

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GABRIEL LOPES DE CASTRO MARTINELLI

Efeito do avanço da ferramenta na molhabilidade da superfície da liga Ti6Al4V
microfresada.

São Carlos

2021

GABRIEL LOPES DE CASTRO MARTINELLI

Título: Efeito do avanço da ferramenta na molhabilidade da superfície da liga
Ti6Al4V microfresada.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

VERSAO CORRIGIDA

São Carlos

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

L385e Lopes de Castro Martinelli, Gabriel
Efeito do avanço da ferramenta na molhabilidade da superfície da liga Ti6Al4V microfresada / Gabriel Lopes de Castro Martinelli; orientador Reginaldo Teixeira Coelho. São Carlos, 2021.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

1. Microfresamento. 2. Ti6Al4V. 3. Engenharia de superfícies. 4. Formação de rebarbas. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE AVALIAÇÃO OU APROVAÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato / Student: Gabriel Lopes de Castro Martinelli	
Título do TCC / Title: Efeito do avanço da ferramenta na molhabilidade de superfície da liga Ti6Al4V microfresada	
Data de defesa / Date : 22/11/2021	
Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / Result
Professor Titular Reginaldo Teixeira Coelho (orientador)	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SEP	
Professor Associado Marcelo Falcão de Oliveira	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SMM	
Mestre Rodrigo José Ferreira da Silva	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SEM	

Coordenador da disciplina SMM0325 - Trabalho de Conclusão de Curso


 Prof. Dr. Rafael Salomão
 Departamento de Engenharia de Materiais (SMM/EESC)

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais e avó, que sempre
estiveram ao meu lado, me
incentivando e apoiando.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo e Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura, professores e funcionários pelo suporte durante esta trajetória.

Ao Professor Doutor Reginaldo Teixeira Coelho, pelo exemplo de profissionalismo durante a execução deste trabalho.

À Rodrigo José Ferreira da Silva, pelo exemplo de dedicação durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, que sempre estiveram presentes, nos momentos bons e ruins, além de sempre me apoiarem a realizar meus sonhos.

À minha avó, por ser um exemplo de boa pessoa, e sempre estar presente quando mais precisei.

Ao meu irmão, por sempre me apoiar e estar ao meu lado.

Aos meus amigos, que tornaram esta trajetória mais leve e alegre.

À Engimplan, pela doação de amostras.

À PIBIC, pelo financiamento da pesquisa.

RESUMO

MARTINELLI, G. L. C. **Título:** Efeito do avanço da ferramenta na molhabilidade da superfície da liga Ti6Al4V microfresada. 2021. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Nos dias atuais, a procura por melhorias na qualidade de peças fabricadas por microusinagem vêm crescendo, devido à procura por componentes que tenham maior probabilidade de cumprirem seu papel dentro da qualidade desejada. Dentro desse mercado, estão os implantes, sendo que a melhoria em sua qualidade é de suma importância, pois a ineficácia deste tipo de componente pode gerar danos à saúde do usuário, devido a possibilidade de o corpo rejeitar a peça, ou seja, o processo de osseointegração não ser realizado pelo corpo. Em vista disso, o presente trabalho tem como objetivo apresentar parâmetros de corte nos quais seja possível criar superfícies hidrofílicas, as quais beneficiam o processo de osseointegração, o que pode melhorar a eficácia de implantes. Vinte e seis microcanais foram fabricados na superfície de cada amostra de Ti6Al4V, em 3 avanços distintos, com 1 tipo de microfresa de topo reto, com diâmetro de 500 μm . A morfologia dos microcanais foi caracterizada por um microscópio confocal, assim como a verificação da formação de rebarbas. Além disso, a verificação do ângulo de contato θ líquido-ar, das superfícies microfresadas foi feita um tensiômetro, utilizando água como líquido. Os resultados mostram que, a partir dos diferentes avanços, a quantidade de rebarbas formadas é diferente, o que influencia na medida de ângulo de contato θ . O presente trabalho contribuiu apresentando parâmetros de corte nos quais é possível fabricar superfícies hidrofílicas, onde não há formação de rebarbas exacerbadas.

Palavras-chave: Microfresamento, Ti6Al4V, Engenharia de Superfícies, Formação de rebarbas.

ABSTRACT

MARTINELLI, G. L.C. **Title:** Effect of tool feed on surface wettability of micromilled Ti6Al4V alloy. 2021. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Nowadays, the search for improvements in the quality of parts manufactured by micro-machining has been growing, due to the demand for components that are less likely to not fulfill their role. Within this market, there are implants, and the improvement of their quality is very important, as the ineffectiveness of this type of component can cause damage to the user's health, due to the possibility of the body refusing it, in other words, the process of osseointegration isn't performed by the user's body. In view of this, the present research aims to present cutting parameters in which it is possible to create hydrophilic surfaces, which benefits the osseointegration process, which can improve the effectiveness of implants. 26 slots were fabricated on the surface of each Ti6Al4V sample, in 3 different feeds per tooth, with only 1 type of micro end mill, with a diameter of 500 μm . The microchannels morphology were characterized by a confocal microscope, as well as the verification of the burr formation. In addition, the verification of the contact angle θ of the micromilled surfaces was performed using a tensiometer, using only water as liquid. The results show that, from the different feeds, the amount of formed burrs is different, which influences the measure of contact angle θ . The present work contributed by presenting cutting parameters in which it is possible to manufacture hydrophilic surfaces, where there is no exacerbated burr formation.

Keywords: Micromilling, Ti6Al4V, Surface Engineering, Burr formation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Formação do cavaco em microusinagem e usinagem convencional.....	29
Figura 2 – Componentes da força de usinagem.....	30
Figura 3 – Convergência da superfície de saída e superfície de folga primária e ângulo de saída negativo (γ_0) e raio de aresta (ρ).....	31
Figura 4 – Espessura crítica h_c	32
Figura 5 – Efeito da espessura mínima do cavaco.....	33
Figura 6 – Classificação da integridade superficial.....	34
Figura 7 – Defeitos de superfície típicos da usinagem de materiais metálicos.....	36
Figura 8 – Vista esquemática da forma e localização da rebarba no canal.....	37
Figura 9 – Tipos de rebarbas na microusinagem: (a) primária; (b) rebarba em forma de agulha; (c) rebarba pena; (d) rebarba menor.....	38
Figura 10 – Processo de formação da rebarba primária.....	39
Figura 11 – (a) Barra de Ti-6Al-4V. (b) Amostras.....	40
Figura 12 – Ensaio de dureza.....	40
Figura 13 – Hermle C800U.....	41
Figura 14 – Geometrias da ferramenta de corte.....	43
Figura 15 – MEV de uma ferramenta de corte.....	43
Figura 16 – Montagem relógio comparador + morsa. (b) Relógio comparador em contato com a morsa.....	44
Figura 17 – Medição dos erros no eixo Z (montagem relógio comparador + cabeçote de alta rotação)	45
Figura 18 –(a) conjunto ferramenta morsa. (b) ferramenta com 10 mm de distância da peça. (c) Distância entre peça e ferramenta.....	47
Figura 19 – (a) equipamento de limpeza por ultrassom. (b) microfresa submersa em álcool isopropílico.....	47
Figura 20 – Montagem da microfresa na máquina.....	48
Figura 21 – Usinagem do canal de pré-teste e do primeiro canal no corpo de prova de pré-teste.....	49
Figura 22 – (a) primeira metade do canal. (b) segunda metade do canal. (c) canal completo.....	50

Figura 23 – (a) fabricação do último microcanal. (b) código G utilizado.....	51
Figura 24 – Gráfico de distribuição normal dos avanços.....	51
Figura 25 –(a) início do primeiro; (b) final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto canal; (d) final do vigésimo sexto canal. Peça fabricada com avanço de 168 mm/min.....	53
Figura 26 – (a) início do primeiro canal; (b) final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto canal; (d) final do vigésimo sexto canal. Peça fabricada com avanço de 336 mm/min.....	54
Figura 27 – (a) início do primeiro canal; (b) final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto canal; (d) final do vigésimo sexto canal. Peça fabricada com avanço de 672 mm/min.....	55
Figura 28 – Formação de rebarbas em diferentes pontos dos canais para um avanço de 168mm/min. (a) Início do primeiro canal; (b) Final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto canal e (d) final do vigésimo sexto canal.....	57
Figura 29 – Formação de rebarbas em diferentes pontos dos canais para um avanço de 336 mm/min. (a) Início do primeiro canal; (b) Final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto canal e (d) final do vigésimo sexto canal.....	57
Figura 30 – Formação de rebarbas em diferentes pontos dos canais para um avanço de 762 mm/min. (a) Início do primeiro canal; (b) Final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto e (d) final do vigésimo sexto canal.....	58
Figura 31 – Ensaio de molhabilidade em uma superfície lisa, eixo X.....	59
Figura 32 – Ângulos de contato vistos no eixo X. (a) F168 mm/min; (b) F336 mm/min e (c) F672 mm/min.....	60
Figura 33 – Comportamento do ângulo de contato no eixo X com o aumento do avanço.....	61
Figura 34 – Análise do ângulo de contato de uma superfície lisa, vista pelo eixo Y.....	61
Figura 35 – Ângulos de contato vistos pelo eixo Y. (a) F168 mm/min; (b) F336 mm/min e (c) F672 mm/min.....	62
Figura 36 – Comportamento do ângulo de contato com o aumento do avanço visto pelo eixo Y.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades da liga Ti6Al4V (ASTM F136)	26
Tabela 2 – Especificações do modelo MS2MS D0050 recomendadas pela fabricante Mitsubishi.....	42
Tabela 3 – Valores de altura e largura em μm no início e fim do canal de pré-teste, no corpo de pré-teste.....	52
Tabela 4 – Dados sobre as profundidades em μm dos canais de pré-teste, canal 1 e 26, para a amostra fabricada com avanço de 168 mm/min.....	53
Tabela 5 – Dados sobre as profundidades em μm dos canais de pré-teste, canal 1 e 26, para a amostra fabricada com avanço de 336 mm/min.....	54
Tabela 6 – Dados sobre as profundidades em μm dos canais de pré-teste, canal 1 e 26, para a amostra fabricada com avanço de 672 mm/min.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

D	–	Dimensão
α	–	Fase alfa
β	–	Fase beta
ASTM	–	American Society for Testing and Materials
F_c	–	Força de corte
F_f	–	Força de avanço
F_p	–	Força passiva
P_c	–	Potência de corte
V_c	–	Velocidade de corte
E	–	Energia específica de corte
A_c	–	Área da seção transversal
Z_w	–	Taxa de material removido
γ_0	–	Ângulo de saída
ρ	–	Raio de aresta
h_m	–	Espessura do material não deformado
h_c	–	Espessura crítica
h_e	–	Altura da recuperação elástica
h	–	Espessura de corte
A_p	–	Profundidade de corte
MEV	–	Microscopia eletrônica de varredura
Θ	–	Ângulo de contato

LISTA DE SÍMBOLOS

MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
HV	Microdureza Vickers
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
W/mK	Watts por milikelvin
J/KgK	Joules por quilograma Kelvin
°C	Graus Celsius
µm	Micrometro
mm	Milímetros
rpm	Rotações por minuto
mm/min	Milímetros por minuto
µL	Microlitro

SUMÁRIO

1.	Introdução	25
2.	Objetivos	26
3.	Revisão Bibliográfica.....	27
3.1.	Titânio e suas ligas	27
3.2.	Osseointegração.....	29
3.3.	Microfresamento.....	30
3.3.1.	Conceitos básicos.....	31
3.3.2.	Efeito de escala.....	33
4.	Materiais e métodos.....	42
4.1.	Ensaio de dureza.....	42
4.2.	Máquina.....	43
4.3.	Ferramentas.....	44
4.4.	Procedimento experimental.....	46
5.	Resultados e discussão	54
5.1.	Análise das geometria dos canais	55
5.2.	análise da formação de rebarbas.....	59
5.3.	Análise da molhabilidade da superfície.....	62
6.	Conclusão.....	67
7.	Referências Bibliográficas	68

1. INTRODUÇÃO

Em 1969, Branemark publicou seu primeiro trabalho relacionado a implantes. Desde então, o estudo da superfície de implantes vem se tornando uma importante área da ciência e cada vez mais estudadas, com intuito de melhorar a qualidade de vida, o tempo de recuperação e os tempos de revisão dos procedimentos cirúrgicos (BRANEMARK et al., 1969). Com o passar do tempo, outras pesquisas foram realizadas nessa área, mostrando que alguns parâmetros como energia de superfície, rugosidade e interação entre as geometrias nas escalas macro, micro e nano, obtidas pelo processo de fabricação, são benéficas aos implantes, pois aumentam a adesão celular e a proliferação de células (LIU et al., 2017).

Os materiais mais utilizados em implantes, são o titânio puro ou suas ligas, como a liga Ti6Al4V. Tais implantes são fabricados por processos de usinagem, sendo que seu início se dá com torneamento ou fresamento, gerando a macro geometria da peça. Wan et al. (2017), defende que a criação de microgeometrias e microtexturas a partir do processo de microfresamento ajudam a melhorar a adesão, crescimento e proliferação celular, devido as características de formas $2\frac{1}{2}$ D e 3 D.

Além disso, vale ressaltar que, por meio dos parâmetros de usinagem, pode-se obter respostas variadas quanto à superfície usinada, rugosidade e microdureza, sendo que o microfresamento apresenta a vantagem de manufaturar geometrias e microgeometrias complexas.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo aprofundar os conhecimentos sobre a molhabilidade de superfícies da liga de titânio Ti6Al4V microfresada, conforme o avanço da ferramenta (f_z) aumenta, de modo que os resultados obtidos possam proporcionar informações para geração de superfícies hidrofílicas, as quais são desejadas em implantes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, serão apresentados os principais conceitos sobre o material titânio e suas ligas, osseointegração e microusinagem.

3.1. TITÂNIO E SUAS LIGAS

O Titânio foi descoberto em 1791, por William Gregor, na Inglaterra (COLAFEMINA, 2005). Este material foi estudado, sendo caracterizado e classificado por pesquisadores da área de metalurgia. Tal material apresentou características físicas e químicas únicas, o que possibilitou a aplicação deste material na indústria aeroespacial, médica, bélica, equipamentos para esportes, entre outras (ZEILMANN, 2003).

As ligas de titânio podem ser divididas em 4 principais grupos: ligas alfa (α), ligas próximas à alfa, ligas beta (β) e ligas alfa + beta ($\alpha+\beta$). Tais ligas se distinguem em determinadas características, como resistência mecânica, temperatura de trabalho, densidade, resistência à corrosão. Essas propriedades são diretamente ligadas aos elementos de liga utilizados na liga de titânio. Esses elementos são chamados estabilizadores de fase. Além disso, essas propriedades podem ser alteradas pela maneira em que o material foi fabricado (MANERA, 2014; ZEILMANN, 2003). Uma diferenciação mais detalhada de cada liga será apresentada abaixo:

Liga alfa (α): possui uma microestrutura com fase alfa (α), a qual é modificada com a presença de elementos estabilizadores de fase como alumínio, estanho e zircônio. Essas ligas se destacam pelas altas resistência mecânica e corrosão, além de aguentarem altas temperaturas de trabalho (ZEILMANN, 2003).

