

LUCAS BARBOSA QUEIROZ

**DESGASTE DA FERRAMENTA E INTEGRIDADE
SUPERFICIAL NO MICROFRESAMENTO DA LIGA DE
TITÂNIO Ti-6Al-4V**



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

2019

LUCAS BARBOSA QUEIROZ

**DESGASTE DA FERRAMENTA E INTEGRIDADE
SUPERFICIAL NO MICROFRESAMENTO DA LIGA DE
TITÂNIO Ti-6Al-4V**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências para
conclusão do curso de graduação em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva.

UBERLÂNDIA-MG

2019

LUCAS BARBOSA QUEIROZ

**DESGASTE DA FERRAMENTA E INTEGRIDADE
SUPERFICIAL NO MICROFRESAMENTO DA LIGA DE
TITÂNIO Ti-6Al-4V**

Trabalho de conclusão de curso
APROVADO pela Faculdade de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Usinagem

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva – FEMEC – UFU - Orientador

Dr. Maksym Ziberov – FEMEC – UFU – Co-orientador

Msc. Déborah de Oliveira – FEMEC – UFU

UBERLÂNDIA – MG

2019

*“Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos.”*

Provérbios 16:3

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as oportunidades que me proporcionou, me dando força e determinação.

Aos meus pais, Nivaldo e Elizene, minha eterna gratidão por me ensinarem que o sucesso é apenas uma consequência do trabalho duro. Agradeço também por se sacrificarem e não medirem esforços para que eu tivesse essa grande oportunidade. Sem vocês nada disto seria possível.

À minha noiva, Bianca, meus sinceros agradecimentos por todo cuidado e apoio. Sem ela ao meu lado, jamais seria capaz de superar os grandes desafios aos quais enfrentei.

À toda minha família, em especial meu irmão Danilo e minha avó Maura, por acreditarem em mim e estarem sempre me incentivando.

Ao professor Dr. Marcio Bacci, meu orientador não só deste trabalho, mas de muitos outros projetos, meu agradecimento especial por todo conhecimento, conselhos e sabedoria compartilhados comigo. Guardarei seus ensinamentos para toda a vida.

Ao meu co-orientador, Dr. Maksym Ziberov, por todos ensinados e o grande auxílio dado na execução deste projeto.

A todos meus amigos que estiveram ao meu lado nesta jornada, compartilhando diversos momentos. Graças ao companheirismo de todos, consegui vencer mais esta etapa.

Agradeço à instituição Universidade Federal de Uberlândia, em especial a todo o corpo de técnicos e docentes da Faculdade de Engenharia Mecânica, por sempre prezarem pelo ensino, proporcionando crescimento profissional e pessoal dos alunos.

QUEIROZ, L. B. **Desgaste da Ferramenta e Integridade Superficial no Microfresamento da Liga de Titânio Ti-6Al-4V**. 2019, 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia – MG.

Resumo

Dentre os diversos processos de fabricação, a microusinagem é um dos mais precisos, permitindo a fabricação de peças extremamente pequenas e úteis para o mercado atual, principalmente para aqueles setores que exigem artefatos de pequenas dimensões e baixo peso, além de taxas de falhas baixíssimas. Mesmo que ainda careça de melhorias, a microusinagem é capaz de processar diversas variedades de metais e suas ligas, compósitos, polímeros e cerâmicas. Também, através deste processo, é possível obter dimensões exatas e tolerâncias estreitas. Sendo assim, este trabalho tem como principal objetivo avaliar a influência da velocidade de avanço na vida da ferramenta e na integridade superficial da liga de titânio Ti-6Al-4V no processo de microfresamento utilizando ferramentas de metal duro de diâmetro 254 µm sem revestimento. Dos parâmetros de corte, apenas a velocidade de avanço foi variada, os demais foram mantidos constantes para todos os experimentos. A integridade superficial foi avaliada através da formação de rebarbas, sendo que foi medido a altura das rebarbas formadas durante o microfresamento, além disto foi feita uma análise da superfície usinada no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Já o desgaste das ferramentas foi avaliado através de imagens feitas no MEV, sendo realizada uma análise qualitativa, comparando as fresas antes e depois do procedimento, bem como comparando entre as diferentes condições de corte. Observou-se que ao aumentar a velocidade de avanço as rebarbas formadas no canal usinado se tornam menores, porém o desgaste da ferramenta aumenta, influenciando a vida útil. Além disso, notou-se que o lado do canal formado pelo fresamento concordante apresentou melhor qualidade.

Palavras chave: Microusinagem, Microfresamento, Ti-6Al-4V, Integridade Superficial, Desgaste de ferramenta

QUEIROZ, L. B. **Tool Wear and Surface Integrity on Micro-milling operation of Ti-6Al-4V Titanium Alloy**. 2019, 47 p. Monograph, Federal University of Uberlandia – MG.

Abstract

Among the manufacturing processes, micro-machining is one of the most precise, allowing the manufacture of extremely small and useful parts for the current market, especially for those sectors that require small and low weight artifacts, as well as very low failure rates. Even though it still needs improvement, micro-machining is capable of processing several varieties of metals and their alloys, composites, polymers and ceramics. Also, through this process, it is possible to obtain exact dimensions and narrow tolerances. Thus, this work has as main objective to evaluate the influence of the feed rate on tool life and surface integrity when micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy using 254 μm uncoated carbide tools. The feed rate was the only parameter evaluated, the others were kept constant for all the experiments. The surface integrity was evaluated by the formation of burrs. The height of the burrs formed during the micro-milling was measured. In addition, an analysis of the machined surface was carried out in the scanning electron microscope (SEM). The wear of the tools was evaluated through SEM images, and a qualitative analysis was carried out, comparing the tools before and after the machining, as well as comparing the tools for all the cutting conditions used. It has been observed that the burrs are smaller when the feed rate increases, but the wear of the tool increases, affecting useful life. In addition, it was noticed that the burrs formed at the down-milling side were shorter than the burr at the up-milling side of the slots.

