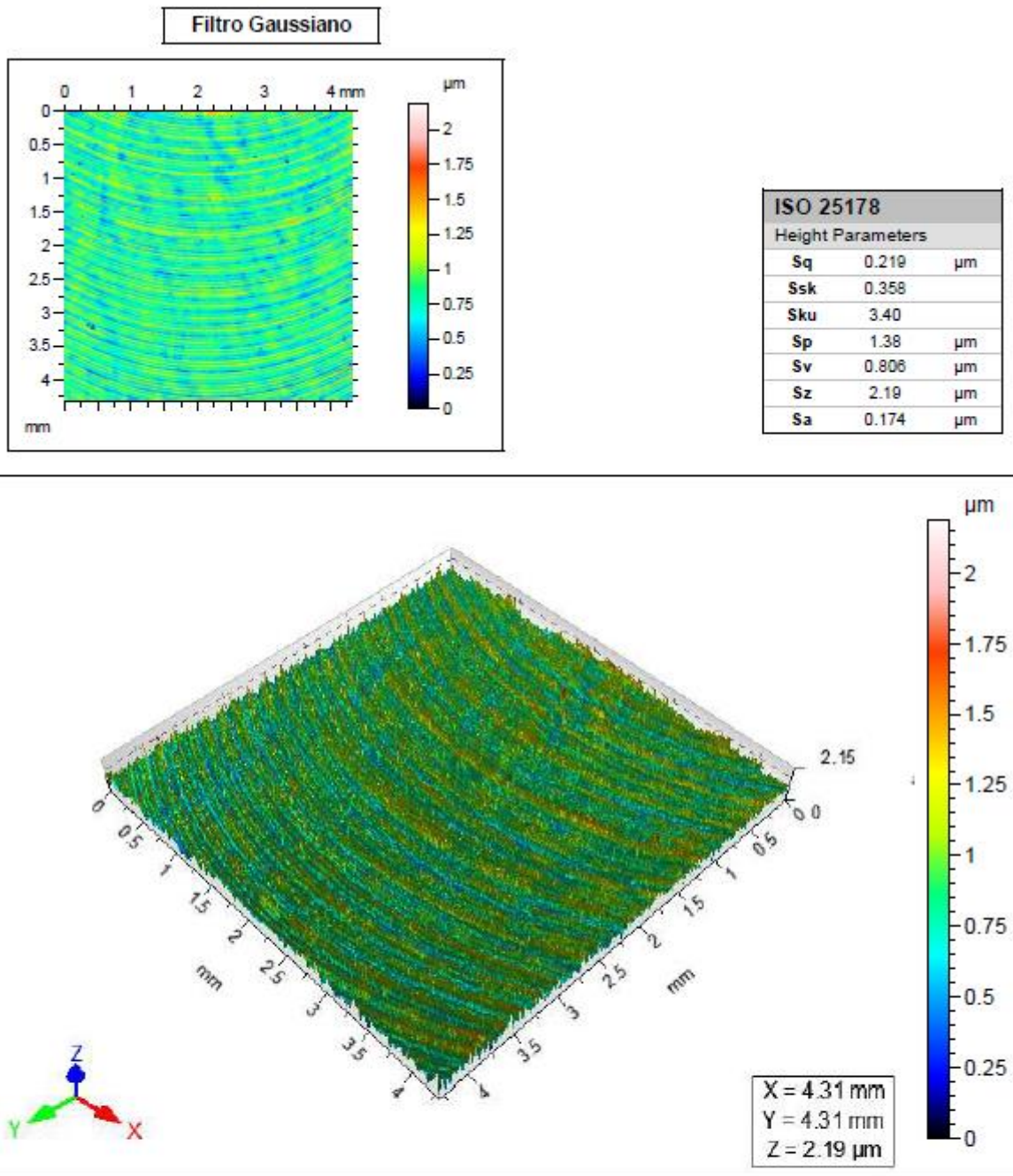


Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

Thresholding



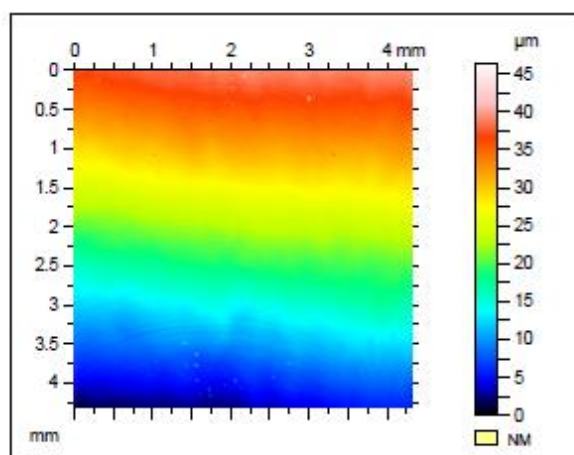


Ti6Al4V\_Óleo

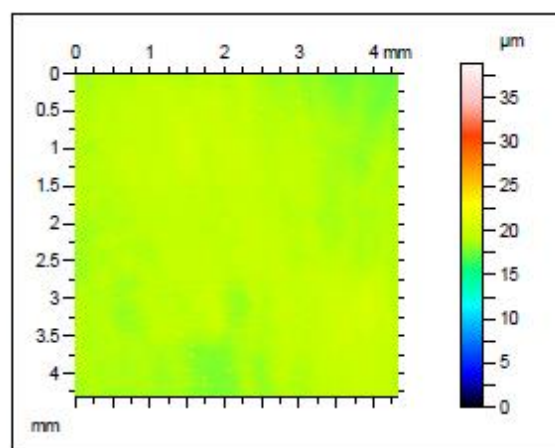
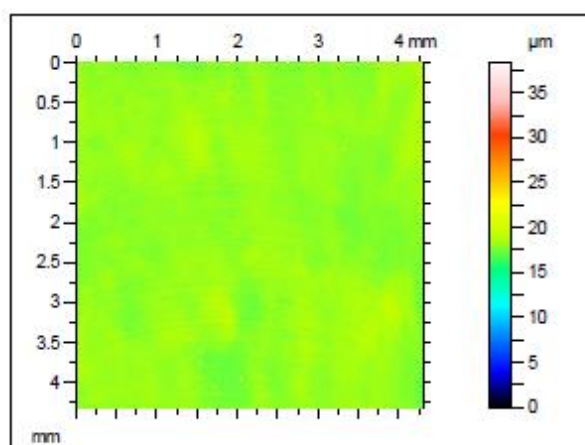
Canal 16