Liga próxima à alfa (α): estas ligas possuem estabilizadores (α), como alumínio, e estabilizadores (β), como molibdênio e vanádio. Mesmo com a presença de estabilizadores β , o comportamento das ligas próximas à α é muito semelhante ao comportamento das ligas α . Essas ligas se destacam pela boa resistência à fluência (COLAFEMINA, 2005).

Liga beta (β): estas ligas possuem grandes quantidades de estabilizadores β , e quantidade reduzida de estabilizadores α . Essas ligas possuem estrutura cúbica de corpo centrado, o que pode causar um aumento na sua resistência na presença de uma pequena quantidade de fase α . As características que se destacam nas ligas β são: alta dureza e resistência à corrosão (COLAFEMINA, 2005).

Liga alfa + beta ($\alpha + \beta$): as ligas deste grupo contêm elementos estabilizadores de fase alfa e de fase beta. Essas ligas são, normalmente, usadas em projetos estruturais e na indústria biomédica (COLAFEMINA, 2005). As ligas $\alpha + \beta$ apresentam a melhor relação entre densidade e resistência mecânica. Dentro deste grupo de ligas, existe a liga Ti6Al4V, a qual foi desenvolvida para aplicações estruturais, contudo, apresentou ótimos resultados quanto à adesão celular. A tabela 1 a seguir apresenta algumas das propriedades físicas referentes à liga Ti6Al4V.

Tabela 1 – Propriedades da liga Ti6Al4V (ASTM F136).

Propriedades	
Limite de escoamento [MPa]	795
Tensão de ruptura [MPa]	860
Módulo de elasticidade [GPa]	113
Dureza [HV]	349
Densidade [g/cm ³]	4,43
Condutividade térmica [W/mK]	7,3
Calor específico [J/KgK]	526

Fonte: ASTM F-136 (13)

A partir das propriedades da tabela acima, é possível perceber que a liga de titânio ASTM F-136 possui uma difícil usinabilidade. As ligas de titânio possuem, em geral, uma difícil usinabilidade, devido à algumas características que serão listadas abaixo (MANERA, 2014).

- Alta resistência mecânica em elevadas temperaturas: as ligas de titânio começam a perder resistência mecânica a partir dos 800 °C, o que dificulta a deformação plástica responsável pela formação de cavaco.

- b) Alta reatividade químicas em altas temperaturas: acima de 500°C, o titânio possui grande tendência de reagir com a maioria dos materiais utilizados nas ferramentas de corte, o que intensifica o desgaste da ferramenta.
- c) Baixo módulo de elasticidade: pode causar vibração e deflexão na peça, exigindo equipamentos com fixação de elevada rigidez.
- d) Condução de calor: o titânio possui condutividade térmica relativamente baixa, o que pode causar altas temperaturas concentradas durante a usinagem.
- e) Processo de formação de cavaco: o cavaco formado na usinagem de titânio geralmente é segmentado, o que gera alta instabilidade da aresta da ferramenta.

3.2. OSSEointegração

O termo osseointegração foi adotado pelo professor Per-Ingvar Branemark, durante seus estudos clínicos de osso medular em coelhos. Neste estudo, após a inserção de uma câmara de titânio ao osso do coelho, percebeu-se que, após um tempo, não era possível retirar a câmara, pois o osso do coelho aderiu com a mesma (BRANEMARK, 1985).

Dessa maneira, o termo osseointegração foi definido como a ligação direta estrutural e funcional entre osso ordenado e vivo e a superfície de um implante sobre ação de cargas funcionais (BRANEMARK, 1985).

Além disso, foram listados 6 tópicos, os quais mostram como melhorar a adesão e a proliferação celular, fazendo com que o tempo pós cirúrgico diminua, ou seja, aumenta a osseointegração (BRANEMARK et.al, 1981):

1. Biocompatibilidade do material do implante;
2. Formato ou desenho do implante;
3. Natureza macroscópica e microscópica do desenho e da superfície;
4. Saúde do hospedeiro, assim como a saúde do osso;
5. Técnica cirúrgica utilizada;

6. Condições de carga sobre as quais o implante estará submetido.

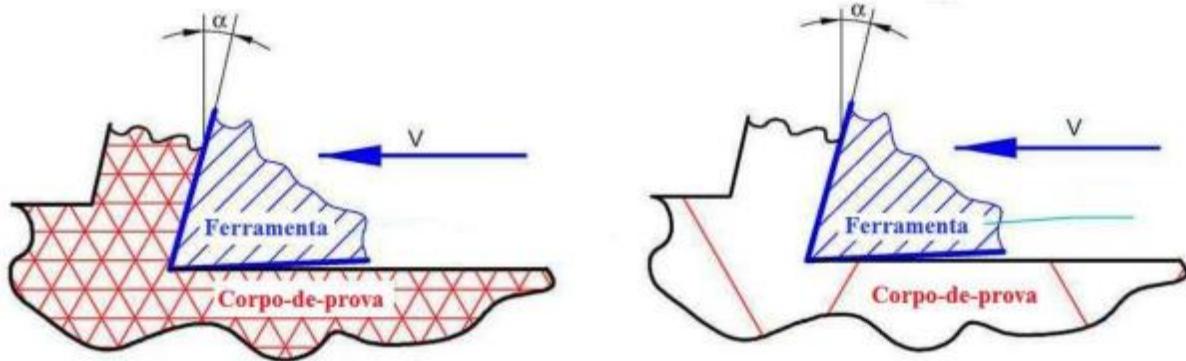
Sabe-se que a melhoria de algumas características de superfície, como a textura, rugosidade média, pureza e molhabilidade podem favorecer a adesão celular à superfície do implante, favorecendo a osseointegração.

3.3. MICROFRESAMENTO

Microfresamento consiste em um processo de micro usinagem, processos nos quais há muita precisão dimensional e de forma. Sendo assim, é possível fabricação de peças na escala micrométrica (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006). Pode-se também citar o fato de que, nesses processos, a remoção de material é caracterizada por valores que variam de nanômetros a poucos micrometros (NG et al, 2006).

Além disso, autores como Câmara et.al (2012) ressaltam que a principal característica desses processos é o fato de que o tamanho de grão do material que a peça é feita e a espessura de corte possuem dimensões muito semelhantes ao raio da cunha cortante da ferramenta utilizada no processo de microusinagem, diferentemente da usinagem convencional, processo no qual vários grãos podem sair na forma de cavaco, como pode ser visto na figura 1. O raio de aresta de uma ferramenta própria para micro usinagem varia na ordem de 1 a 4 μm , e a espessura de corte menor que 1 μm (DOS SANTOS, 2016).

Figura 1 – Formação do cavaco em microusinagem e usinagem convencional.



Fonte - BISSACO 2004 apud BISSACO; HANSEN e DE CHIFFRE, 2005

3.3.1. CONCEITOS BÁSICOS

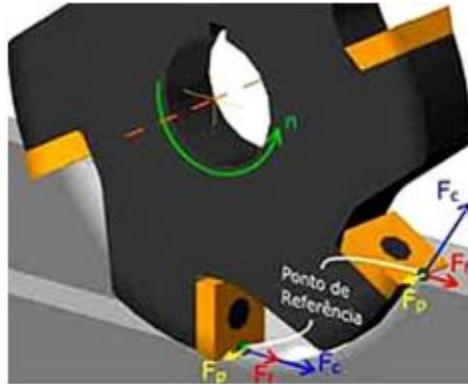
Neste subtópico, serão apresentados alguns conceitos básicos sobre os processos de fabricação por usinagem convencional e microusinagem.

- Força de corte.

De acordo com Machado et al (2009), a força de usinagem é constituída por três componentes (figura 2) que agem na cunha de corte da ferramenta, as quais serão explicadas a seguir.

- i) Força de corte (F_c): força medida no plano de trabalho, na direção do corte.
- ii) Força de avanço (F_f): força medida no plano de trabalho, na direção do avanço.
- iii) Força passiva (F_p): força medida perpendicular ao plano de trabalho

Figura 2 – Componentes da força de usinagem.



Fonte: CIMM 2010.

- Potência de corte.

A potência de corte é necessária para que a máquina ferramenta consiga fazer os movimentos giratórios e fazer os movimentos de corte na direção desejada. A potência de corte pode ser obtida a partir da força de corte e da velocidade de corte, a partir da seguinte relação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006):

$$P_c = \frac{F_c}{V_c}$$

Onde P_c é potência de corte, F_c força de corte e V_c velocidade de corte.

- Energia específica de corte

A energia específica de corte consiste na quantidade de energia consumida por unidade de volume de material removido na forma de cavaco. Este parâmetro é independente da velocidade de corte, e dá informações sobre a eficiência do processo. Este parâmetro pode ser determinado a partir da seguinte equação (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989):

$$E = \frac{P_c}{Zw} = \frac{F_c}{Ac}$$

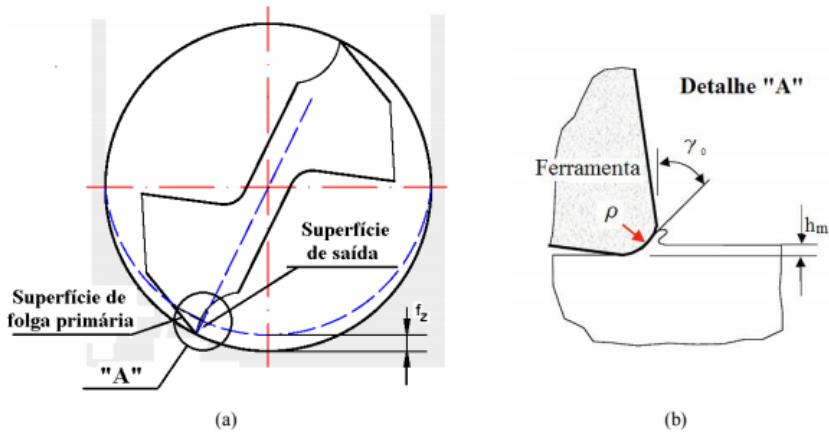
Onde E é a energia específica de corte, Zw é a taxa de material removido e Ac é a área da seção transversal do cavaco não deformado.

3.3.2. EFEITO DE ESCALA

A microusinagem possui algumas dificuldades quando comparada à usinagem convencional ou macrousinagem. Um dos exemplos é o chamado efeito de escala, o qual é causado devido a diminuição exacerbada das dimensões da ferramenta de corte (BERESTOVSKYI e HUNG, 2013). O efeito de escala consiste no aumento não linear da energia específica de corte com a redução da espessura do material a ser cisalhado (CÂMARA, 2014), ou, em outras palavras, o aumento de energia por unidade de volume de material removido (DOS SANTOS, 2016).

Além disso, no processo de microfresamento, o ângulo formado entre a superfície de saída e a superfície de folga primária da ferramenta, ou seja, da microfresa, possui valores elevados quando comparados ao avanço por dente f_z , o que gera sempre um ângulo de saída negativo (CÂMARA, 2014), assim como ilustram as figuras 3(a) e 3(b).

Figura 3(a) – Convergência da superfície de saída e superfície de folga primária; (b) ângulo de saída negativo (γ_0) e raio de aresta (ρ)

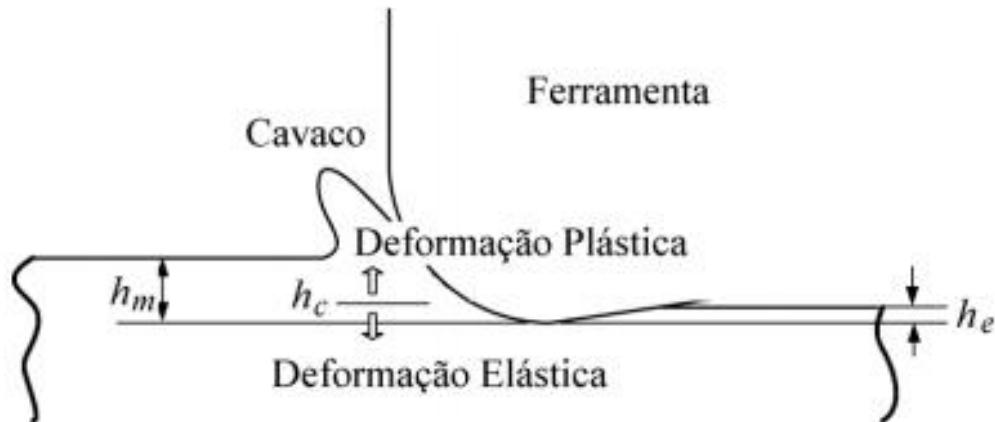


Fonte - ÖZEL, LIU e DHANORKER (2007); LEE e DORNFELD (2005)

Tal fato gera deformação plástica na peça que está sendo usinada, porém não há cisalhamento do material, ou seja, não há formação de cavaco quando a espessura do material não deformado (h_m) é menor que a espessura crítica (h_c), resultando em uma recuperação elástica do

material, a qual possui uma espessura (h_e). Desse modo, a espessura de material removida da peça é menor do que a desejada (CÂMARA, 2014), como ilustra a figura 4.

Figura 4 – Espessura crítica h_c .



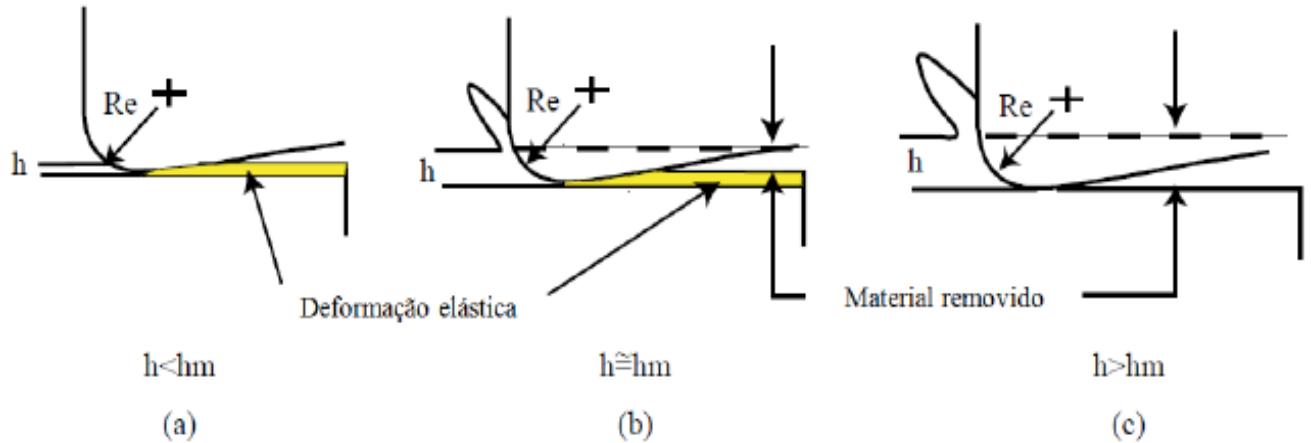
Fonte - SON, LIM e AHN (2005).

Esse fenômeno onde ocorre deformações elástica ou plástica na peça, porém sem formação de cavaco, é denominado efeito *ploughing*, e, tal efeito deve ser evitado durante a fabricação de peças a partir da microusinagem. Sendo assim, a melhor maneira de evitar tal efeito é definir as condições de corte com base na espessura mínima, sendo assim, a espessura deve ser maior que a espessura mínima de corte (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006). A figura 5(a) ilustra a situação em que a espessura de corte (h) é menor que a espessura mínima de corte (h_m), ocorrendo apenas a deformação elástica do material (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Já na figura 5(b), temos o caso em que a espessura de corte se aproxima da espessura mínima de corte, fazendo com que o cavaco seja formado por cisalhamento. Contudo, ainda há certa deformação elástica ocorrendo, causando uma profundidade de corte menor que a desejada (MACHADO et al, 2011).