Keywords: Micro machining, Micro milling, Ti-6Al-4V, Surface Integrity, Tool Wear

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1 – a) Microcomponente polimérico; b) Micro fresa; c) Microcomponente metálico. (Microlution, 2016).	2
Figura 2.1.1 – Precisão do processo de microusinagem (Adaptado de CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).	4
Figura 2.1.2 – Comparação entre o raio da aresta de corte na usinagem convencional e na microusinagem (Adaptado de CHENG; HUO, 2013).	5
Figura 2.2.1 – (a) Pinça metálica da MEMS Precision Instruments; (b) Micromolde fabricado pela MiniFAB (MOUGO, 2016).	6
Figura 2.2.2 – Principais aspectos a serem considerados no microfresamento. (PICARELLI, 2015).	7
Figura 2.3.1 – Comparação entre fresa tradicional de 6 mm (esquerda) e microfresa de 200 μm (direita). (PICARELLI, 2015).	8
Figura 2.4.1 – Tipos de desgaste possíveis em uma ferramenta de corte (MARKUS, 2001).	9
Figura 2.4.1 – Mecanismos de desgaste possíveis em uma ferramenta de corte (Machado et al., 2011).	10
Figura 2.6.1 - Comparativo entre propriedades mecânicas de ligas de titânio, liga de alumínio, aços inoxidáveis e titânio puro. (FROES, 2015).	13
Figura 3.1.1 – Ferramentas utilizada para realização de testes. (A) “Tool 58”, (B) “Tool 60”, (C) “Tool 61” (Ampliação de 800x).	15
Figura 3.2.1 – Dimensões da amostra utilizadas nos testes.	15
Figura 3.3.1 - CNC Mini-mill/GX <i>Minitech Machinery Corporation</i> ®.	16
Figura 3.3.2 – Fixação da amostra.	17
Figura 3.3.3 – Microscópio para referenciar ferramenta.	17

Figura 3.4.1 - Perfilômetro modelo Form Talysurf Intra fabricado pela companhia <i>Taylor Hobson®</i>	18
Figura 3.4.2 - Processo de medição de rebarbas.	19
Figura 3.4.3 – Representação esquemática das rebarbas formadas.	19
Figura 4.1.1 – A) Ferramenta Tool 58 (4mm/min como velocidade de avanço) após de 10 canais usinados (4 mm cada). B) Ferramenta Tool 61 (24mm/min como velocidade de avanço) após 10 canais usinados (4 mm cada). Aumento de 1000 vezes.	21
Figura 4.1.2 – A) Ferramenta Tool 58 (4mm/min como velocidade de avanço) após de 20 canais usinados (4 mm cada). B) Ferramenta Tool 61 (24mm/min como velocidade de avanço) após de 20 canais usinados (4 mm cada). Aumento de 1000 vezes.	22
Figura 4.2.1 – Gráfico da Altura Média da Rebarba em função da Distância Usinada tanto para o fresamento concordante quanto o discordante.	25
Figura 4.2.2 – Primeiro canal usinado para cada uma das velocidades de avanço de. (A) “Tool 58” – 4 mm/min, (B) “Tool 60” – 14,4 mm/min e (C) “Tool 60” – 24 mm/min. Aumento de 600 vezes.	26
Figura 4.2.3 – Gráfico das médias das alturas das rebarbas no fresamento discordante e concordante em função da distância usinada para a Entrada, Meio e Saída dos canais.	27
Figura 4.2.4 – Terceiro canal para velocidade de avanço de 4 mm/min (Tool 58). (A) Entrada, (B) Meio e (C) Saída. (Aumento de 600x).	28
Figura 4.2.5 – Quarto canal para velocidade de avanço de 24 mm/min (Tool 60). (A) Entrada, (B) Meio e (C) Saída. (Aumento de 600x).	28
Figura 4.2.6 – Terceiro canal para velocidade de avanço de 14,4 mm/min (Tool 61). (A) Entrada, (B) Meio e (C) Saída. (Aumento de 600x).	29
Figura 4.2.7 – Comparação entre o 13° (A) e 14° (B) passes da microfresa “Tool 58”. É nítido a redução do tamanho das rebarbas (Aumento de 600x).	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.3.1 – Parâmetros de Corte Utilizados nos Ensaios.....	18
Tabela 4.2.1 – Alturas de rebarba (h) para os ensaios realizados com a ferramenta “Tool 58” antes da quebra da aresta.....	23
Tabela 4.2.2 – Alturas de rebarba (h) para os ensaios realizados com a ferramenta “Tool 58” após a quebra da aresta.....	23
Tabela 4.2.3 – Alturas de rebarba (h) para os ensaios realizados com a ferramenta “Tool 60” antes da quebra da aresta.....	24
Tabela 4.2.4 – Alturas de rebarba (h) para os ensaios realizados com a ferramenta “Tool 61”	24

LISTA DE SÍMBOLOS

\emptyset	Diâmetro
n	Rotação
v_c	Velocidade de Corte
a_p	Profundidade de Corte
f_z	Avanço por Dente
v_a	Velocidade de Avanço
Z	Número de Dentes da Fresa
h	Altura das rebarbas

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo Geral	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica	3
2.1. Microusinagem	3
2.2. Microfresamento	5
2.3. Ferramenta de Corte	7
2.4. Desgaste da Ferramenta	9
2.5. Integridade Superficial	10
2.5.1. Rugosidade	11
2.5.2. Formação de Rebarbas	11
2.6. Ligas de Titânio	12
CAPÍTULO III – Metodologia	14
3.1. Ferramentas Utilizadas	14
3.2. Corpo de Prova	15
3.3. Execução dos Testes	16
3.4. Análise da Integridade Superficial	18
CAPÍTULO IV – Resultados e Discussões	20
4.1. Desgaste das Ferramentas	20
4.2. Integridade Superficial	23
CAPÍTULO V – Conclusões	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

CAPÍTULO I

Introdução

1.1. Contextualização

Os processos de fabricação mecânica vêm avançando rapidamente ao longo dos últimos anos, impactando consideravelmente o desenvolvimento de novos materiais, processos e produtos. Com o passar do tempo, este mercado foi se tornando mais competitivo, os processos de fabricação existentes não eram mais suficientes para atender a demanda. Fazia-se necessário a elaboração de novas tecnologias.

A necessidade de novos produtos, como dispositivos eletrônicos, sensores de monitoramento, componentes biomédicos e automobilísticos vêm incentivando o crescimento da fabricação de produtos miniaturizados. No campo da eletrônica, por exemplo, há dispositivos cada vez menores, como os processadores atuais, com dimensões bastante reduzidas. Já a área médica também tem exigido instrumentos cada vez mais compactos, que permitam maior precisão nos procedimentos sem tantos danos e incômodos ao paciente. Devido a esta crescente demanda, o processo de microusinagem mecânica, apesar de novo, está se tornando uma importante tecnologia de fabricação (WOON *et al.*, 2008).

Microcomponentes requerem tolerâncias muito estreitas, e ambos os requisitos funcionais e estruturais exigem o uso de vários materiais de engenharia, incluindo aços inoxidáveis, titânio, latão, alumínio, platina, irídio, plásticos, cerâmicas e compósitos (LIU *et al.* 2004). Esta vasta gama de materiais permite que diferentes

componentes com dimensões na ordem de micrometros sejam fabricados, conforme os exemplos que são mostrados na Fig. 1.1.