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

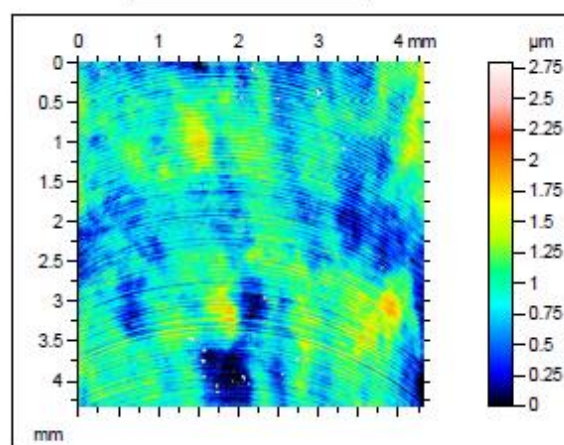
Superfície coletada

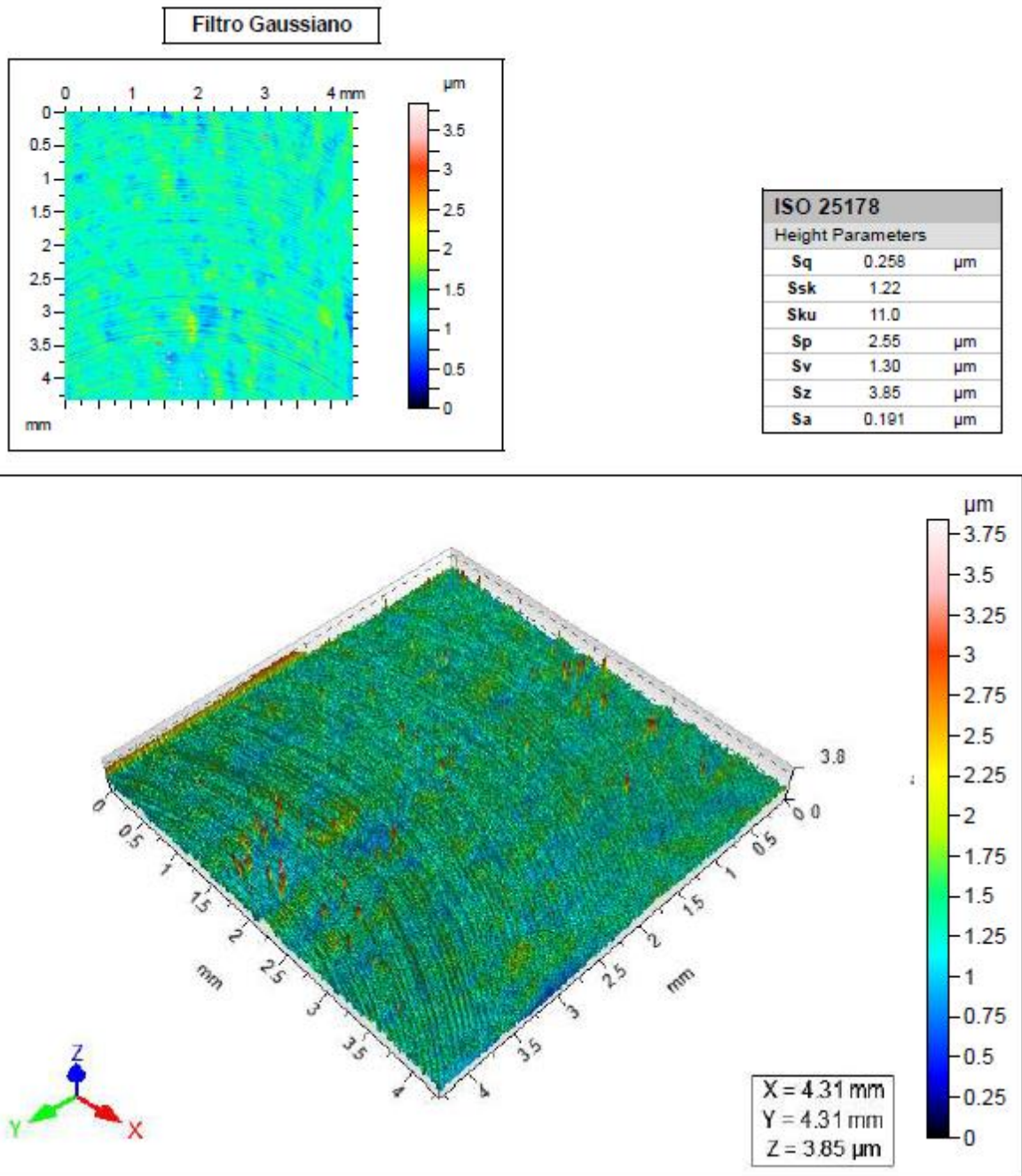


Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