A situação desejada é quando a espessura do cavaco não deformado aumenta, de maneira a se tornar maior que a espessura mínima de corte. Nesta situação, ilustrada na figura 5(c), a deformação elástica diminui, fazendo com que toda a espessura de corte seja retirada na forma de cavaco (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Figura 5 – Efeito da espessura mínima do cavaco.



Fonte: Adaptado de Chae, Park e Freiheit, 2006.

Calcular a espessura mínima de cavaco é uma tarefa muito complexa para se realizar durante o processo, uma vez que a relação entre a espessura mínima do cavaco e o raio da ferramenta depende do raio da aresta de corte e do material no qual a peça é feita (CHAE, PARK, FREIHEIT, 2006). Sendo assim, foram estudados métodos para auxiliar o cálculo da espessura mínima do cavaco. Desse modo, Son, Lim, e Ahn (2005) realizaram um estudo sobre os efeitos que o coeficiente de atrito podem causar sobre a espessura mínima de corte na microusinagem, podendo assim calcular a espessura mínima de cavaco com base no raio de aresta e o atrito entre a peça e ferramenta, chegando à equação mostrada abaixo (CHAE, PARK, FREIHEIT, 2006; SON, LIM, AHN, 2005):

$$Hm = Re \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right) \right)$$

Onde Re é o raio de aresta da ferramenta de corte e β é o ângulo de atrito formado entre a ferramenta e o cavaco.

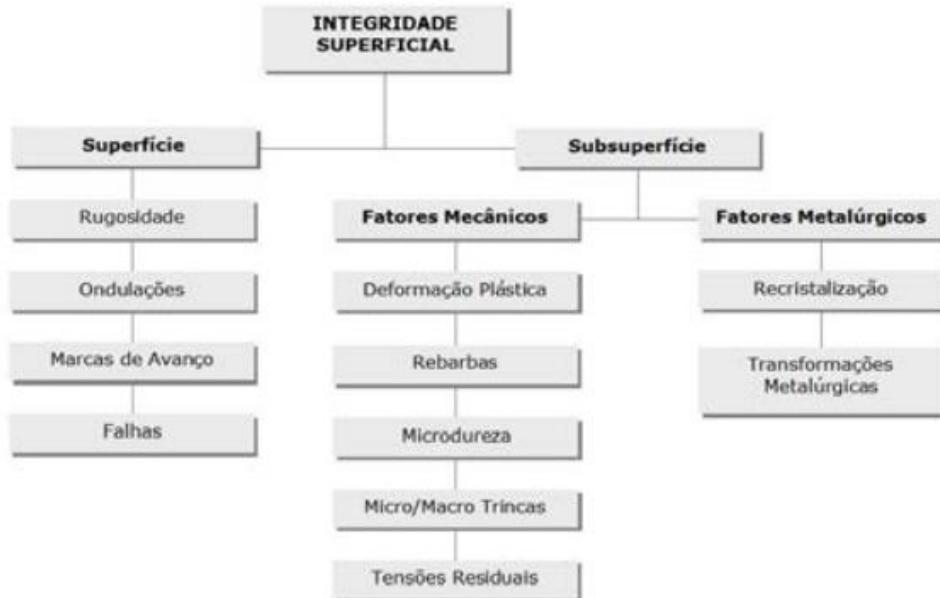
Dentro do campo de estudos da usinagem convencional e microusinagem, deve-se levar em consideração a integridade superficial, termo este que foi definido por Field e Kahles como sendo o conjunto de alterações nas superfícies das peças causada pela ação do processo de fabricação, o

qual pode ser com ou sem remoção de material. Em 1971, na 21º Assembleia Geral do CIRP, a integridade superficial se tornou reconhecida como um campo de pesquisa (BECKER, SANTOS e SALES, 2005).

O conhecimento sobre integridade superficial pode dar informações sobre possíveis alterações na superfície durante o processo de fabricação da mesma, além de dar informações sobre os efeitos que tais alterações podem causar nas propriedades da peça, e, consequentemente, seu desempenho. Como exemplo, pode-se tomar a falha prematura por fadiga, que possui as trincas nucleadas, normalmente, na superfície das peças (FIELD, KAHLES e KOSTER, 1989).

Outros autores, como Chevrier et al. (2003), defendem que a integridade superficial expõe a qualidade da superfície usinada a partir da interpretação tanto da superfície quanto da subsuperfície do material. Dessa forma, são analisadas algumas variáveis nas quais os parâmetros de corte influenciam. A figura 6 ilustra as variáveis que devem ser analisadas no estudo da integridade superficial.

Figura 6 – Classificação da integridade superficial.



Fonte: Adaptado de Machado et al (2009).

A seguir, serão listados e explicados alguns fatores que influenciam na integridade superficial de uma peça.

- Defeitos de superfície.

Becker, Santos e Sales (2005) mostram que a análise de superfície de uma peça pode ser dividida em quatro níveis: rugosidade, ondulação, marcas de avanço e falha. A rugosidade consiste em irregularidades com espaçamento reduzido, causada pela ação inerente do processo de fabricação, ou seja, pela ferramenta de corte. A rugosidade pode ser medida em um pequeno intervalo, chamado “*cut-off*”, variando de 0.25 a 2.5 mm.

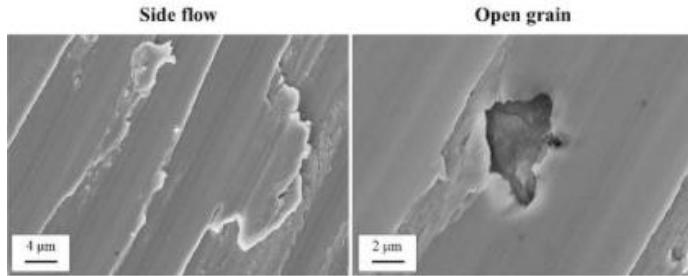
Já as ondulações são irregularidades da superfície cujo espaçamento é maior que o *cut-off*. Geralmente, vibração, flexão da peça ou da ferramenta devido à força de corte ou temperatura de corte são os principais fatores que causam as ondulações (BECKER, SANTOS e SALES, 2005).

As marcas de avanço indicam a relação do movimento relativo entre a peça e a ferramenta durante o processo de usinagem. Elas são marcas que denotam as direções predominantes de irregularidades superficiais (BECKER, SANTOS e SALES, 2005).

As falhas são interrupções não intencionais, inesperadas e indesejadas na topografia típica da superfície de uma peça, pois pode gerar defeitos como inclusões, vazios ou rachaduras (BECKER, SANTOS e SALES, 2005).

Em relação à topografia da superfície usinada, duas mudanças muito comuns são observadas: fluxo lateral de material (side flow) e abertura de cavidade (open grain). O primeiro, é parte do material deformado na direção oposta à ferramenta durante a formação de cavaco. Já a abertura de cavidades ou “grão aberto” é caracterizada pela formação de cavidades distribuídas pela superfície e geralmente ocorre na usinagem de materiais com característica frágil (BECKER, SANTOS e SALES, 2005). Ambos os fenômenos citados estão ilustrados na figura 7.

Figura 7 – Defeitos de superfície típicos da usinagem de materiais metálicos.



Fonte: Becker, Santos e Sales, 2005.

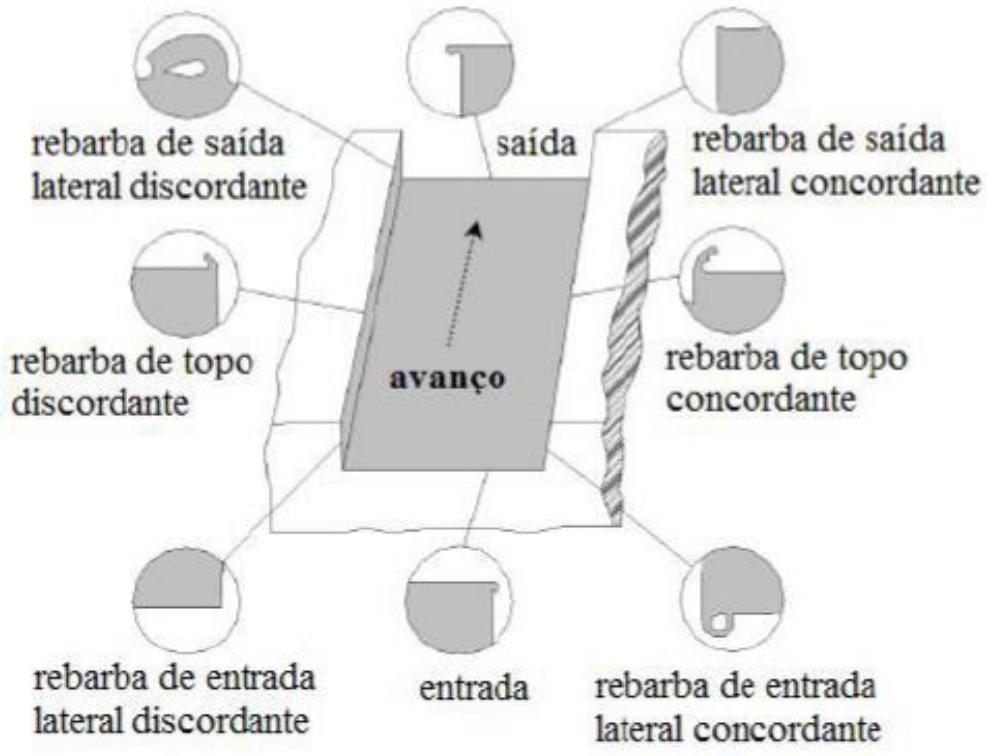
Segundo Becker, Santos e Sales (2005), as trincas e micro trincas tem ocorrência mais frequente na usinagem de materiais frágeis, precisamente devido à incapacidade de se deformar plasticamente. Além disso, constam que as micro trincas devem ser evitadas, pois são extremamente prejudiciais às propriedades dependentes de fadiga e resistência à corrosão.

- Formação de rebarba

Outro ponto fundamental que deve ser estudado dentro da integridade superficial é a formação de rebarbas. Rebarbas são resíduos indesejáveis de material que surgem devido a deformação plástica da mesma durante o processo de usinagem (OLVERA, BARROW, 1996). Na microusinagem, também há formação de rebarbas, as quais possuem tamanhos menores que as rebarbas na usinagem convencional, contudo, as rebarbas na microusinagem são proporcionalmente maiores (LEKKALA, 2011).

Estudos realizados por Lee e Dornfeld (2002) sobre formação de rebarba em alumínio 6061-T6 e cobre 110 em função de algumas variáveis de usinagem, como mostra a figura 8, as quais são importantes para a análise da influência dos parâmetros de corte sobre a formação de rebarba no microfresamento.

Figura 8 – Vista esquemática da forma e localização da rebarba no canal.

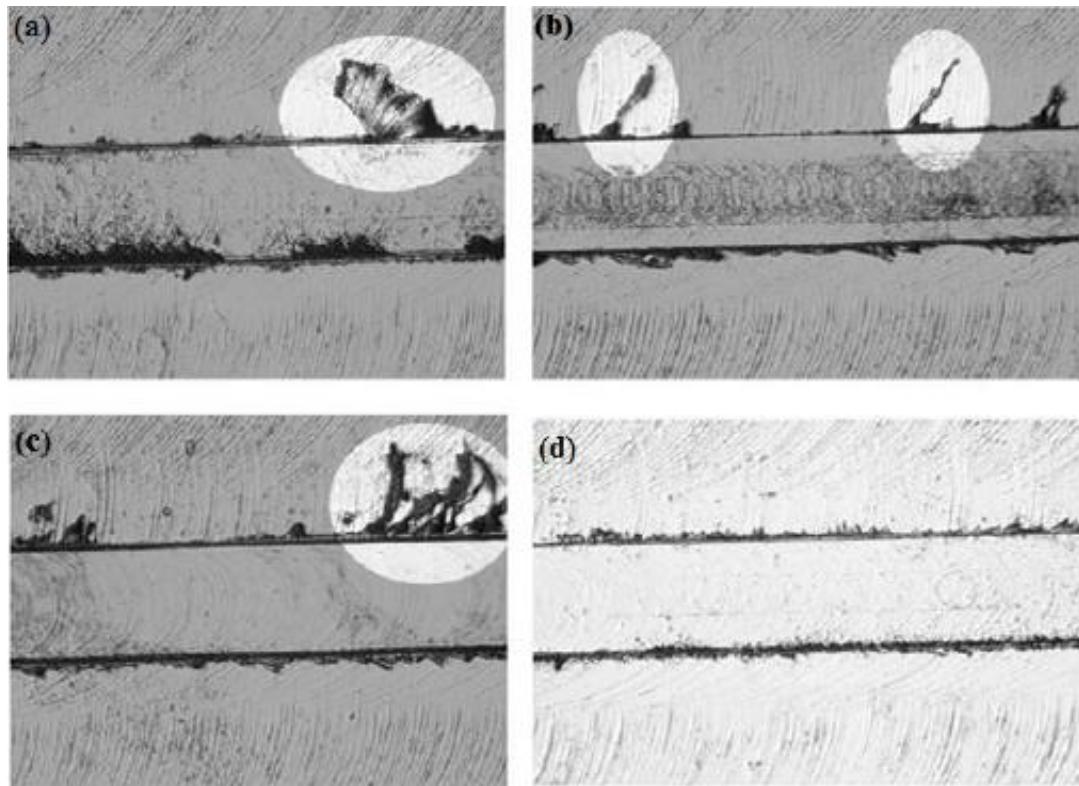


Fonte: Adaptado de Lee e Dornfeld, 2002.

Entretanto, os autores Lee e Dornfeld (2002) consideraram apenas cinco tipos diferentes de rebarbas, conforme os tipos ilustrados na figura 8 acima, sendo estes rebarba de entrada lateral concordante, rebarba de topo concordante e discordante, rebarba de saída lateral discordante e rebarba de saída na parte inferior do micro canal. A exclusão de alguns tipos de rebarbas (rebarbas de entrada lateral discordante, rebarbas de saída lateral concordante e rebarba de entrada na parte inferior do micro canal) foram muito pequenas para que fosse possível realizar uma avaliação (LEE; DORNFELD, 2002).

Outros autores, como Chern et al. (2007), verificaram experimentalmente como as rebarbas são formadas no microfresamento, e a partir disso, classificaram as rebarbas em 4 tipos diferentes, sendo estes: rebarba primária, rebarba em forma de agulha, rebarba pena e rebarba menor. A figura 9 ilustra esses tipos de rebarbas.