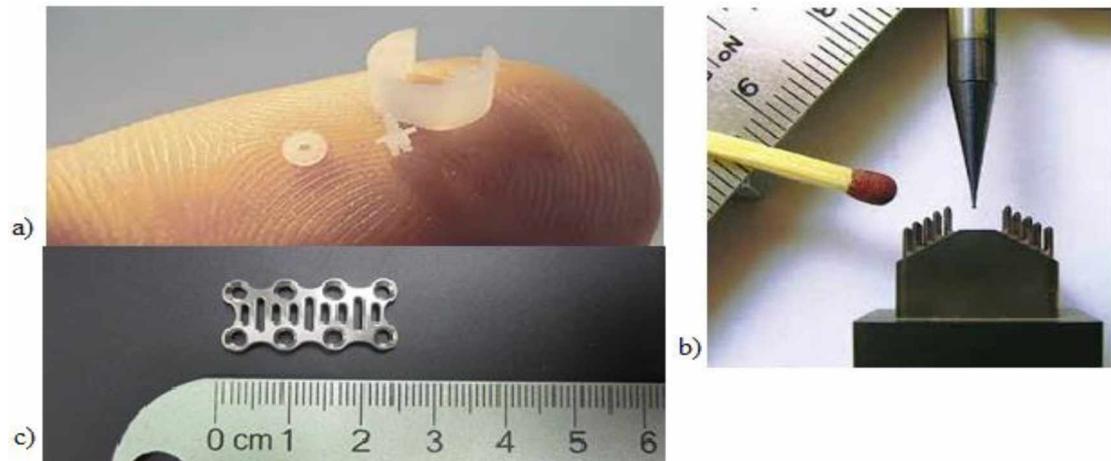


Figura 1.1.1 – a) Microcomponente polimérico; b) Micro fresa; c) Microcomponente metálico.
(Microlution, 2016).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é estudar a influência da variação do avanço no processo de microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando microfresas de metal duro.

1.2.2. Objetivos Específicos

Mais especificamente, os objetivos são:

- Avaliar a integridade superficial através da formação de rebarbas e análise da superfície usinada no microscópio eletrônico de varredura (MEV);
- Avaliar o desgaste da ferramenta através da comparação qualitativa de fotos tiradas antes e depois da usinagem.

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

2.1. Microusinagem

Segundo Brinksmeier, Riemer e Stern (2002), a usinagem de precisão pode ser dividida em dois tipos de tecnologias: tecnologias de microssistemas (Microsystem Technologies - MST) e tecnologias de microengenharia (Micro-engineering Technologies – MET).

Tecnologias de microssistemas são qualificadas para produção de sistemas microeletromecânicos e sistemas micro-ótico-mecânicos, enquanto as tecnologias de microengenharia englobam as produções de componentes, moldes e superfícies microestruturais, todos estes com alta precisão. São utilizados processos de torneamento, fresamento e retificação de precisão, sendo a microusinagem integrante desta última classificação (PICARELLI, 2015).

A microusinagem pode ser entendida como uma tecnologia de remoção de material para fabricação da forma final de um produto, derivado da redução de escala do processo tradicional de usinagem (CUNHA, 2016). Dentre os mais diversos processos de fabricação, ela é um dos mais precisos, permitindo a fabricação de peças extremamente pequenas e úteis para o mercado, principalmente onde se exige artefatos pequenos e taxas de falhas baixíssimas. Na Figura 2.1.1, é possível comparar o grau de precisão dos diferentes níveis dimensionais da usinagem.

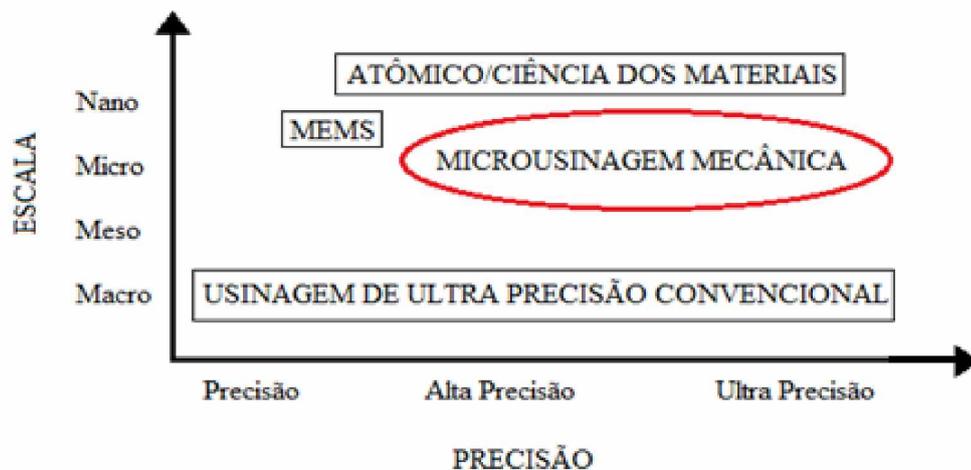


Figura 2.1.1 – Precisão do processo de microusinagem (Adaptado de CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Formalmente, é possível definir a microusinagem como um processo de fabricação onde o tamanho da ferramenta de corte é da ordem de micrometros (1 μm a 999 μm), por isto o prefixo “micro” (MASUZAWA, 2000). Há também restrições neste processo de fabricação, originadas pela miniaturização da ferramenta de corte, peça de trabalho e do processo global (BERESTOVSKIY; HUNG, 2013).

O processo de microusinagem é semelhante ao processo de usinagem convencional no que diz respeito à cinemática e às características gerais do processo. Por isso, suas similaridades permitem a aplicação, mesmo que restrita, do conhecimento adquirido na escala macro para a escala micro. Todavia, com miniaturização da ferramenta, peça e do processo como um todo, ocorre também o que é denominado de efeito escala (SIMONEAU; NG; ELBESTAWI, 2006). Com a redução considerável das dimensões envolvidas no processo (principalmente o avanço), surgem diferenças entre os mecanismos de corte fundamentais dos processos de usinagem convencional e da microusinagem (ARAMCHAROEN; MANTIVENGA; 2009).

Devido ao tamanho da ferramenta de corte, ela não pode ser considerada perfeitamente afiada, pois o raio da cunha cortante é relativamente grande, o que faz com que em alguns casos, espessura de corte adotado seja menor que o raio. Além disso, o raio da cunha cortante da ferramenta de microusinagem tem normalmente

um valor comparável ao avanço e ao tamanho de grão do material da peça a ser usinada (CÂMARA *et al.*, 2012). Esta situação é ilustrada na Figura 2.1.2, que compara a microusinagem a um corte ortogonal convencional. Estas são apenas algumas das razões que levam à microusinagem ter grandes diferenças em relação à usinagem convencional em termos de ação da cunha cortante.