Thresholding



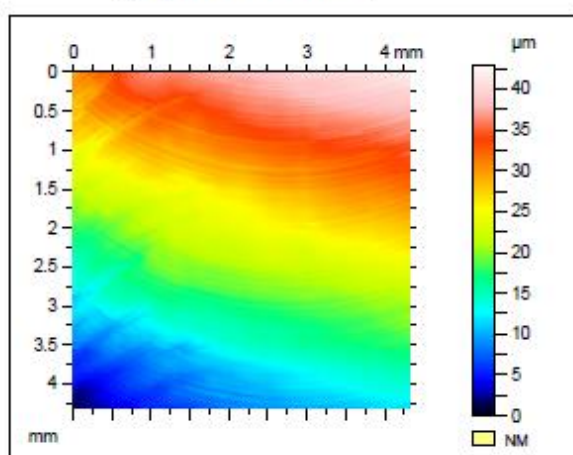


Ti6Al4V\_Óleo

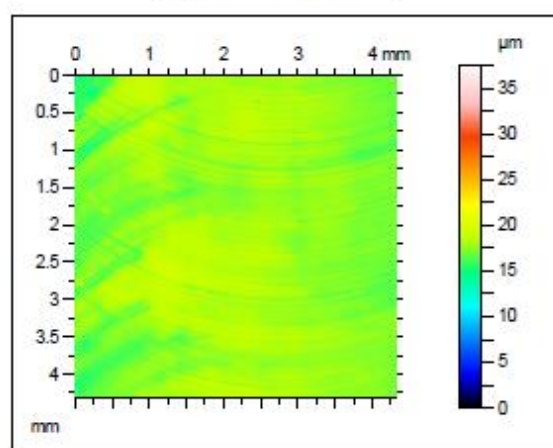
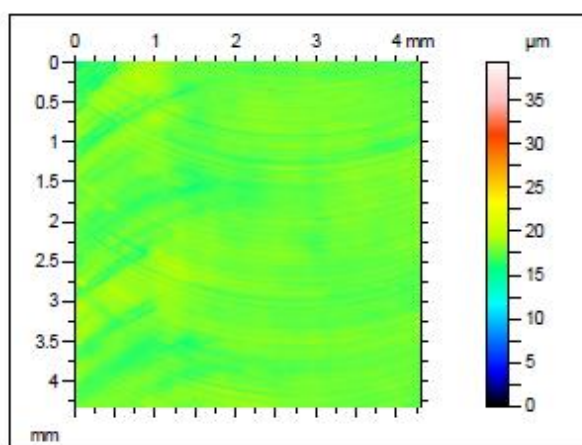
Canal 17