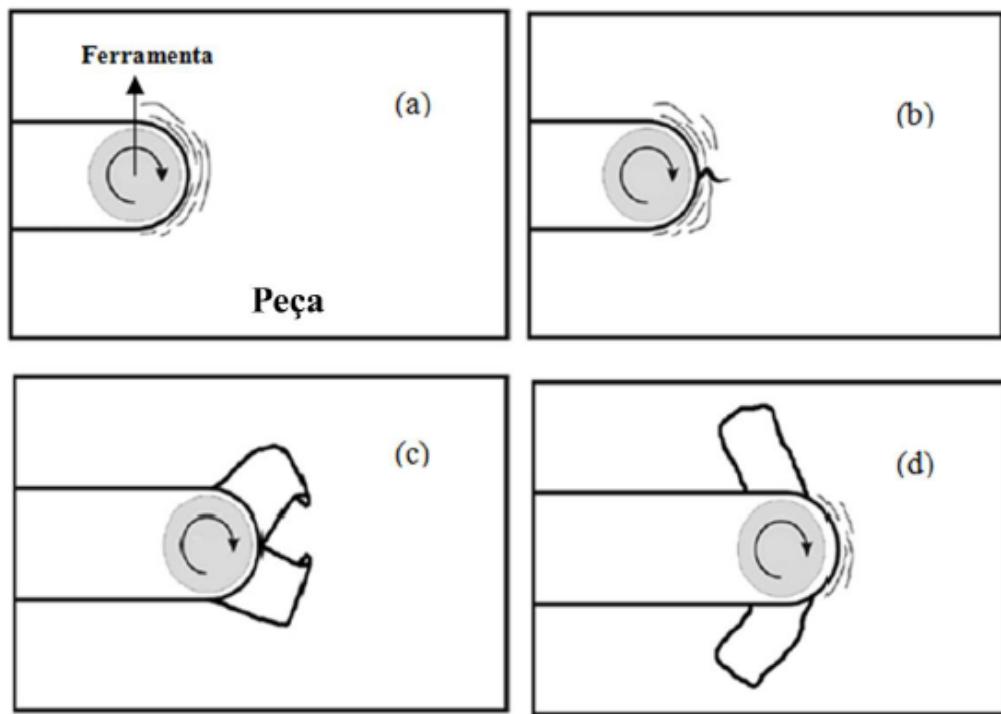
Figura 9 – Tipos de rebarbas na microusinagem: (a) primária; (b) rebarba em forma de agulha; (c) rebarba pena; (d) rebarba menor.



Fonte: Chern et al., 2007.

Esses 4 tipos de rebarbas são formados de diferentes maneiras durante o processo de microusinagem. A rebarba primária é formada quando a microferramenta é incapaz de produzir cavaco, tornando o atrito predominante. Dessa maneira, o material que está à frente da ferramenta é empurrado e deformado plasticamente (figura 10(a)). Em seguida, esse material é deformado próximo ao centro (figura 10(b)), dando origem à rebarba primária (figura 10(c)). Este tipo de rebarba possui aproximadamente metade do diâmetro da ferramenta (Figura 10(d)). Se a fratura ocorre na rebarba primária durante o processo de microusinagem, as rebarbas tipo pena ou agulha são formadas, enquanto a rebarba menor é originada quando a penetração de trabalho e o avanço são muito pequenos (CHERN et al., 2007).

Figura 10 – Processo de formação da rebarba primária.

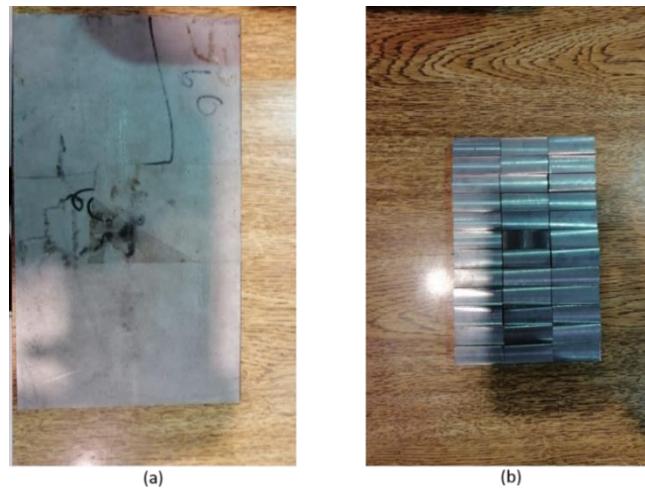


Fonte: Adaptado de Chern et al., 2007.

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

Para este projeto, foi utilizado o material Ti-6Al-4V, recebido em forma de barra, sendo que o material foi submetido ao processo mecânico de laminação. A partir desses processos, a dureza esperada do material é de aproximadamente 30 HRC. Tal liga foi cedida pela empresa Engimplan, e produzida pela empresa Timet. A partir da barra, foram produzidas amostras, as quais foram serradas e fresadas na oficina mecânica da EESC USP - São Carlos. As amostras possuem dimensões de 15 x 15 x 30 mm para serem utilizadas nos respectivos ensaios de microfresamento. As figuras 11(a) e 11(b) ilustram, respectivamente, a barra e as amostras.

Figura 11 – (a) Barra de Ti-6Al-4V. (b) Amostras.



Fonte: autor.

4.1. ENSAIO DE DUREZA.

O ensaio de dureza foi realizado a partir da norma ASTM F-136 com intuito de averiguar a não ocorrência de mudança de fase/encruamento na liga de titânio durante os processos serramento e fresamento, para não ultrapassar o limite de 36 HRC estabelecido pela norma e não influenciar em mecanismos de desgaste e/ou avarias. O ensaio foi realizado em um durômetro da

marca LECO, modelo RT-240, no Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura, EESC-USP São Carlos. O ensaio foi realizado na superfície fresada, em 3 pontos da peça, distanciados em 5 mm, como mostra a figura 12. Todas as medidas foram realizadas no centro das amostras, para obter um valor de dureza médio.

Figura 12 – Ensaio de dureza.



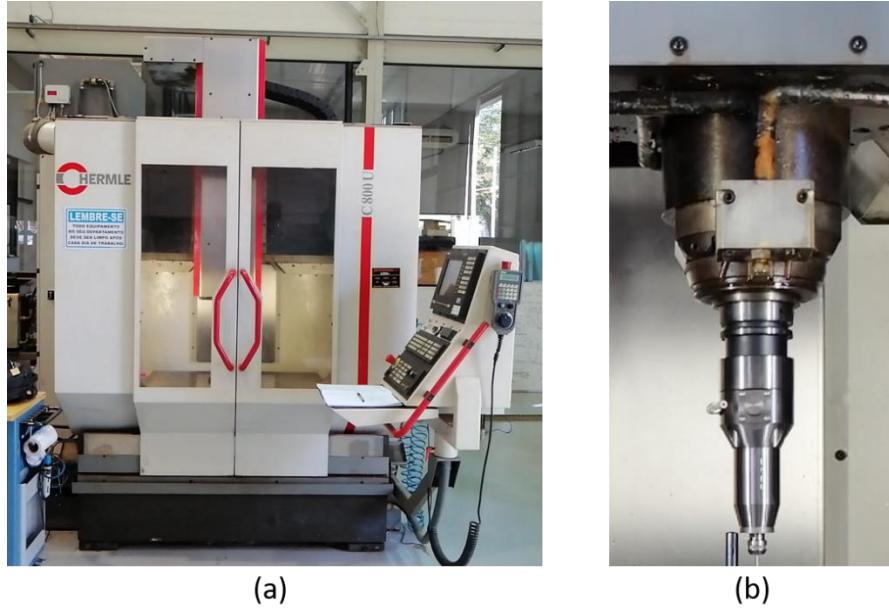
Fonte: autor.

4.2. MÁQUINA.

A máquina utilizada é um centro de usinagem da marca Hermle, modelo C800U (figura 13(a)), com resolução de $0,5 \mu\text{m}$, localizada no LAPRAS, EESC-USP São Carlos. Pode-se citar também algumas especificações da máquina, como rotação máxima de 24000 rpm e velocidade máxima de avanço $f_z = 35 \text{ m/min}$.

Embora a máquina utilizada não seja própria para o processo de microfresamento, sua precisão de posicionamento em X, Y e Z, juntamente com a compensação térmica e estrutura em granito possibilita seu uso para microfresamento. Devido aos limites de rotação no eixo árvore serem de 24000 rpm, foi necessário utilizar o cabeçote de alta rotação, da marca Nakanishi, modelo HES501-HSK A63 (figura 13(b)), que possui rotação máxima de 50.000 rpm, associada ao controlador Astro 500Z.

Figura 13 – Hermle C800U.



Fonte: autor.

4.3. FERRAMENTAS.

As ferramentas utilizadas para a fabricação das microgeometrias na superfície das amostras foram microfresas de topo inteiriças, da marca Mitsubishi, modelo MS2MS D0050. As microfresas possuem duas arestas de corte, revestimento TiAlN, 500 μm de diâmetro e comprimento de 1,5 mm. A tabela 2 mostra as especificações das ferramentas em questão.

Tabela 2 – Especificações do modelo MS2MS D0050 recomendadas pela fabricante Mitsubishi.

Ferramenta	ap (μm)	N máximo (rpm)	Vf (mm/min)
MS2MS D0050	15	40000	1000

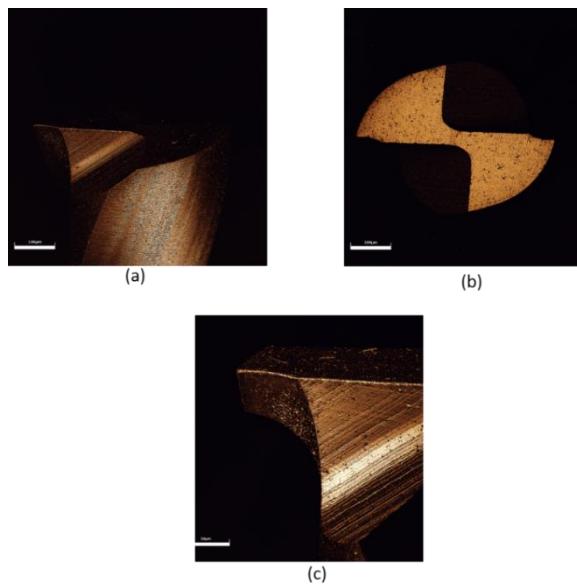
Fonte: autor.

Essas recomendações são gerais e abrangem diversas classes de materiais (aço baixa liga, aços para moldes e ligas de titânio), não indicando parâmetros ótimos para materiais específicos. O fabricante recomenda a diminuição do avanço para evitar *chatter* e sugere o aumento da profundidade de usinagem.

Um pré-teste foi realizado com intuito de garantir a não ocorrência de *chatter* e avaliação da rigidez da morsa em relação a processos de avaria que podem ocorrer, foi utilizada uma ferramenta MS2MS D00100 de 1 mm de diâmetro, com profundidade de usinagem de 50 μm e rotação de 16000 rpm. Ao final do teste, foi verificado a não ocorrência de *chatter* e lascamento.

Para a verificação prévia das superfícies das ferramentas de corte, foram verificadas as superfícies de folga, saída e uma vista de topo, de 3 ferramentas, por meio de um microscópio da marca Olympus, modelo 3D MEASURING LASER MICROSCOPE OLS4100, localizado no LAPRAS-USP São Carlos. A figura 14 (a), (b) e (c) ilustram, respectivamente, a primeira aresta de corte da ferramenta T1, com ampliação de 20x, vista de topo com ampliação de 20x e segunda aresta de corte com ampliação de 50x.

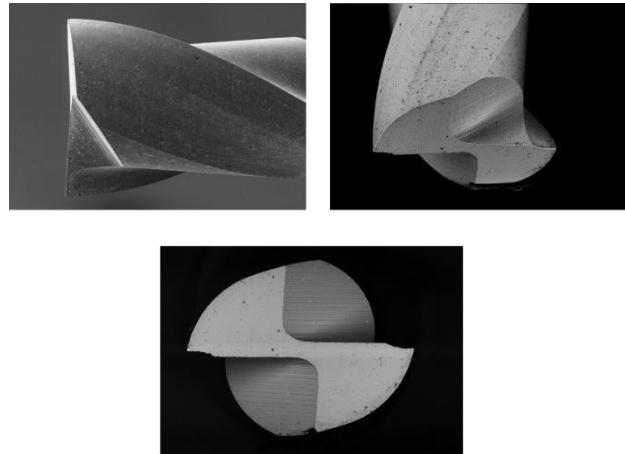
Figura 14 – Geometrias da ferramenta de corte.



Fonte: autor.

Para verificar com um aumento maior a qualidade das ferramentas de corte, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) encontrado no Departamento de Química de São Carlos – USP. A figura 15 ilustra diferentes ângulos da ferramenta de corte, aumentados em 500x.

Figura 15 – MEV de uma ferramenta de corte.

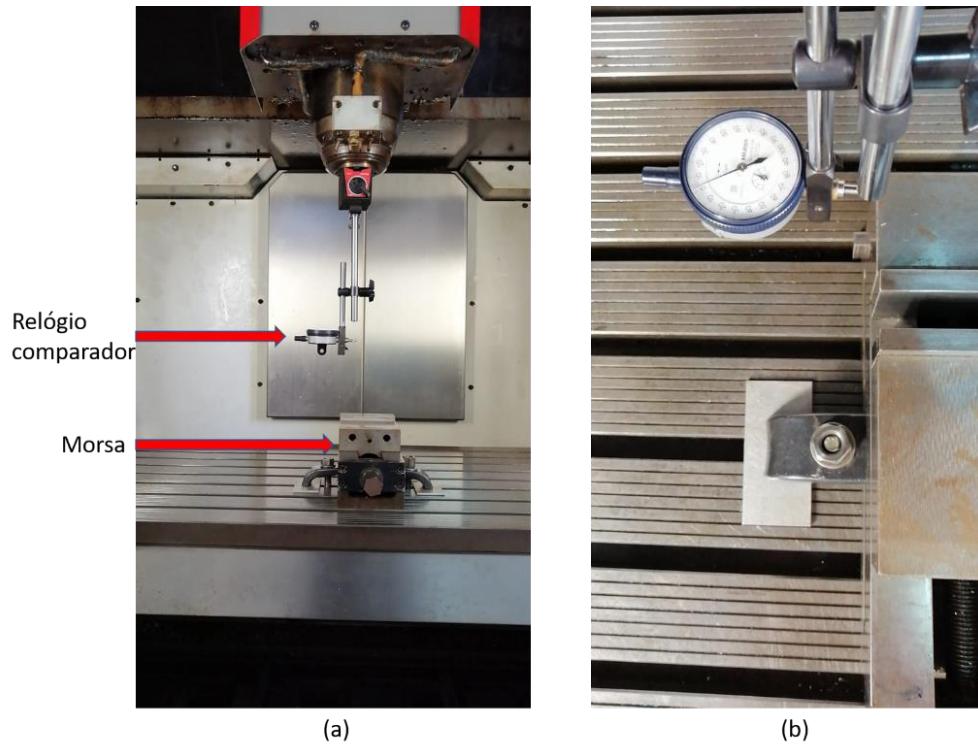


Fonte: autor.

4.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

Inicialmente, a morsa que tem a função de segurar as peças que serão usinadas, foi montada no centro de usinagem. Após sua montagem, foram verificados os erros de posição da morsa, por meio de um relógio comparador da marca Mitutoyo, com resolução de 1 μm . As figuras 16 (a) e (b) ilustram, respectivamente, a montagem da morsa com o relógio comparador no centro de usinagem, e o relógio comparador já em contato com a morsa.

Figura 16 – (a) Montagem relógio comparador + morsa. (b) Relógio comparador em contato com a morsa.