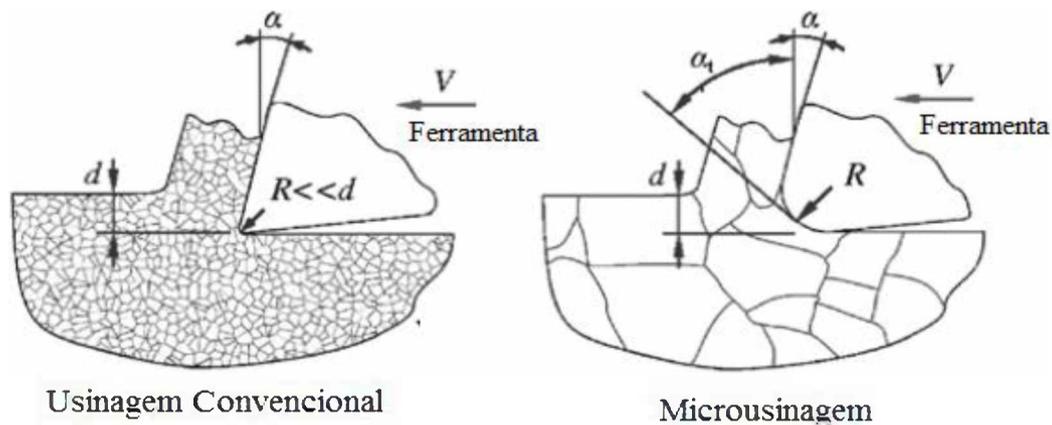


Figura 2.1.2 – Comparação entre o raio da aresta de corte na usinagem convencional e na microusinagem (Adaptado de CHENG; HUO, 2013).

2.2. Microfresamento

Segundo Ferraresi, Ruffino e Pallerosi (1974), o fresamento é a operação de usinagem com formação de cavaco que se caracteriza por: a ferramenta multicortante, dita fresa, é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente ao redor de um eixo, que possui movimento de rotação ao redor de seu eixo, permitindo assim que cada uma das arestas cortantes (ditos dentes da fresa) retire a parte de material que lhe compete. O movimento de avanço, que permite o prosseguimento da operação, é geralmente feito pela própria peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina, (raramente o movimento de avanço é feito pela própria ferramenta). O movimento de avanço obriga a peça a passar sob a ferramenta que lhe dá a forma e dimensão desejada.

Segundo Takács, Verő e Mészáros (2003), a adaptação dos processos convencionais de remoção de material para escalas micrométricas, principalmente o fresamento, é uma alternativa viável de produção, já que este apresenta uma grande

versatilidade em relação às operações de usinagem, permitindo a fabricação de uma ampla gama de micro produtos. Existem diferentes processos de microusinagem, mas o microfresamento se destaca por permitir a fabricação em diferentes geometrias e em três dimensões além de possibilitar a utilização de materiais diversos. A Figura 2.2.1 exemplifica alguns componentes miniaturizados que podem ser obtidos através do microfresamento.

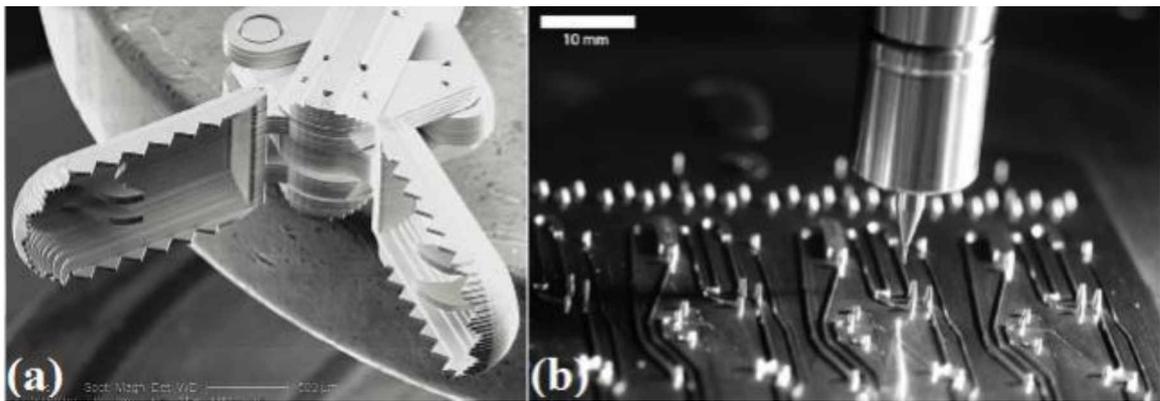


Figura 2.2.1 – (a) Pinça metálica da MEMS Precision Instruments; (b) Micromolde fabricado pela MiniFAB (MOUGO, 2016).

Esse processo apresenta grandes vantagens econômicas e também quanto à flexibilidade dos lotes que podem ser produzidos, sendo necessário o desenvolvimento de ferramentas adequadas para os materiais que se deseja usinar. (PICARELLI, 2015). Segundo Câmara et al. (2012), o microfresamento é uma solução para a fabricação de diversos tipos de componentes (podendo apresentar geometrias tridimensionais) para diversos tipos de materiais, como ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos.

Muitos aspectos devem ser levados em consideração para execução do processo de microfresamento. A Figura 2.2.2 traz um resumo destas considerações. Estes fatores devem ser analisados para que se possa entender a influência deles no resultado final da usinagem, permitindo a escolha de parâmetros otimizados.