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

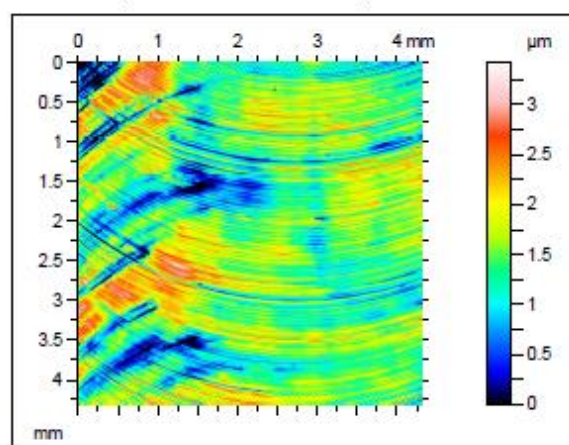
Superfície coletada



Superfície Nivelada

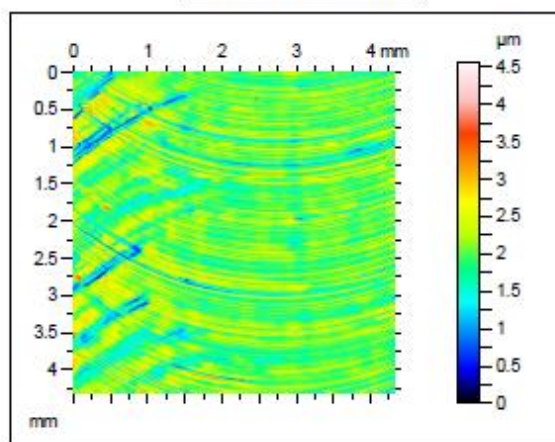
Superfície com  
remoção de forma

Thresholding

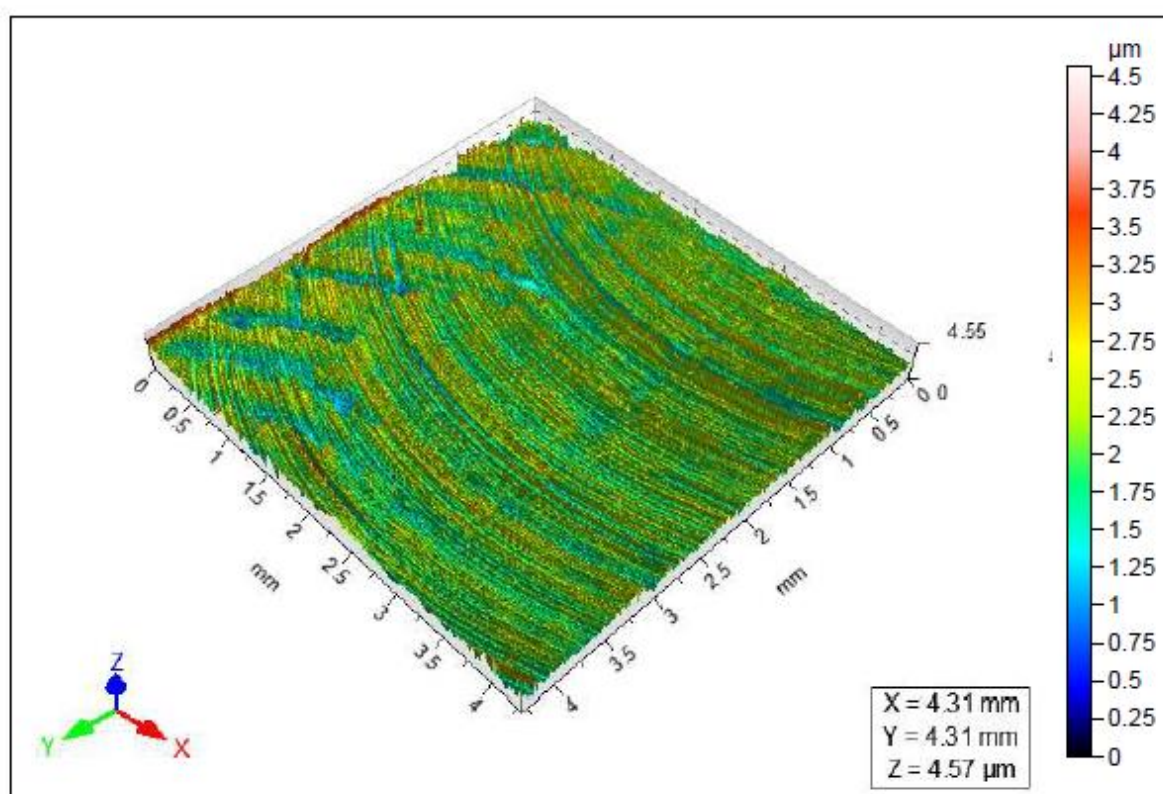




Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.378	µm
Ssk	-0.197	
Sku	4.15	
Sp	2.57	µm
Sv	2.00	µm
Sz	4.57	µm
Sa	0.288	µm