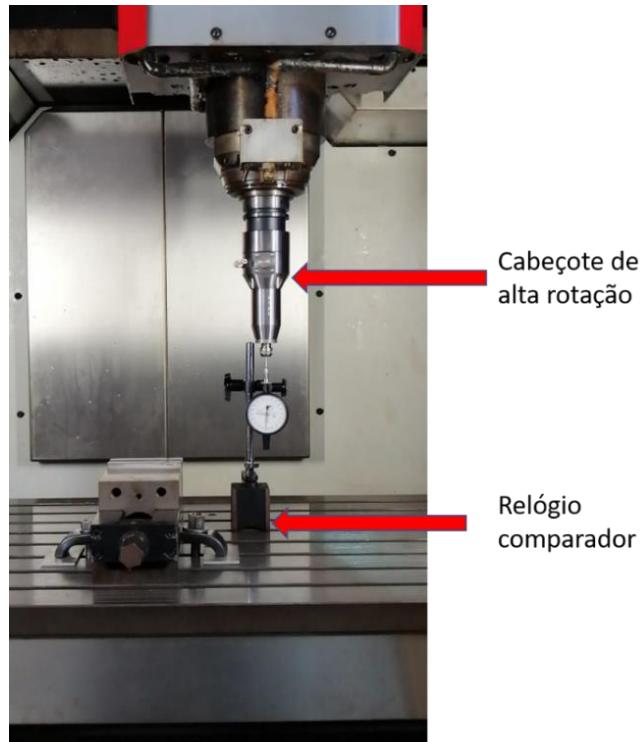
Fonte: autor.

O relógio comparador foi deslocado em relação às direções X e Y da morsa, com a intenção de verificar o erro de perpendicularismo dela, para que a peça esteja com erros de tolerância muito baixos em relação ao eixo do centro de usinagem. As superfícies XZ e YZ foram realizadas três vezes pelo relógio comparador, apontando um erro de 5 μm .

Após a verificação do erro de posicionamento da morsa, iniciou-se a etapa da verificação de erros de posicionamento do cabeçote de alta rotação. Com o mesmo relógio comparador, foram verificados os erros de planicidade do cabeçote de alta rotação, nos eixos X e Y. Obteve-se nesta etapa um valor de 3 μm de erro em ambos os eixos. Além das medidas dos erros da morsa e do cabeçote, foi feito o mapeamento dos eixos X, Y e Z da máquina, com intuito de obter informações como os erros de posicionamento em todos os eixos. Vale ressaltar que foram feitas 30 medidas para cada eixo, visando obter uma curva de distribuição normal. Tais medidas foram realizadas para valores de velocidade de avanço de 10, 50, 100, 300 e 500 mm/min. A figura 17 ilustra a

montagem feita do relógio comparador com o cabeçote de alta rotação, durante a verificação dos erros no eixo Z.

Figura 17 – Medição dos erros no eixo Z (montagem relógio comparador + cabeçote de alta rotação).



Fonte: autor.

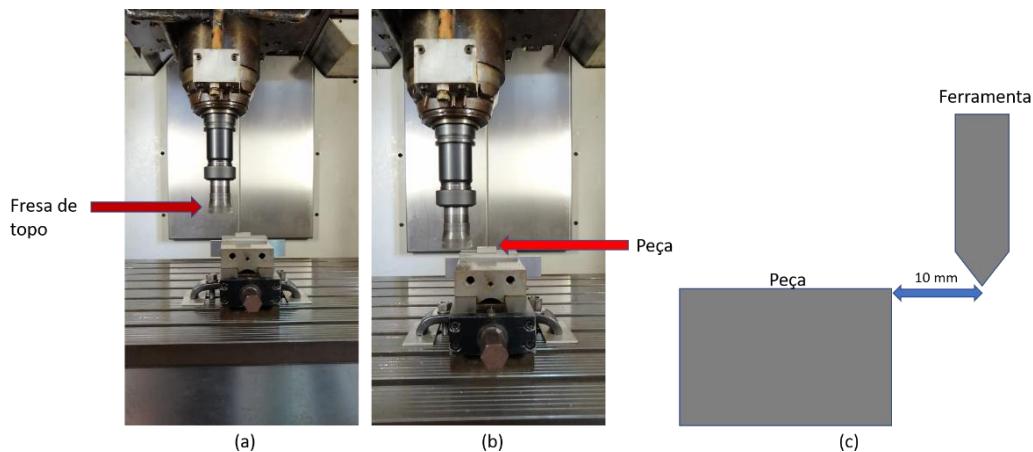
Com todos os mapeamentos e erros determinados, deu-se início à fase de pré-teste. Antes de usinar o corpo de prova de pré-teste, a máquina foi aquecida durante uma hora, visando aumentar a temperatura dos eixos, para assim minimizar os erros. Com a máquina aquecida, o corpo de prova foi preso na morsa. A fase de pré-teste pode ser explicada em duas etapas:

- Primeira etapa: preparação da superfície da amostra.

Nesta etapa, usou-se uma fresa de topo, com 50 mm de diâmetro. Os parâmetros de corte utilizados foram rotação de 695 rpm e velocidade de avanço de 60 mm/min. Esta etapa visa garantir que a superfície da peça esteja paralela à base do *spindle* e que sejam superfícies com ângulos de contato mais próximos de 90° no ensaio de molhabilidade. Para valores comparativos no ensaio de molhabilidade, foi fabricado um corpo de prova com essa superfície lisa, e este corpo não haverá presença de canais.

Ao encostar a fresa na superfície, os primeiros cavacos são formados. Consequentemente, a fresa é retirada da peça, ficando a uma distância de 10 mm de sua superfície em relação a X. Um programa é feito no código G, fazendo com que a fresa passe pela superfície com um ap (profundidade de usinagem) de 100 µm. A ferramenta passa pela superfície 3 vezes, sendo que o primeiro passo visa a remoção de material, segundo passo garantir que os 100 µm foram retirados e terceiro passo remoção de camadas endurecidas, caso tenham sido formadas. A figura 18 (a) e ilustra o conjunto ferramenta e morsa, enquanto a figura 18 (b) a ferramenta com uma distância de 10 mm da peça. A figura 18 (c) ilustra um esquema referente à distância entre peça e ferramenta.

Figura 18 – (a) conjunto ferramenta morsa. (b) ferramenta com 10 mm de distância da peça. (c) Distância entre peça e ferramenta.

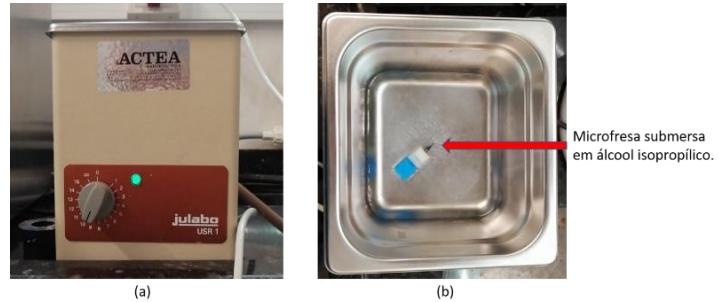


Fonte: autor.

- Segunda etapa: usinagem de um canal, verificação da ferramenta e do canal.

Após a preparação da superfície, iniciou-se o processo de usinagem do primeiro microcanal. Para isso, primeiramente a ferramenta foi imersa em álcool isopropílico, e limpa com ultrassom, em um período de 10 minutos, no equipamento ACTEA, modelo Julabo USR1 no LAPRAS, EESC-USP São Carlos. As figuras 19 (a) e (b) ilustram, respectivamente, o equipamento e a microfresa imersa em álcool isopropílico.

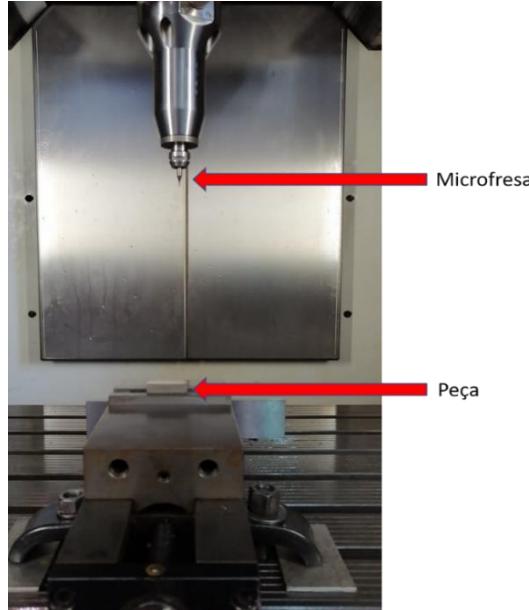
Figura 19 – (a) equipamento de limpeza por ultrassom. (b) microfresa submersa em álcool isopropílico.



Fonte: autor.

A figura 20 ilustra o pré-teste realizado para a verificação da ocorrência de *chatter* e de possíveis avarias nos canais fabricados. Este pré-teste será importante para identificar os danos gerados nas ferramentas conforme os canais vão sendo fabricados, o que pode gerar diferenças na geometria e formação de rebarbas entre os primeiros e últimos canais.

Figura 20 – Montagem da microfresa na máquina.

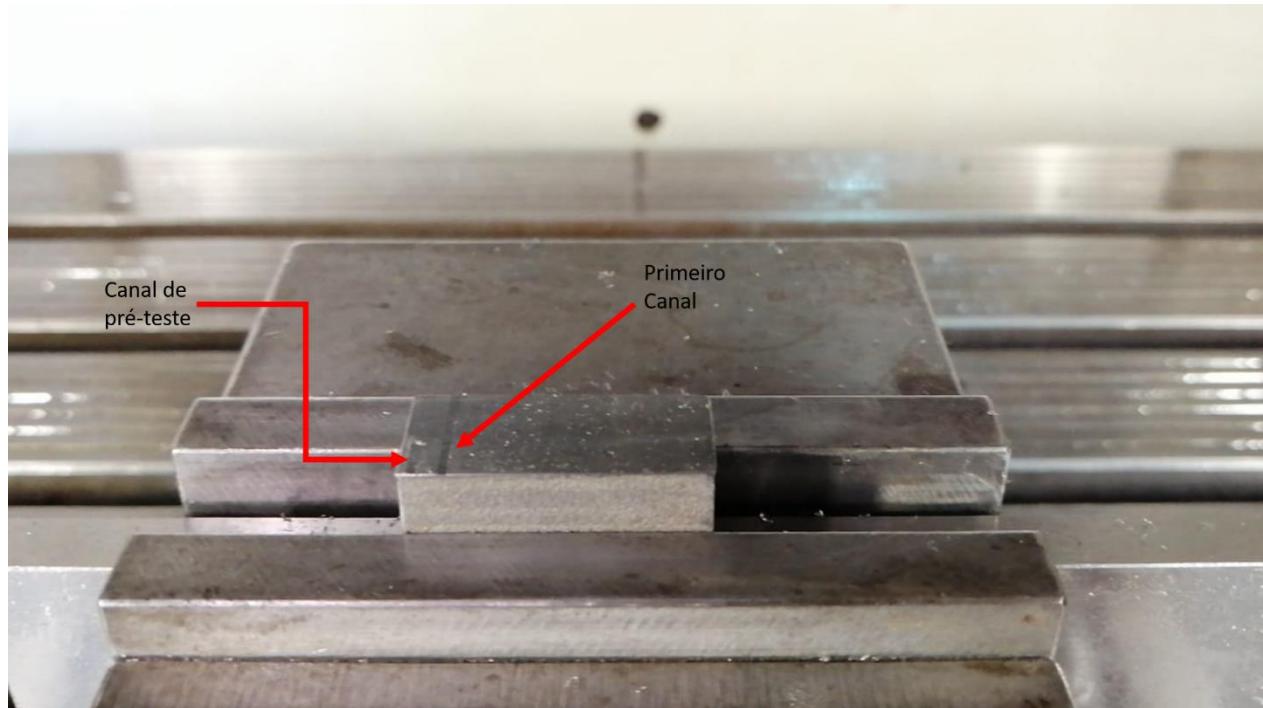


Fonte: autor.

A microfresa de 1 mm de diâmetro foi submetida a uma velocidade de rotação de 16.000 rpm, e então, foi aproximada da peça, com o cuidado de tocar a superfície na menor distância possível. Ao verificar que a ferramenta encostou na peça, a microfresa é retirada da mesma, formando o canal de pré-teste.

Por fim, com a ferramenta fora da superfície da peça, a microfresa desce 50 μm no eixo Z, e avança 1 mm na direção do eixo X. Após posicionada, a ferramenta avança no eixo Y, gerando o primeiro canal. A figura 21 ilustra o canal de pré-teste e o primeiro canal usinado no corpo de prova de pré-teste.

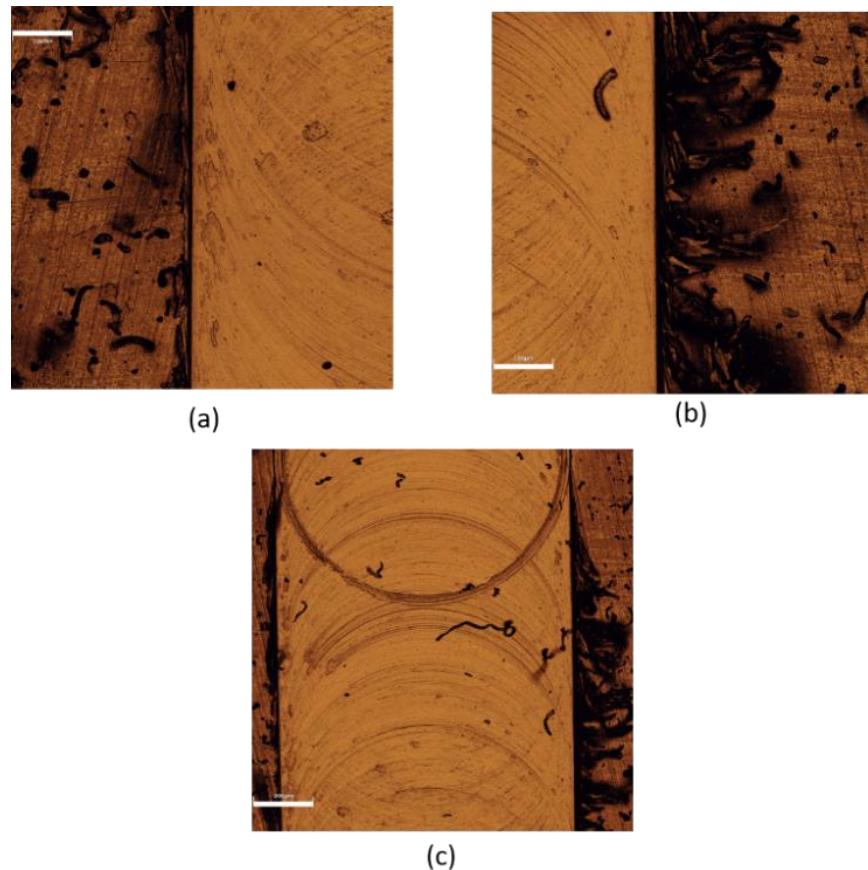
Figura 21 – Usinagem do canal de pré-teste e do primeiro canal no corpo de prova de pré-teste.



Fonte: autor.