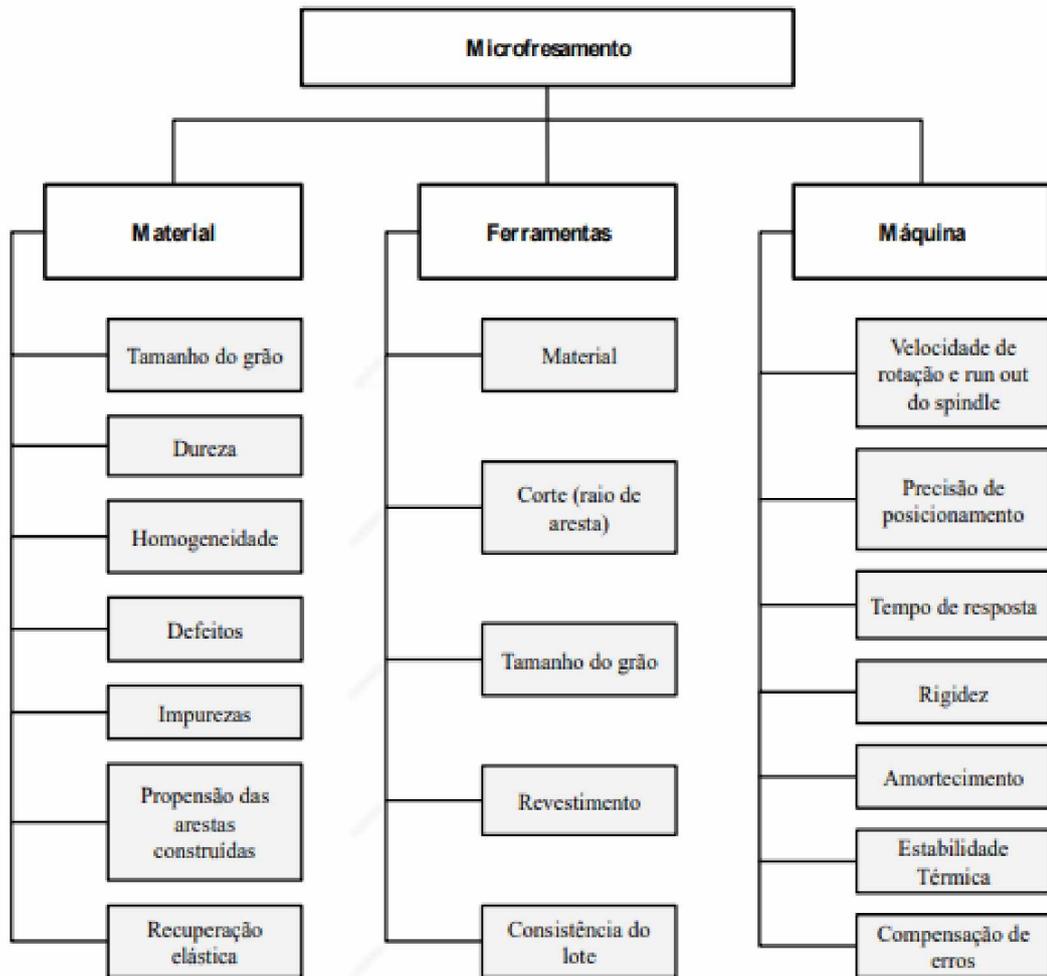


Figura 2.2.2 – Principais aspectos a serem considerados no microfresamento. (PICARELLI, 2015).

2.3. Ferramenta de Corte

As ferramentas de corte utilizadas no processo de fresamento convencional são chamadas de fresas. Já no microfresamento, elas são comumente chamadas de microfresas, pois apresentam dimensões bem menores que aquelas utilizadas nos processos convencionais, como por ser observado na Figura 2.3.1.

Segundo Fleischer et al. (2008), a concepção geométrica das microfresas foi sempre baseado na geometria das fresas convencionais, apenas reduzindo-se o tamanho, partindo da premissa que os efeitos do processo de corte no microfresamento são análogos ao processo convencional.



Figura 2.3.1 – Comparação entre fresa tradicional de 6 mm (esquerda) e microfresa de 200 μm (direita). (PICARELLI, 2015).

Estas ferramentas podem ser revestidas ou não, dependendo da aplicação desejada. Um dos mais utilizados é o revestimento de liga de titânio e nitrogênio (TiN) ou titânio com alumínio e nitrogênio (TiAlN), não sendo recomendados para fresamento de liga de titânio devido a afinidade química.

Além disto, os revestimentos apresentam outro problema nestes casos. Como os raios das ferramentas já são bastante grandes quando comparados à escala do processo, o revestimento pode aumentar ainda mais este raio, elevando as forças de corte e prejudicando a integridade superficial.

É preciso uma compreensão do processo de corte do microfresamento, para que sejam desenvolvidas abordagens tecnológicas para fabricação das ferramentas, levando-se em conta aspectos estruturais e mecânicos para sua otimização Fleischer *et. al* (2008). Recentemente houve grande avanço nas tecnologias de fabricação dessas ferramentas, proporcionando técnicas de corte em microescala com a vantagem de obterem-se uma alta taxa de remoção de material e estruturas tridimensionais complexas nas partes usinadas (EGASHIRA, 2011).

2.4. Desgaste da Ferramenta

A vida de uma ferramenta pode ser definida como o tempo que a mesma trabalha efetivamente até perder sua capacidade de corte e precisar ser trocada ou afiada. A perda da capacidade de corte geralmente é avaliada por meio de um determinado grau de desgaste. A vida da ferramenta é geralmente expressa em minutos, mas também pode ser medida como o percurso de corte ou percurso de avanço correspondente (Machado *et al.*, 2011).

Alguns fatores podem indicar a necessidade de substituição da ferramenta, como um desgaste excessivo da superfície de saída podendo levar à quebra do gume de corte, o acabamento superficial insatisfatório da peça usinada, o aumento das forças de corte que podem interferir na usinagem e no funcionamento da máquina, entre outros (PICARELLI, 2015).

Os tipos de desgastes envolvidos em qualquer processo de usinagem são: de flanco, de entalhe ou de cratera, mas ainda há outros, como apresenta a figura 2.4.1. Conhecer e determinar o desgaste permite aumentar a vida útil da ferramenta, evitando trocas desnecessárias e aumentando a economia. Em microusinagem, esta é uma área ainda pouco explorada (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

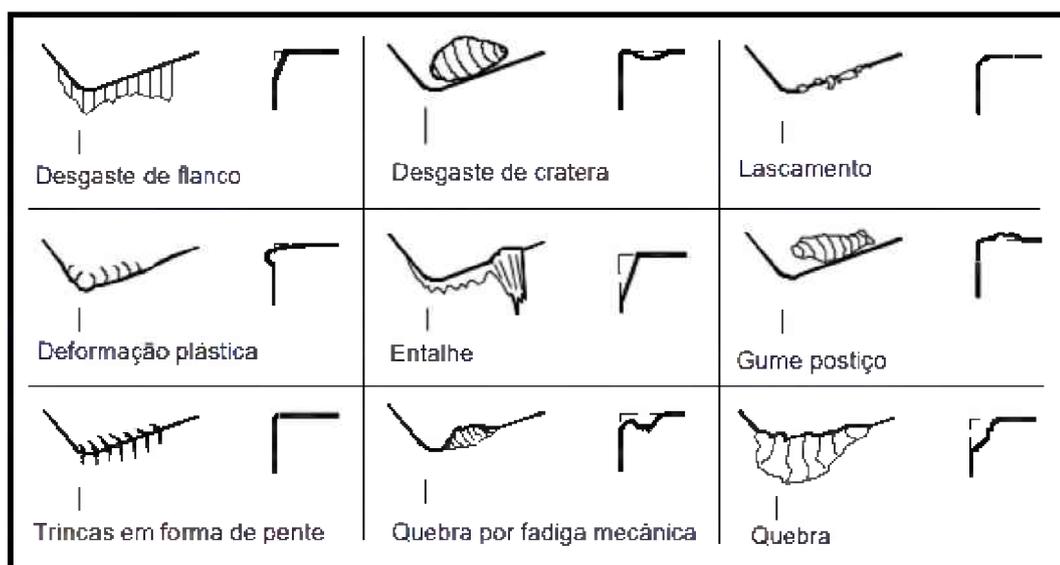


Figura 2.4.1 – Tipos de desgaste possíveis em uma ferramenta de corte convencional (MARKUS, 2001).

Além de conhecer o tipo de desgaste atuante na ferramenta, é importante também saber qual o mecanismo que está promovendo a degradação da fresa. Na usinagem, diversos pesquisadores classificam esses mecanismos de maneiras distintas. Talvez a classificação mais adequada para o trabalho seja a apresentada por Trent e Wright (2000), apresentada na figura 2.4.2.