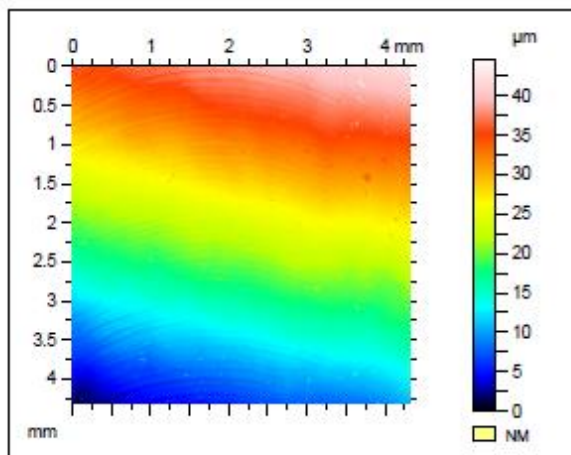


## Ti6Al4V\_Óleo

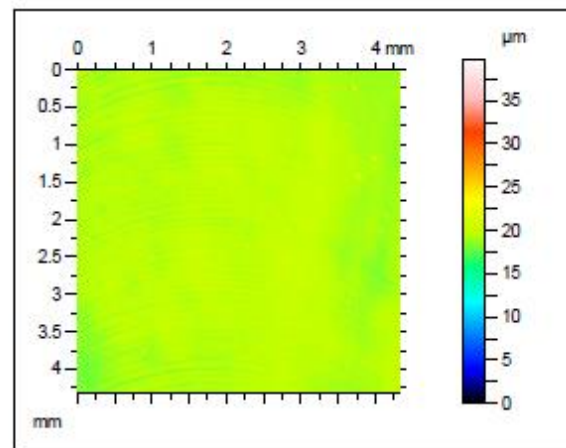
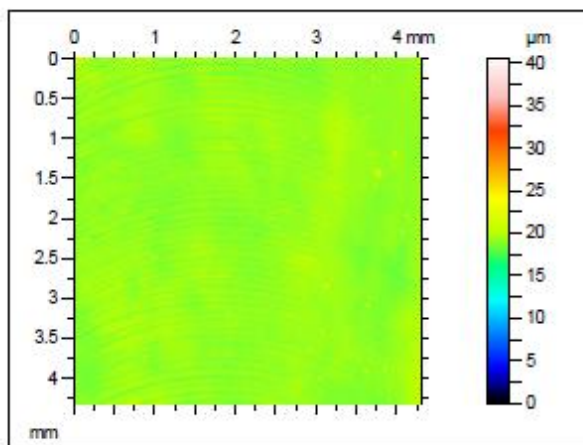
Canal 18

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

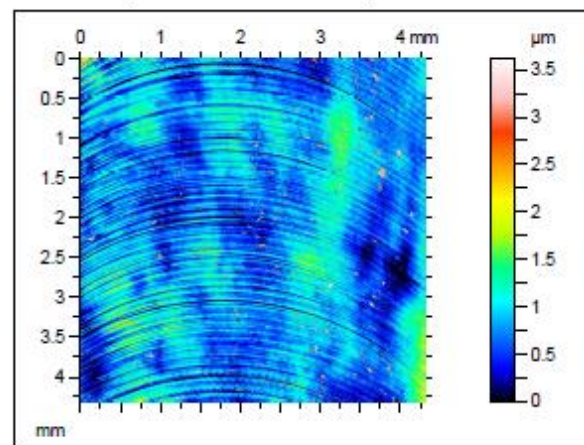
Superfície coletada



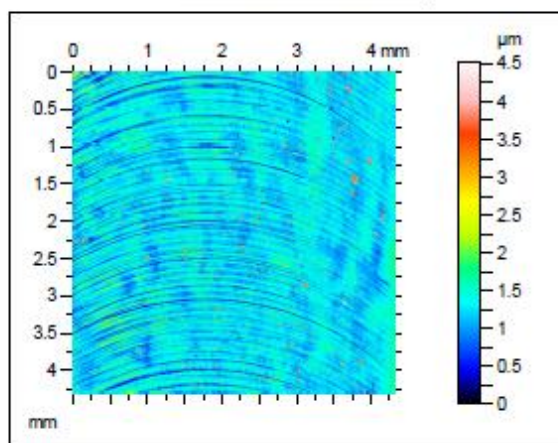
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