Posteriormente, a amostra foi analisada no microscópio Olympus, o mesmo utilizado para verificar as superfícies das ferramentas de corte. No microscópio, foram analisadas as profundidades do canal de pré-teste e o primeiro canal. Foram geradas 3 imagens para o primeiro canal, com um aumento de 20 vezes. As figuras 22 (a), (b) e (c) ilustram, respectivamente, a primeira metade do canal, a segunda metade do canal e o canal completo. A partir do software (Lext) utilizado no microscópio, pode-se verificar que no canal de pré-teste ou canal de toque, a profundidade foi medida em 3 pontos, resultando em uma média de 4,553 μm .

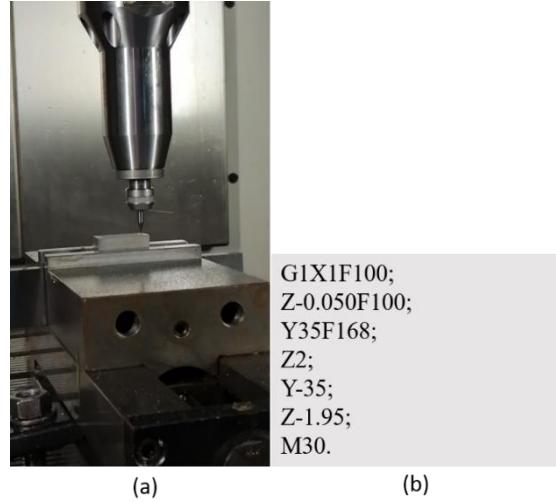
Figura 22 – (a) primeira metade do canal. (b) segunda metade do canal. (c) canal completo.



Fonte: autor.

Com a segunda etapa concluída, deu-se início à fabricação das peças. As peças finais serão compostas por 1 canal de pré-teste e 26 canais completos. Para a fabricação dessas peças, a máquina foi aquecida durante uma hora. Repetiu-se as etapas 1 e 2, descritas acima para a fabricação do corpo de prova de pré-teste. A figura 23 (a) ilustra a microfresa no processo de fabricação do último microcanal da peça, enquanto a figura 23 (b) ilustra o código G utilizado para a fabricação da peça com avanço de 168 mm/min.

Figura 23 – (a) fabricação do último microcanal. (b) código G utilizado.

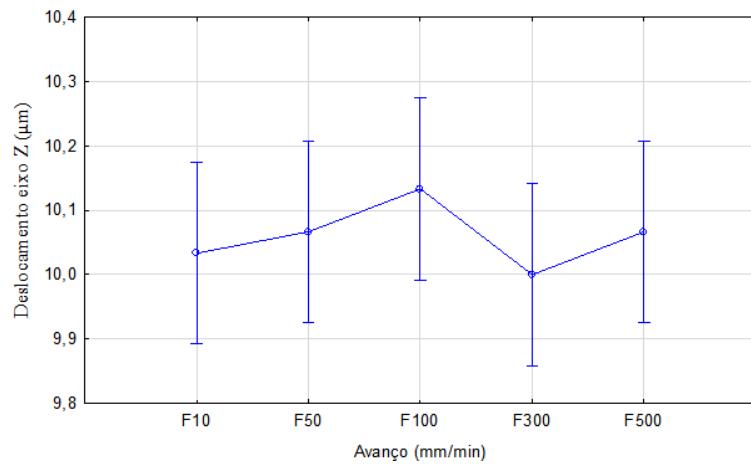


Fonte: autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos referentes aos erros de posicionamento da máquina, montou-se um gráfico de distribuição, conforme ilustra a figura 24.

Figura 24 – Gráfico de distribuição dos avanços.



Fonte: autor.

A tabela 3 mostra os valores obtidos referente à altura do canal de pré-teste no início e no fim, assim como a largura no início e no fim.

Tabela 3 – Valores de altura e largura em μm no início e fim do canal de pré-teste, no corpo de pré-teste.

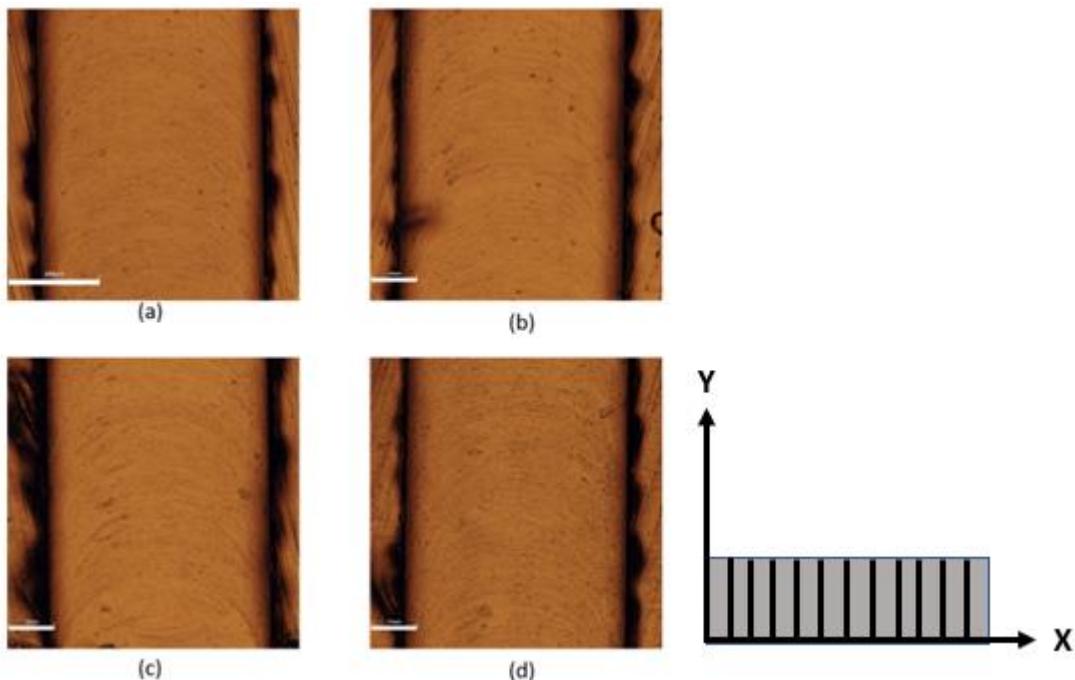
Altura do canal de toque	Altura do início	Altura do fim	Largura do início	Largura do fim
4,271	53,608	59,215	987,853	982,857
4,749	53,926	59,523	985,355	980,360
4,639	53,557	58,646	986,604	984,160

Fonte: autor.

5.1. ANÁLISE DAS GEOMETRIA DOS CANAIS

A partir das imagens geradas no microscópio Olympus, foi possível verificar a geometria dos 26 canais fabricados. As figuras 25 (a), (b), (c) e (d) ilustram, respectivamente, o início do primeiro canal, o fim do primeiro canal, vistos de cima (esquema), o início do vigésimo sexto canal e o fim do vigésimo sexto canal, para uma peça fabricada com um avanço de 168 mm/min. As figuras 26 (a), (b), (c) e (d) ilustram os mesmos canais, mas fabricados com avanço de 336 mm/min e, por fim, as figuras 27 (a), (b), (c) e (d), os mesmos canais fabricados com um avanço de 672 mm/min. Além disso, foram feitas 3 medidas de profundidade em diferentes pontos dos canais de pré-teste, início e fim dos canais 1 e 26. Tais dados são apresentados nas tabelas 4, 5 e 6, para os avanços de 168 mm/min, 336 mm/min e 672 mm/min, respectivamente.

Figura 25 – (a) início do primeiro; (b) final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto canal; (d) final do vigésimo sexto canal. Peça fabricada com avanço de 168 mm/min.



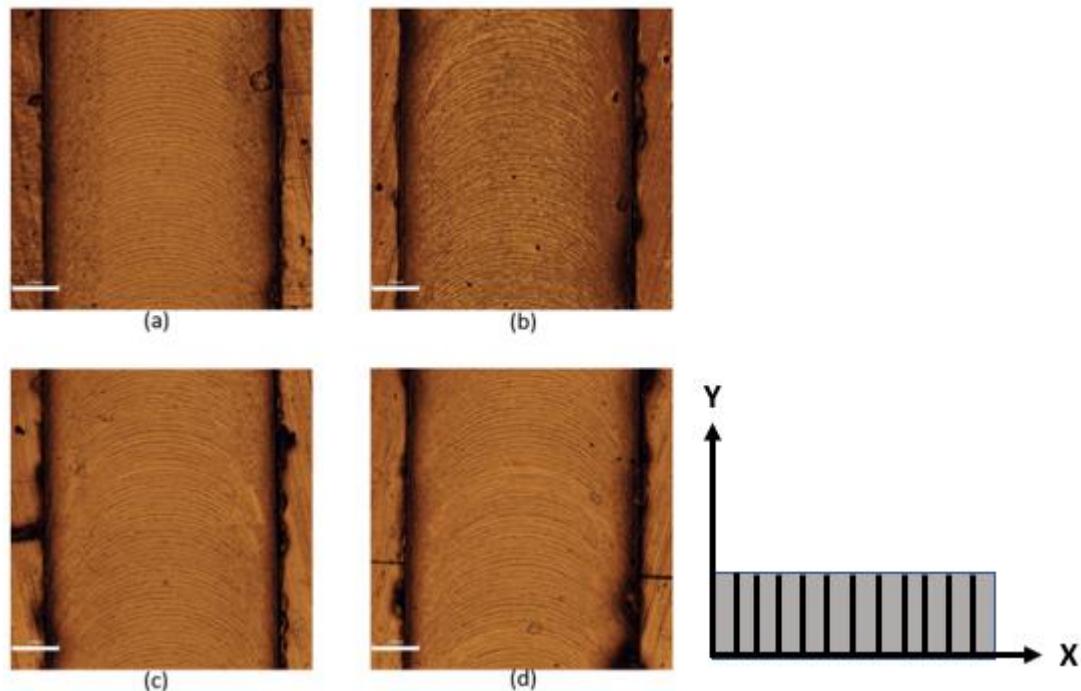
Fonte: autor.

Tabela 4 – Dados sobre as profundidades em μm dos canais de pré-teste, canal 1 e 26, para a amostra fabricada com avanço de 168 mm/min.

Canal de pré- teste	Início do canal 1	Final do canal 1	Início do canal 26	Final do canal 26
4,720	48,232	53,631	46,552	51,409
5,076	48,103	52,699	46,201	51,895
5,558	48,999	51,823	47,039	51,677

Fonte: autor.

Figura 26 – (a) início do primeiro canal; (b) final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto canal; (d) final do vigésimo sexto canal. Peça fabricada com avanço de 336 mm/min.



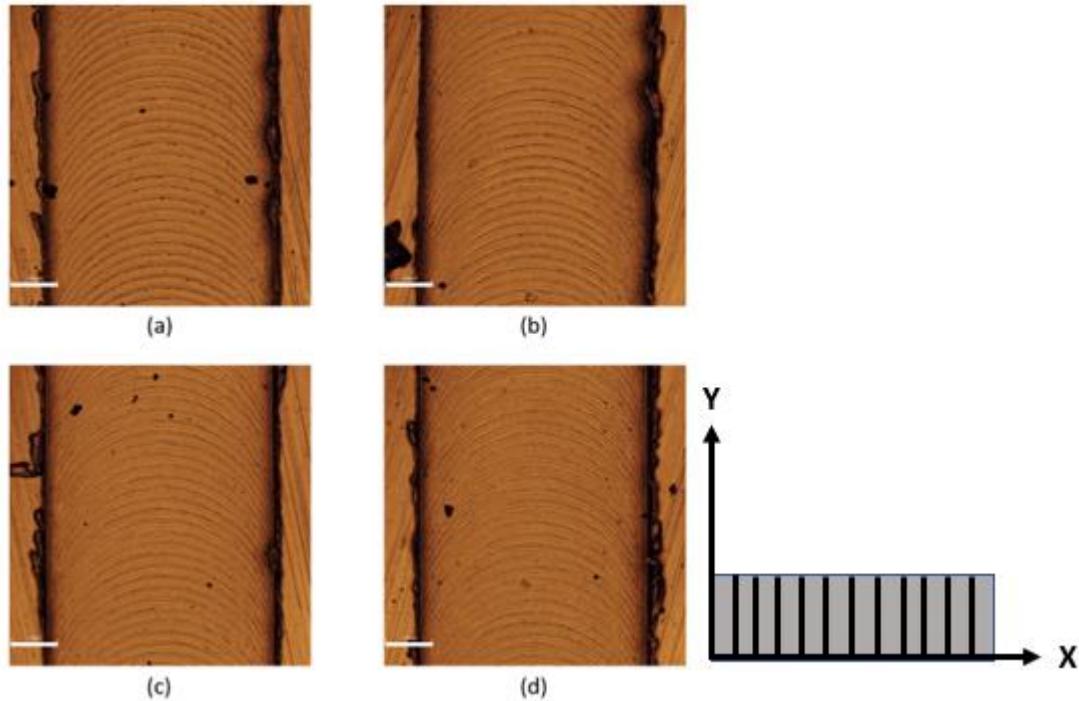
Fonte: autor.

Tabela 5 – Dados sobre as profundidades em μm dos canais de pré-teste, canal 1 e 26, para a amostra fabricada com avanço de 336 mm/min.

Canal de pré-teste	Início do canal 1	Final do canal 1	Início do canal 26	Final do canal 26
6,152	51,191	57,469	49,394	55,584
6,312	52,108	57,950	49,231	55,503
6,421	52,169	57,289	50,383	55,223

Fonte: autor.

Figura 27 - (a) início do primeiro canal; (b) final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto canal; (d) final do vigésimo sexto canal. Peça fabricada com avanço de 672 mm/min.



Fonte: autor.

Tabela 6 – Dados sobre as profundidades em μm dos canais de pré-teste, canal 1 e 26, para a amostra fabricada com avanço de 672 mm/min.

Canal de pré-teste	Início do canal 1	Final do canal 1	Início do canal 26	Final do canal 26
0,778	45,793	51,745	46,822	52,343
0,910	46,557	51,922	47,419	52,218
1,093	46,426	51,265	47,556	52,484

Fonte: autor.

Em todas as peças, foi efetuado um recuo no eixo Z de 5 μm após a ferramenta encostar na peça, formando o canal de teste. Tal procedimento foi efetuado para que, ao descer em Z e formar o primeiro canal, o Ap estivesse o mais próximo de 50 μm .

A partir dos dados obtidos, é possível verificar que, ao subir 5 μm em Z e depois descer 50 μm no mesmo eixo, a máquina apresentou a precisão correta. Contudo, também é possível perceber que, as profundidades nos canais diferem nos valores no início e no fim do canal, em aproximadamente 5 μm . Essa variação ocorre devido à precisão da máquina ao percorrer o eixo Y no sentido positivo. Como esse erro de precisão é muito pequeno, não há problemas em realizar o microfresamento em superfícies de implantes.