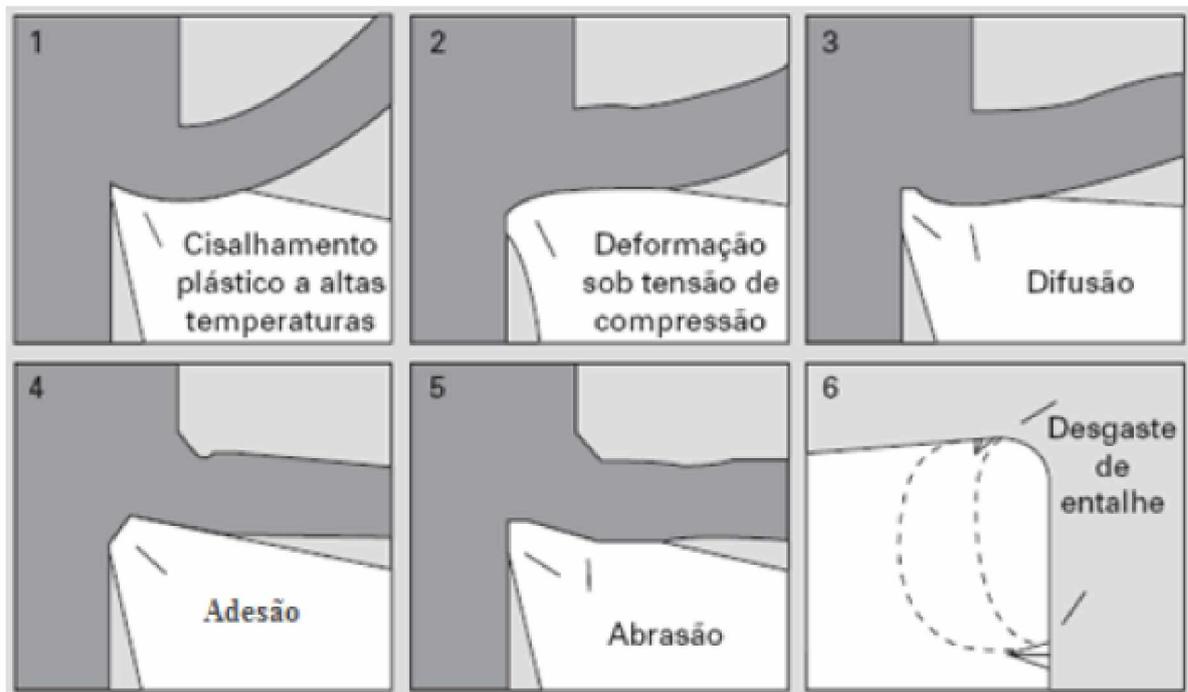


Figura 2.4.2 – Mecanismos de desgaste possíveis em uma ferramenta de corte convencional (Machado et al., 2011).

2.5. Integridade Superficial

Os novos componentes que o mercado atual exige não demandam apenas dimensões reduzidas e tolerâncias estreitas, exigindo também cada vez mais qualidade e aumento de seu desempenho funcional (JAWAHIR, 2011). Segundo Ferraresi (1974), a qualidade das superfícies das peças é caracterizada pelo acabamento obtido na usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas na região da superfície. Duas análises bastantes realizadas quando se deseja determinar a qualidade da superfície são: rugosidade e formação de rebarbas.

2.5.1. Rugosidade

A rugosidade superficial é um dos indicadores mais utilizados quando se quer qualificar uma peça, podendo influenciar consideravelmente o seu desempenho caso não atinja os valores adequados. Cada vez mais é dada mais importância à análise de rugosidade, visto que ela influencia em diversas propriedades de um determinado componente. Resistência à corrosão, ao desgaste e à fadiga de uma determinada peça, por exemplo, podem ser alterados pelo acabamento superficial.

Quando tratamos da rugosidade como parâmetro de saída, ela se dá no processo de microusinagem com valores típicos em níveis bem menores que na macrousinagem. E, em aplicações de engenharia, a rugosidade pode ser utilizada para monitoramento do processo ou da máquina-ferramenta, pois é muito afetada pela vibração por exemplo (WHITEHOUSE, 1997).

2.5.2. Formação de Rebarbas

As rebarbas, que são projeções indesejáveis de material que aparecem depois da borda da peça devido à deformação plástica durante o processo de usinagem. Nos processos convencionais são bastante prejudiciais, mas também causam problemas na montagem de micropeças visto que são proporcionalmente muito maiores se comparadas às rebarbas formadas nos processos de macrousinagem (OLVERA; BARROW, 1996).

As rebarbas geradas durante o corte são indesejadas, porém são difíceis de evitar, devido às características do processo de fresamento, onde o material sofre escoamento com o contato mecânico entre ele e a ferramenta. Esse fenômeno também está presente nas operações em microescala (JEONG, 2009). Além disto, a remoção de rebarbas nos microcomponentes é muito mais complexa. Sendo assim, o estudo e controle da formação de rebarbas na microusinagem se mostram de grande importância (LEKKALA *et al.*, 2011).

2.6. Ligas de Titânio

O titânio e suas ligas vêm se destacando comercial e industrialmente devido a suas excelentes propriedades, tais como elevada razão resistência mecânica/peso, boa resistência mecânica em temperaturas elevadas e excepcional resistência à corrosão. As principais aplicações destas ligas são nas indústrias aeroespacial e biomédica, em ambientes extremamente corrosivos e para a produção de equipamentos industriais avançados utilizados para a geração de energia e transporte.

Segundo o site Infomet (2018), o titânio e suas ligas apresentam propriedades interessantes: baixa densidade (massa específica da ordem de $4,5 \text{ g/cm}^3$), boa resistência mecânica à tração (entre 200 e 1370 MPa, comparável à de muitos aços ligados), excelente resistência à corrosão (garantida pela formação de uma camada passivada de TiO_2) e relativa abundância na natureza (é o nono metal mais abundante), geralmente sob a forma de minerais oxidados. O ponto de fusão do titânio puro é $1724 \text{ }^\circ\text{C}$, portanto superior ao do ferro (cerca de $1520 \text{ }^\circ\text{C}$) e muito superior ao do alumínio ($660 \text{ }^\circ\text{C}$). Sua condutividade térmica é baixa, pois corresponde a apenas 93 % da condutividade térmica do aço inoxidável e a 12,5 % da condutividade térmica do alumínio. O titânio também apresenta baixo coeficiente de expansão térmica linear, da ordem de 64 % do coeficiente de expansão térmica linear do aço e 39 % do alumínio. Do mesmo modo, o titânio não é um bom condutor de energia elétrica, pois sua condutividade elétrica é da ordem de 3,1 % da condutividade elétrica do cobre, enquanto no aço esse valor chega a 3,5 % e no alumínio 30 %. O titânio é levemente paramagnético, assim como outros metais de transição, ou seja, não é ferromagnético como o ferro-alfa (cúbico de corpo centrado).