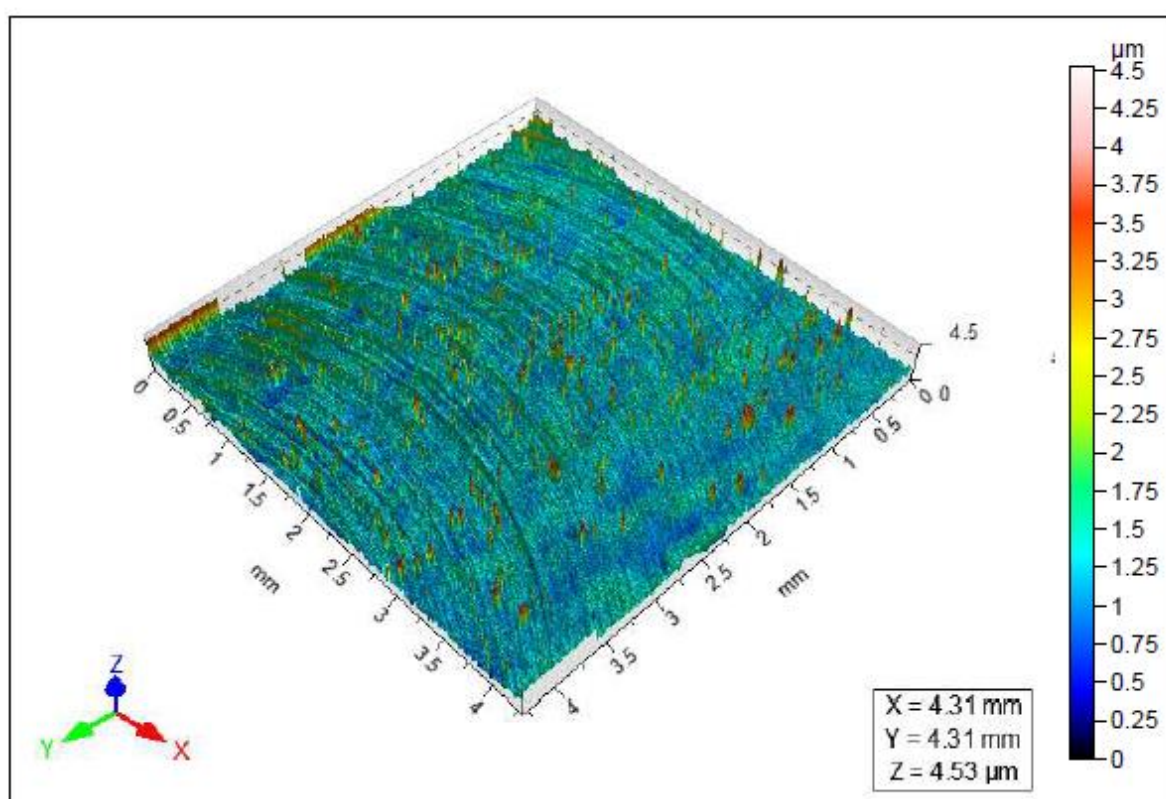
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.341	µm
Ssk	2.41	
Sku	18.0	
Sp	3.26	µm
Sv	1.27	µm
Sz	4.53	µm
Sa	0.227	µm