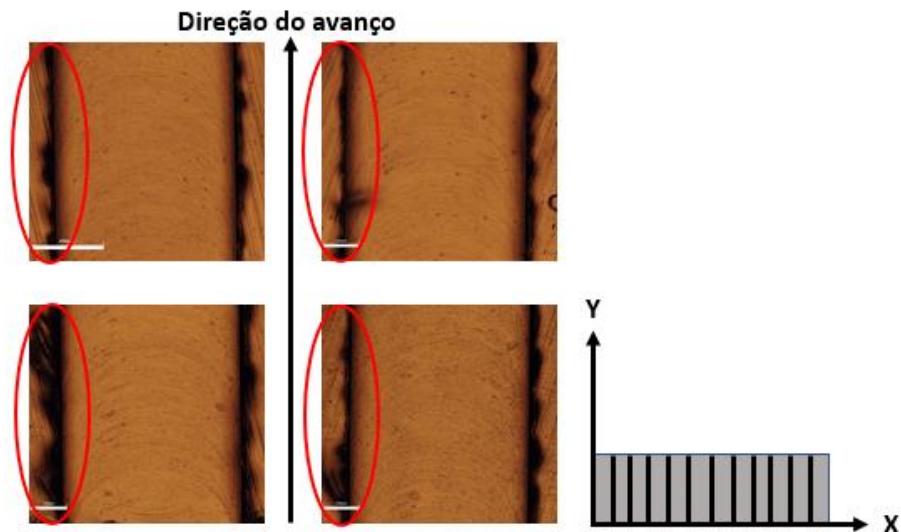
Outro ponto que deve ser analisado é com relação às marcas de fresa, presentes no fundo dos canais. É possível verificar, nas imagens 25, 26 e 27 que, as marcas de avanço da fresa estão em apenas um sentido. Tal fato nos mostra que não houve efeito significativo das vibrações tanto da peça quanto da ferramenta de corte, ou seja, não houve o efeito *chatter*, caracterizado pelo cruzamento das marcas de avanço. Esse efeito pode implicar na vida em fadiga de implantes, uma vez que o cruzamento das marcas de avanço gera concentradores de tensão, facilitando a nucleação e propagação de trincas (WEINGARTNER, 2015).

5.2. ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE REBARBAS

Sabe-se que a formação de rebarbas é um processo que está contido na usinagem. Sendo assim, é de suma importância verificar a quantidade de rebarbas formadas na usinagem de implantes, pois é uma variável a se estudar quando se trata de energia de superfície.

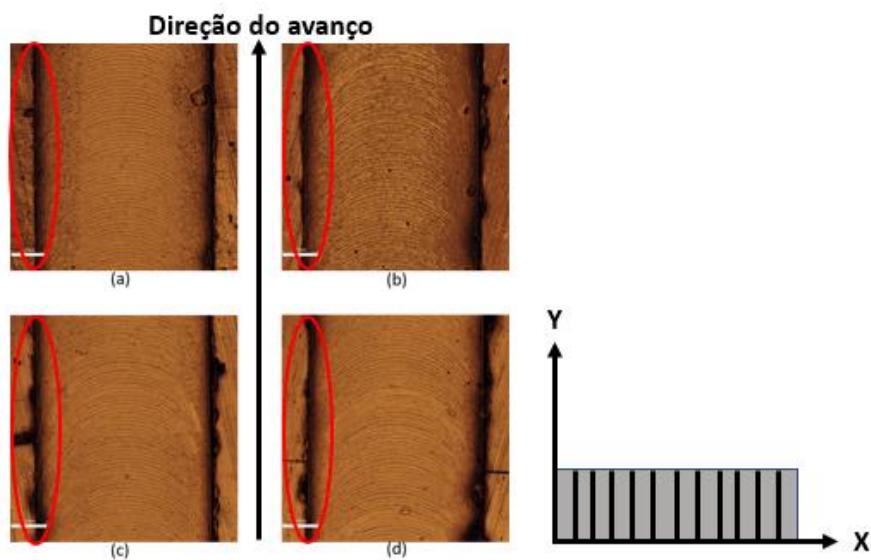
As figuras 28 (a), (b), (c) e (d) mostram as rebarbas formadas durante o processo de fabricação das peças, para o avanço de 168 mm/min. As figuras 29 (a), (b), (c) e (d) mostram a formação de rebarbas para o avanço de 336 mm/min e, por fim, as figuras 30 (a), (b), (c) e (d) para o avanço de 672 mm/min.

Figura 28 – Formação de rebarbas em diferentes pontos dos canais para um avanço de 168mm/min. (a) Início do primeiro canal; (b) Final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto canal e (d) final do vigésimo sexto canal.



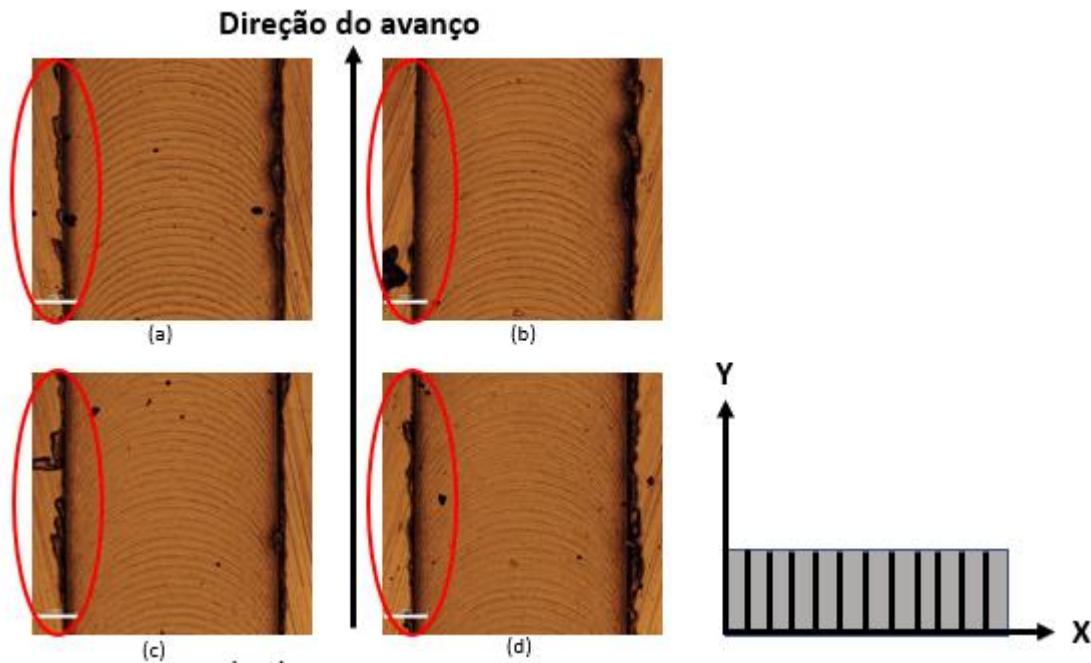
Fonte: autor.

Figura 29 – Formação de rebarbas em diferentes pontos dos canais para um avanço de 336 mm/min. (a) Início do primeiro canal; (b) Final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto canal e (d) final do vigésimo sexto canal.



Fonte: autor.

Figura 30 – Formação de rebarbas em diferentes pontos dos canais para um avanço de 672 mm/min. (a) Início do primeiro canal; (b) Final do primeiro canal; (c) início do vigésimo sexto canal e (d) final do vigésimo sexto canal.



Fonte: autor.

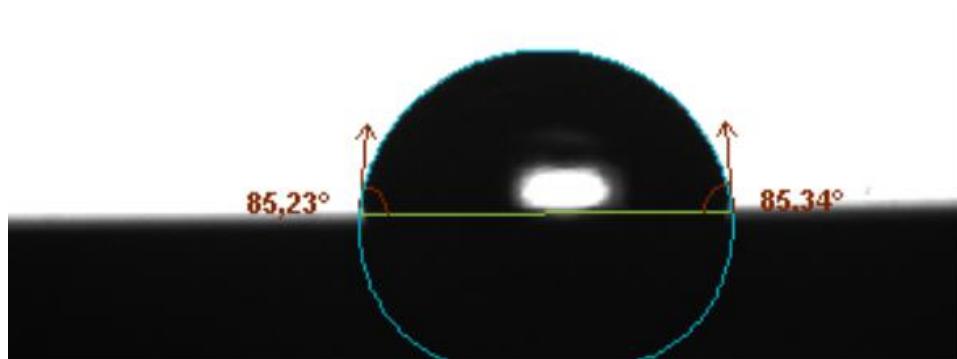
É possível perceber que, a quantidade de rebarbas aumenta em relação tanto ao fim do canal, quanto ao número do canal, ou seja, a quantidade de rebarbas no início do canal é maior no fim dos canais, e é maior no canal 26 em relação ao canal 1. Esse fato ocorre devido ao desgaste da ferramenta.

A formação de rebarbas não é desejada na fabricação de implantes, uma vez que elas podem se destacar por arraste, o que pode acarretar problemas de saúde para o usuário, além de serem uma espécie de barreira ao deslocamento de fluidos.

5.3. ANÁLISE DA MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE.

Para os ensaios de molhabilidade, foi utilizado um tensiômetro, da marca Attension, disponível no Instituto de Química de São Carlos - USP. Tal equipamento, deposita uma gota de água com 3 μL de volume, e analisa como essa gota se comporta na superfície. A figura 31 ilustra o ensaio de molhabilidade realizado na superfície lisa, com ausência dos microcanais, vista pelo eixo X.

Figura 31 – Ensaio de molhabilidade em uma superfície lisa, eixo X.

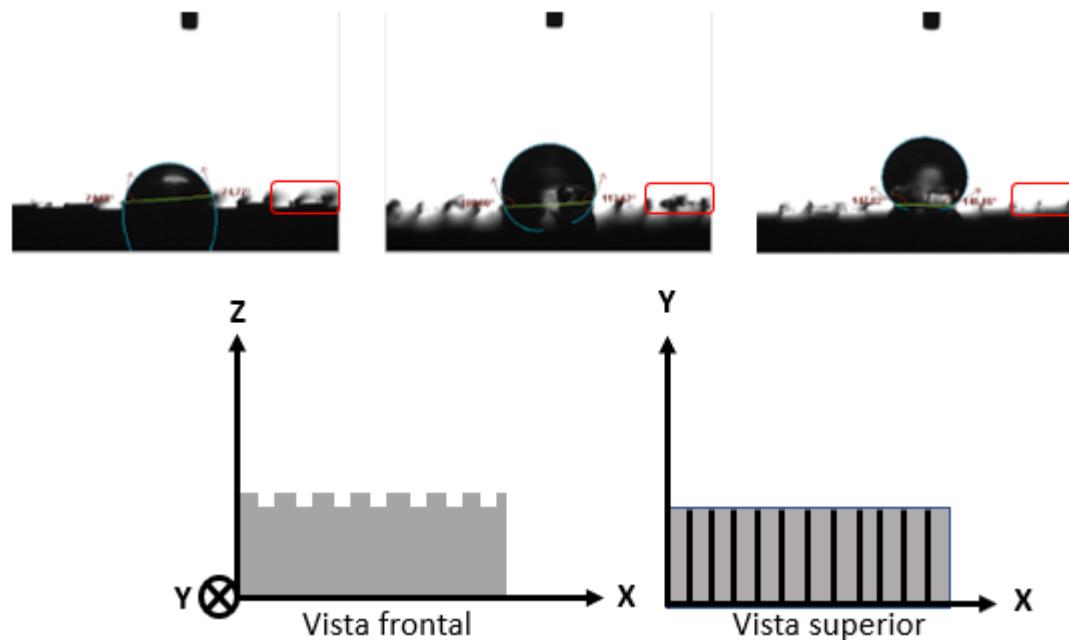


Fonte: autor.

Pode-se perceber que, o contato da gota com a superfície lisa gera um ângulo de aproximadamente 90°, desse modo, pode-se considerar que a superfície é neutra, portanto, não é nem hidrofílica nem hidrofóbica.

Agora com as peças microusinadas, foi feito o ensaio de molhabilidade novamente, para os diferentes avanços. As figuras 32 (a), (b) e (c) ilustram, respectivamente, os ângulos de contato, vistos no eixo X, para as peças feitas com avanço de 168 mm/min, 336 mm/min e 672 mm/min, respectivamente. Foram feitas 3 medidas em cada amostra, nos canais iniciais, intermediários e finais.

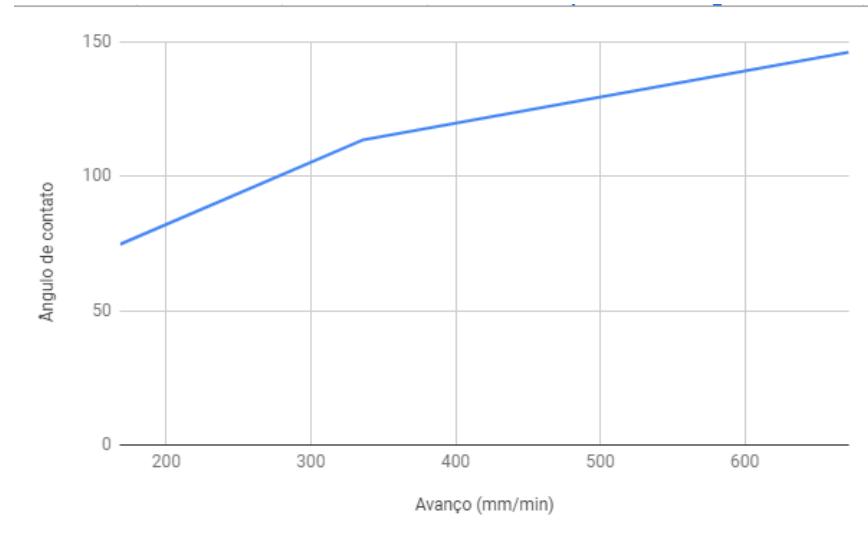
Figura 32 – Ângulos de contato vistos no eixo X. (a) F168 mm/min; (b) F336 mm/min e (c) F672 mm/min.



Fonte: autor.

Pode-se perceber que, na amostra microusinada com avanço de 168 mm/min, o ângulo de contato da gota de água com a superfície foi de $74,72^\circ$ eixo X, portanto a superfície é hidrofílica nesse eixo para essa condição de usinagem. Já as amostras microusinadas com avanços de 336 e 672 mm/min, apresentaram gotas com ângulos de contato superiores a 90° no eixo X, com valores de $113,62^\circ$ e $146,16^\circ$, respectivamente. Sendo assim, foram geradas superfícies hidrofóbicas no eixo X para essas condições de usinagem. A figura 33 mostra o gráfico gerado sobre o comportamento do ângulo de contato no eixo X conforme o avanço aumenta.

Figura 33 – Comportamento do ângulo de contato no eixo X com o aumento do avanço.

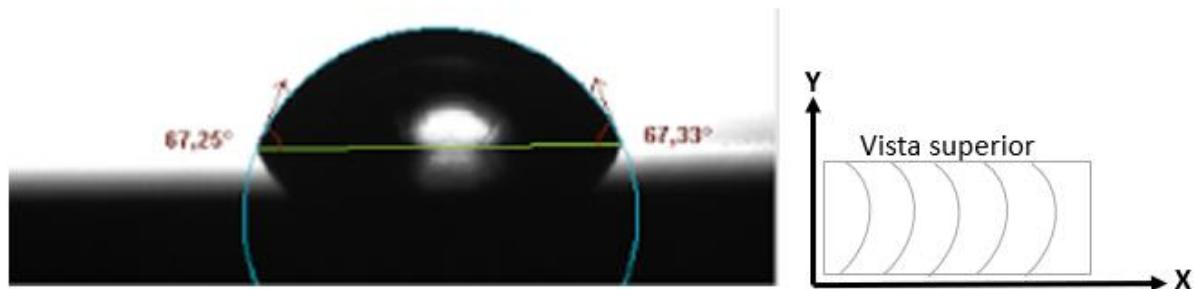


Fonte: autor.