De acordo com Fernandes e Martendal (2018), as ligas de titânio são difíceis de produzir, o que as tornam caras. A fusão deste material, por exemplo, deve ser feita em um recipiente especial para evitar contaminação. Outra dificuldade que pode ser mencionada é no processo de usinagem destes materiais. Além de possuírem um baixo módulo de elasticidade, o titânio e suas ligas têm baixa condutividade térmica, assim tendem a provocar um aumento significativo da

temperatura na interface com a ferramenta durante a usinagem, aumentando o desgaste da mesma. Além disso, a elevada reatividade química mencionada anteriormente faz com que reajam com quase todos os materiais utilizados como ferramentas.

Diante de todas estas características, o titânio e suas ligas são bastante utilizados pois além de uma elevada resistência à corrosão, apresenta uma combinação importantíssima de propriedades: resistência mecânica e baixa densidade. Ainda que não seja tão leve quanto o alumínio ou tão resistente quanto os aços, o titânio ganha destes dois materiais quando se trata de relação resistência mecânica/peso, como é possível ver na Figura 2.6.1.

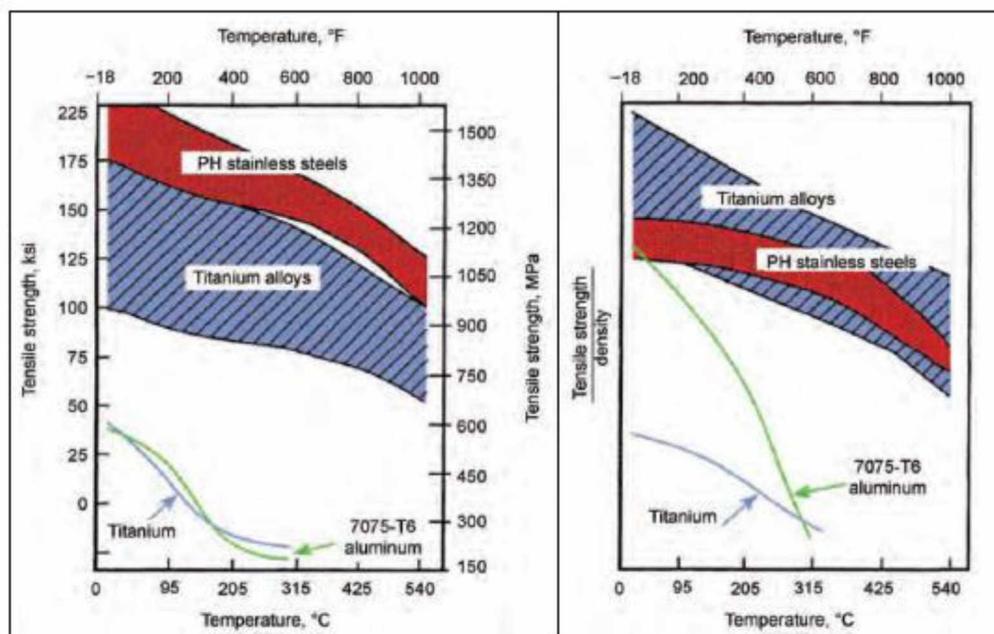


Figura 2.6.1 - Comparativo entre propriedades mecânicas de ligas de titânio, liga de alumínio, aços inoxidáveis e titânio puro. (FROES, 2015).

Em aplicações como biomaterial, o titânio e a liga Ti-6Al-4V têm sido usados desde 1960, com Ti-6Al-4V gradualmente substituindo o titânio comercialmente puro devido à resistência mecânica superior. A temperatura ambiente, o titânio tem estrutura hexagonal representada como fase α . Essa estrutura transforma-se em cúbica de corpo centrado, fase β a aproximadamente 883°C (COUTO, 2006).

CAPÍTULO III

Metodologia

3.1. Ferramentas Utilizadas

Durante a realização dos ensaios foram utilizadas três microfresas de metal duro de 254 μm (0,01”) de diâmetro (\emptyset), com dois dentes cada (ou seja, Z igual a 2) do fabricante *Performance MicroTools®* e sem revestimento.

Antes de realizar qualquer procedimento com as ferramentas, elas foram limpas no ultrassom com acetona e depois levadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura modelo HITACHI TM3000 do fabricante *Hitachi High-Technologies Corporation®* e foram tiradas fotos para verificar a integridade de cada uma e para análises posteriores.

As Figuras 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3 apresentam as ferramentas utilizadas nos testes. Elas foram nomeadas de “Tool 58”, “Tool 60” e “Tool 61”. Foram obtidas imagens do topo de cada uma das ferramentas, bem como cada aresta de corte. As fotos tiradas inicialmente servirão para comparação após o fim do processo. É de extrema importância garantir uma boa qualidade das imagens, pois, devido ao tamanho das ferramentas, elas são as únicas formas de análise após o processo de fabricação ser concluído. Importante ressaltar que as manchas nas ferramentas não são defeitos, apenas sujeira residual após a limpeza.

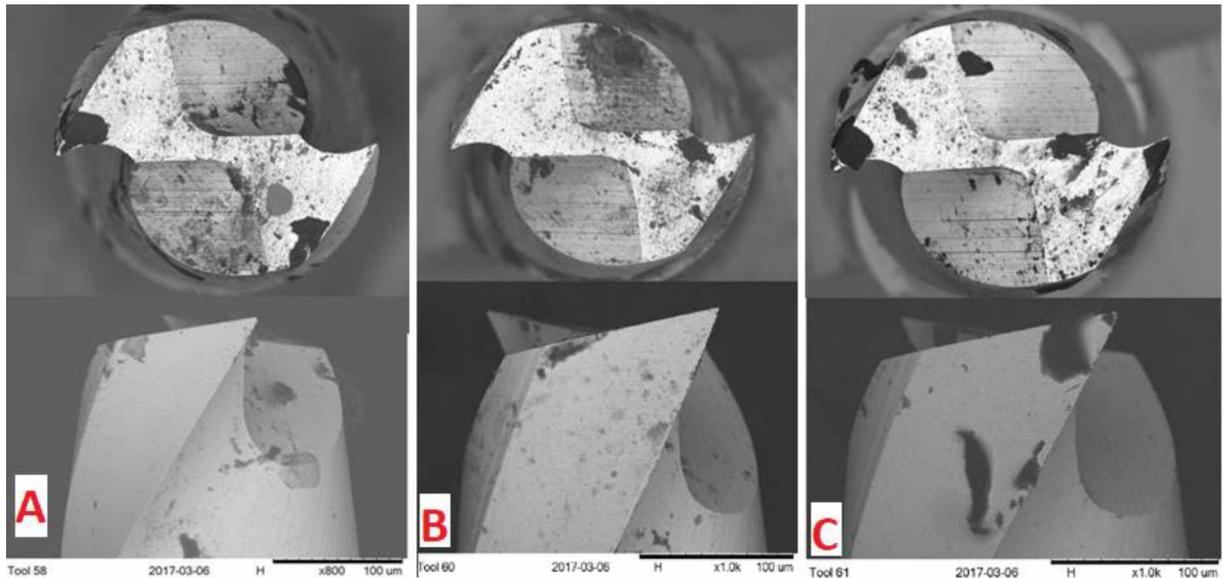


Figura 3.1.1 – Ferramentas utilizadas para realização de testes. (A) “Tool 58”, (B) “Tool 60”, (C) “Tool 61” (Ampliação de 800x).