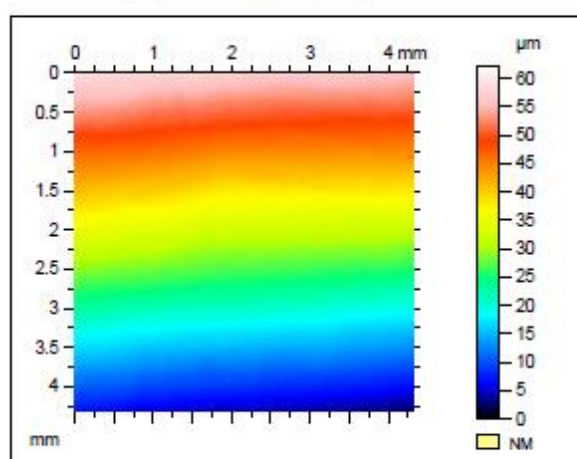


## Ti6Al4V\_Óleo

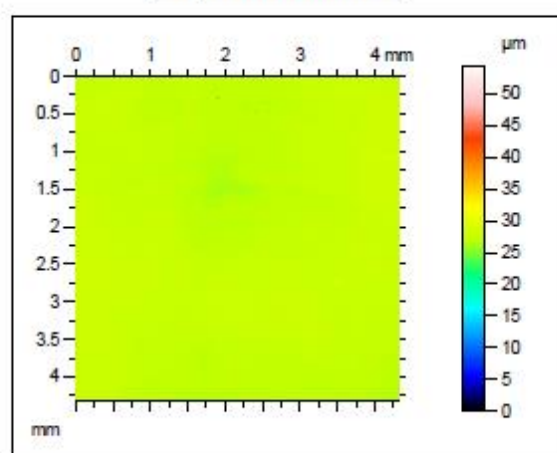
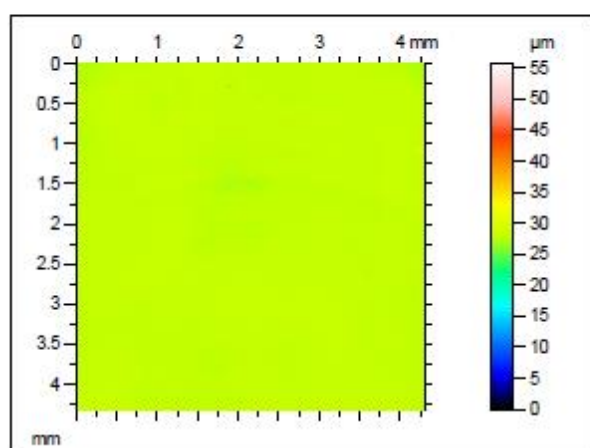
Canal 19

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

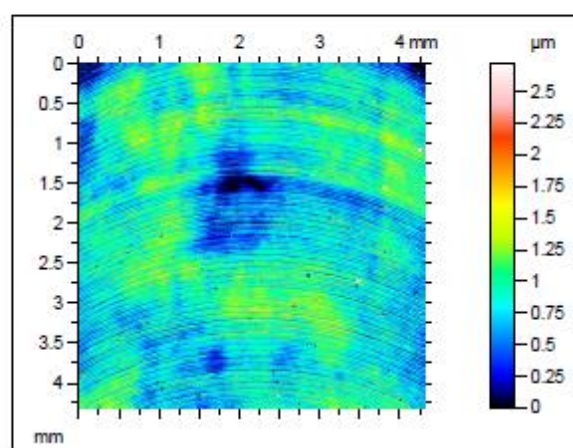
Superfície coletada



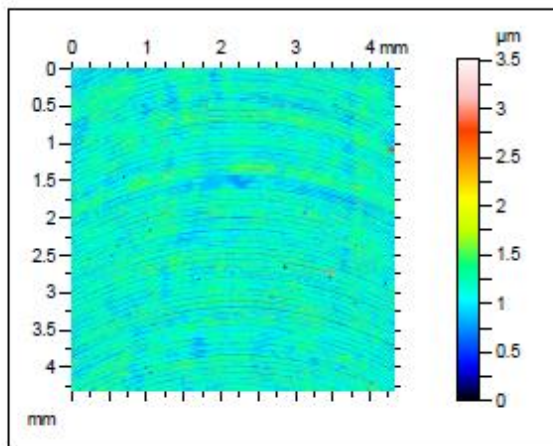
Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