De acordo com a figura 33 pode-se perceber que a superfície tende a apresentar menor hidrofilicidade no eixo X conforme o avanço aumenta.

Com os valores do ângulo de contato no eixo X, verificou-se posteriormente os ângulos de contato no eixo Y. Assim como no eixo X, foi verificado o ângulo de contato em uma superfície lisa, conforme ilustra a figura 34.

Figura 34 - Análise do ângulo de contato de uma superfície lisa, vista pelo eixo Y.

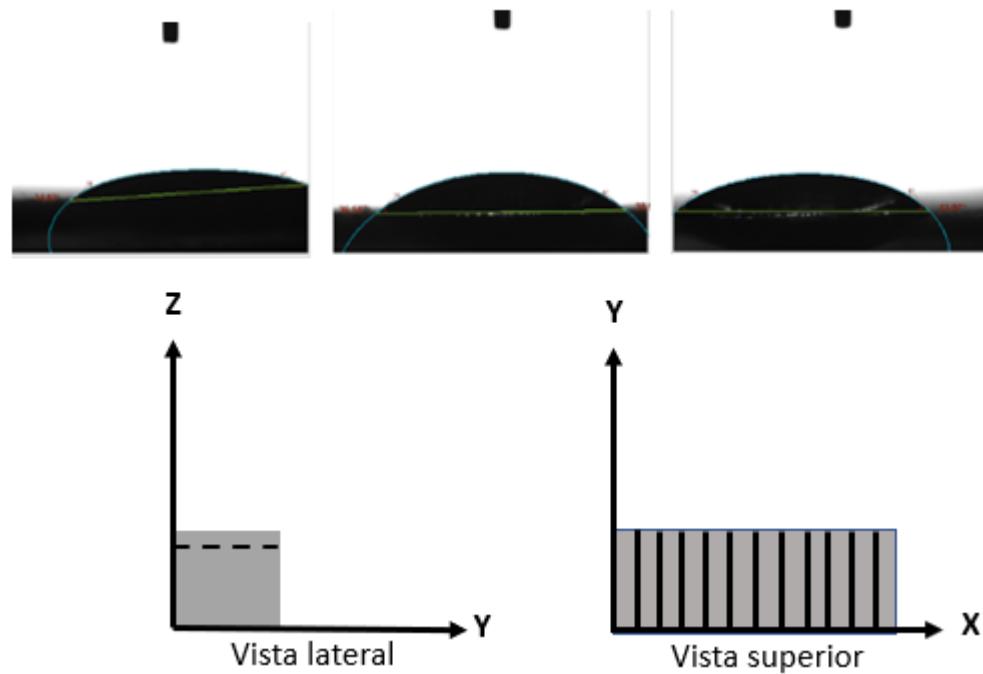


Fonte: autor.

Pode-se perceber que, diferente do eixo X, o ângulo de contato da gota com a superfície da peça, verificada pelo eixo Y, não é neutra. É possível notar que esse ângulo é menor que 90° , caracterizando uma superfície hidrofílica. Uma possível explicação para este resultado, são as marcas de avanço deixadas pela fresa de topo, as quais fazem com que a gota se espalhe mais facilmente, simulando microcanais, assim como mostrado no esquema na figura 34.

Com as peças microfresadas, verificou-se o comportamento do ângulo de contato para as peças munidas de microcanais. As figuras 35 (a), (b) e (c) ilustram, respectivamente, os valores de ângulo de contato, vistos pelo eixo Y, das amostras fabricadas com os avanços de 168, 336 e 672 mm/min, respectivamente.

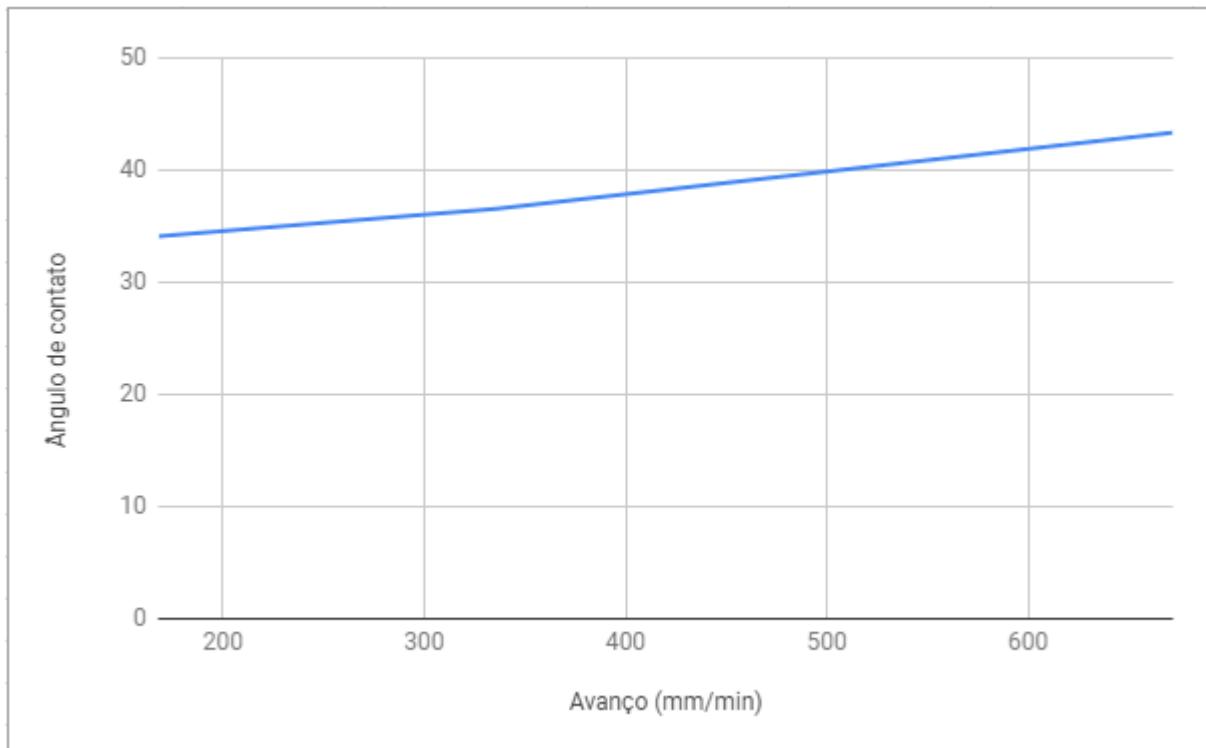
Figura 35 – Ângulos de contato vistos pelo eixo Y. (a) F168 mm/min; (b) F336 mm/min e (c) F672 mm/min.



Fonte: autor.

Conforme visto na figura 35, temos que os valores para ângulo de contato são de $34,12^\circ$ para a amostra fabricada com avanço de 168 mm/min , $36,58^\circ$ para 336 mm/min e $43,37^\circ$ para 672 mm/min . A figura 36 mostra o gráfico sobre o comportamento do ângulo de contato visto no eixo Y com o aumento do avanço.

Figura 36 – Comportamento do ângulo de contato com o aumento do avanço visto pelo eixo Y.



Fonte: autor.

De acordo com o gráfico da figura 36, é possível perceber que o aumento do avanço gera um aumento do ângulo de contato. Quando utilizado um avanço maior, a quantidade de rebarbas é reduzida. Sendo assim, uma possível explicação para o aumento do ângulo de contato conforme aumenta o avanço, é que as rebarbas aumenta a hidrofilicidade da superfície, tanto nos eixos X como no Y. Entretanto, Wan et al. (2017), em seus estudos, mostra que em superfícies anodizadas de titânio, forma-se tubos de TiO_2 , fazendo com que as rebarbas sejam praticamente eliminadas e deixam a superfície hidrofílica, enquanto as superfícies microfresadas, com a presença de rebarbas,

deixam a superfície mais hidrofóbica. Sendo assim, são necessários mais estudos na área para a comprovação do efeito das rebarbas na hidrofilicidade de superfícies.

Outro ponto que deve ser abordado é a diferença de comportamento do formato da gota entre os eixos X e Y. Em seus estudos, Pratap (2018) verificou o comportamento de nanogotículas de água em superfícies fabricadas com microfresas do tipo *ballnose*. Em seus estudos, a profundidade dos canais era de aproximadamente 10 μm . Foi verificado que há, como no presente trabalho, uma diferença entre a molhabilidade nos eixos X e Y. Sendo assim, essa diferença pode ser causada pelo tamanho da gota, pois com gotas maiores, mais canais entram em contato com o líquido da gota, fazendo com que ela se espalhe mais. Portanto, pode-se perceber que as partes da superfície em relevo agem como restrição para o espalhamento da gota.

6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, é possível perceber que, para a fabricação de implantes, é mais adequado utilizar velocidades de avanço relativamente baixas, uma vez que, como foi possível verificar nos ensaios de molhabilidade, o ângulo de contato é menor para superfícies fabricadas com avanços de 168 mm/min, em ambos os eixos X e Y. Além disso, os ângulos obtidos são menores que 90°, sendo possível caracterizar a superfície como hidrofílica. Outro ponto a ser notado, é que a diferença no comportamento do ângulo de contato na superfície em diferentes eixos pode ter utilidade na direcionalidade dos fluídos, ou seja, o fluído percorre preferencialmente em um sentido.

Além disso, é possível concluir que a área de pesquisa referente a superfície de implantes necessita de estudos mais aprofundados, uma vez que os resultados obtidos para estes parâmetros de corte não foram os esperados baseados na literatura, já que as peças com maiores quantidades de rebarba foram as que apresentaram melhor comportamento quanto à molhabilidade e, portanto, apresentam maior energia de superfície, o que é essencial para implantes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F136-13**: Standart Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant applications West Conshohoken, 2013, 5p.

BECKER, M.; SANTOS, S.C.; SALES, W.F. **Integridade Superficial em Usinagem**. In: Vários Autores – Tecnologias Avançadas de Manufatura, Jaboticabal, Ed 1, p 105-123, 2005.

BERESTOVKYI, D.; HUNG, W.N.P. Surface Finish of Ball-End Milled Microchannels. In: **International Conference of Micromanufacturing**. Canada. Anais... v. 80, p 1-8, 2013.

BISSACO, G.; HANSEN, H. N.; CHIFFRE, L. D.; Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. **Journal of Materials Processing Technology**, p 1-13, 2013.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W.A. **Fundamentals of Machining and Machine Tools**. 2 ed. Edition, Marcel Dekker, Nova Iorque, 1989.

BRANEMARK, P. I.; ALBREKTSSON, T.; HANSSON, H. A. et al., Osseointegrated titanium implants. Requirements for ensuring a long-lasting, directbone-to-implant anchorage in man. **Acta Odontol. Scand.**, Stockholm, v. 52, n. 2, p.155-70, 1981.

BRANEMARK, P.I; BREINE, U; ADELL, R; HANSSON, B.O; LINDSTROM, J; OHLSSON, Å. Intra-Osseous Anchorage of Dental Prostheses: I. Experimental Studies. **Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery**. Page 81-100. 1969.

BRANEMARK, P.I; ZARB, G.A; ALBREKTSSON, T. Tissue integrated prostheses. In: **Osseointegration in clinical dentistry**. Chicago: Quintessence Publ. Co. Inc. 1985.

CÂMARA, M.A. **Influência do Efeito de Escala Sobre a Operação de Microfresamento**. 2014. 191f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CÂMARA, M.A; RUBIO, J.C.C.; ABRÃO, A.M.; DAVIM, J.P. State of the art on micromilling of materials, a review. **Journal of Materials Science & Technology**, v.28, n. 8, p. 673 – 685, 2012.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA – CIMM. **Material Didático – Fresamento**. Disponível em <<http://www.cimm.com.br>>. Acesso em 22 de janeiro de 2019.

CHAE, J.; PARK, S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, New York, v. 46, n. 3-4, p. 313-332, 2006.

CHERN, G. L.; WU, Y. J. E.; CHENG, J. C.; YAO, J. C. Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM. **Precision Engineering**. v. 31, p.122–129, 2007.

CHEVRIER, A. et al. Investigation of surface integrity in high speed end milling of a low alloyed steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 43, n.11, p. 1135-1142, set. 2003.

COLAFEMINA, J.P. **Estudo da microunsinabilidade do Ti (CP) e da liga Ti6Al4V no torneamento com ferramenta de diamante**. 2005. 150f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo, Artliber, 2000.

DOS SANTOS, A. G. **Microfresamento de aço inoxidável duplex UNS S32205 com ferramentas de metal duro revestidas com nitreto de titânio**. 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

FIELD, M.; KAHLES, J. F.; KOSTER, W.P. Surface finish and surface integrity. In: Metals Handbook: machining. **ASM**, Ohio, v. 16, n. 9, p. 19-36, 1989.

LEE, K., DORNFELD, D. A. An experimental study on burr formation in micro milling aluminum and copper, **Transactions of NAMRI/SME**, v. 30, p. 1–8, 2002.

- LEE, K.; DORNFELD, D. A. **Micro-burr formation and minimization through process control.** Precision Engineering. v. 29. p. 246-252. Elsevier, 2005.
- LEKKALA, R.; BAJPAI, V.; SINGH, K. R.; JOSHI, S. S. Characterization and modelling of burr formation in micro-end milling. **Precision Engineering.** v. 35, p. 625– 637, 2011.
- MACHADO, A.R.; COELHO, R.T.; ABRÃO, A.M.; DA SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**, Edgard Blücher, São Paulo, 2011.
- MACHADO, A.R. ET AL. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** 1 ed. São Paulo. Edgard Blücher. 2009. 371 pág.
- MANERA, R.S. **Usinabilidade e integridade superficial de implantes dentários**, 2014. 65 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2014.
- NG, C. K.; MELKOTE, S. N.; RAHMAN, M.; KUMAR, A.S. Experimental study of micro and nano-scale cutting of aluminium 7075-T6, **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, v. 46, p. 929- 936, 2006.
- OLVERA, O.; BARROW, G. An experimental study of burr formation in square shoulder face milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v. 36, n. 9, p. 1005-1020, 1996.
- ÖZEL, T.; LIU, X.; DHANORKER, A. **Modelling and simulation in micro-milling process.** 4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, Cesme, TURKEY. 2005.
- SON, S. M., LIM, H. S., AHN, J. H. **Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting.** International Journal of Machine Tools & Manufacture. v. 45. p. 529-535. Elsevier, 2005.
- VELASCO, E; GUIL, L.M; JIMENEZ, A; ORTIZ, I; MUÑOZ, J.M; MARQUEZ, E.N; PEGUEROLES, M; PEREZ, R.A; GIL, F.J. Importance of the surface roughness and residual stress of dental implants on fatigue osseointegration behaviour in rabbits. **Journal of Oral Implantology.** Ano 2016.

WAN, Y; WANG, T; WANG, Z; JIN, Y; LIU, Z. **Construction and characterization of micro nano-topography on titanium alloy formed by micro-milling and anodic oxidation.** Int J adv Manuf Technol, 2017.

ZEILMANN, R.P. **Furação da liga de titânio Ti6Al4V com mínimas quantidades de fluido de corte,** 2003. 210f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.