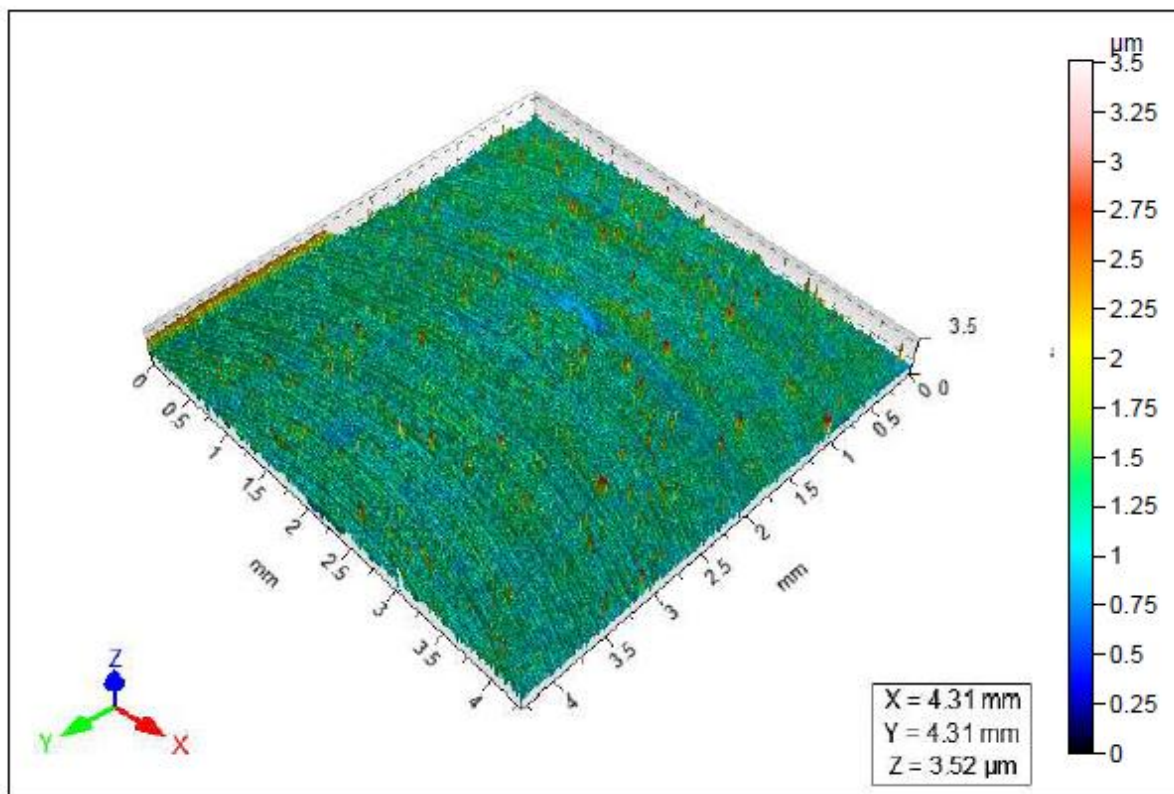
Thresholding



Filtro Gaussiano



ISO 25178		
Height Parameters		
<b>Sq</b>	0.245	$\mu\text{m}$
<b>Ssk</b>	0.823	
<b>Sku</b>	8.88	
<b>Sp</b>	2.38	$\mu\text{m}$
<b>Sv</b>	1.14	$\mu\text{m}$
<b>Sz</b>	3.52	$\mu\text{m}$
<b>Sa</b>	0.180	$\mu\text{m}$

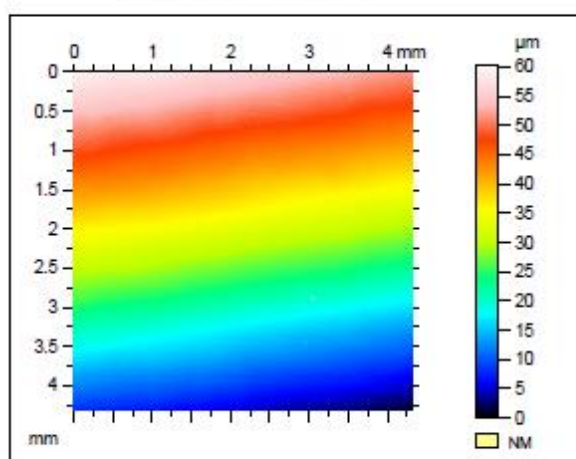


Ti6Al4V\_Óleo

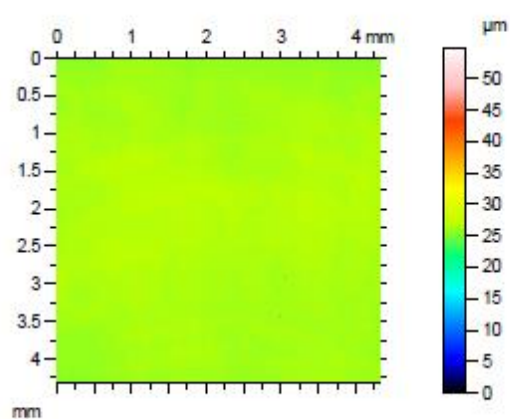
Canal 20

Lente 20x  
Cutoff 0,8 mm

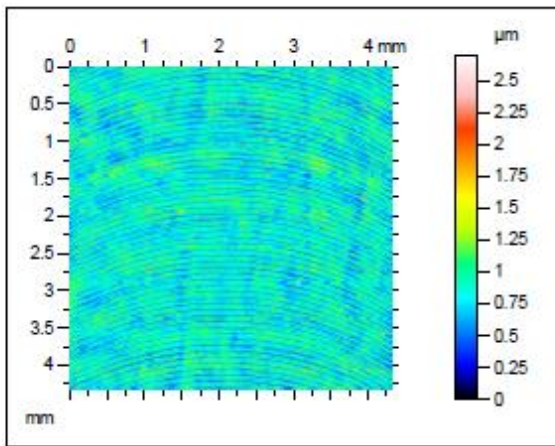
Superfície coletada



Superfície Nivelada

Superfície com  
remoção de forma

Thresholding



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.226	$\mu\text{m}$
Ssk	0.817	
Sku	7.12	
Sp	1.85	$\mu\text{m}$
Sv	0.843	$\mu\text{m}$
Sz	2.69	$\mu\text{m}$
Sa	0.171	$\mu\text{m}$