3.2. Corpo de Prova

Já em relação ao corpo de prova foi utilizado uma amostra de liga de titânio (Ti_6Al_4V) com as dimensões conforme a Figura 3.2.1:

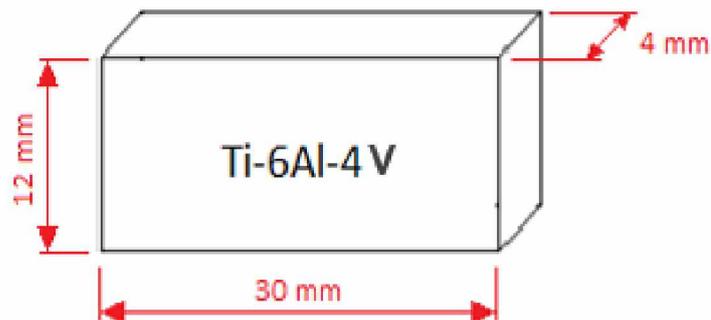


Figura 3.2.1 – Dimensões da amostra utilizadas nos testes.

A preparação da amostra se deu da seguinte maneira: primeiro ela foi cortada na serra fita de bancada horizontal, com a utilização de fluido de corte. Em seguida ela presa em uma Mini Morsa de Precisão tipo VMV e foi fresada no centro de usinagem do fabricante Romi, modelo Discovery 560, com rotação de 7500 rpm. Foi

realizado fresamento de topo com fresa de metal duro e profundidade de corte inicial de 50 μm . O processo foi sendo repetido até que a superfície ficou totalmente plana e uniforme.

Após o fresamento e com a amostra ainda fixada na morsa, as rebarbas foram removidas manualmente com o auxílio de uma lima. Este procedimento é de extrema importância para evitar que a ferramenta quebre ao entrar em contato com a peça. Foi tomado cuidado também para que a superfície preparada não sofresse danos.

3.3. Execução dos Testes

Depois de realizados todos os preparativos, a morsa foi enfim fixada na base da Máquina CNC Mini-mill/GX (Figura 3.3.1) do fabricante *Minitech Machinery Corporation*® com 4 eixos (rotação máxima de 60000 rpm e resolução de 1 μm).



Figura 3.3.1 - CNC Mini-mill/GX *Minitech Machinery Corporation*®.

Contudo, foi necessário fazer uma adaptação, visto que a morsa é de fixação magnética e a base da máquina permite apenas fixação com rosca. Para isto foram

fabricadas duas chapas com ranhuras e utilizados quatro parafusos com porcas, resultando em dois grampos (Figura 3.3.2).

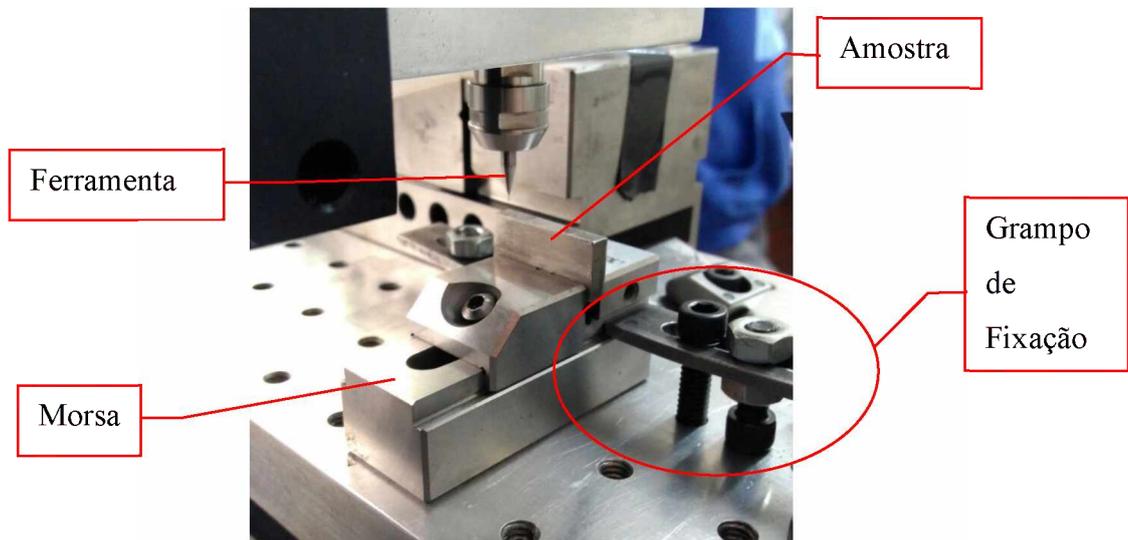


Figura 3.3.2 – Fixação da amostra.

Para realizar o micro fresamento é necessário referenciar a ferramenta, contudo em microusinagem o referenciamento é mais complexo e exige o auxílio de um microscópio USB, como mostra a Figura 3.3.3.



Figura 3.3.3 – Microscópio para referenciar ferramenta.

O espaçamento adotado entre os canais de foi de $250 \mu\text{m}$. Os parâmetros de corte utilizados estão na Tabela 3.3.1. Foram realizadas paradas assim que a formação de rebarbas maiores foram notadas. A cada parada as ferramentas eram levadas ao MEV para novas imagens.

Tabela 3.3.1 – Parâmetros de Corte Utilizados nos Ensaios

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Tool 58	Tool 60	Tool61
Rotação	N	rpm	12000	12000	12000
Velocidade de Corte	v_c	m/min	9,42	9,42	9,42
Profundidade de Corte	a_p	μm	10,00	10,00	10,00
Avanço por dente	f_z	$\mu\text{m}/\text{dente}$	0,167	0,600	1,000
Velocidade de avanço	v_a	mm/min	4,00	14,40	24,00

3.4. Análise da Integridade Superficial

Ao terminar todos os testes, a peça foi levada ao perfilômetro modelo Form Talysurf Intra (Figura 3.4.1) do fabricante *Taylor Hobson*® (com resolução 16 nm com $1,0 \text{ mm}$ de campo ou 3 nm com $0,2 \text{ mm}$ de campo), para medição de rebarba (Figura 3.4.2). Foram feitas três medições das alturas de rebarba e em seguida foram tiradas fotos da superfície usinada no MEV.

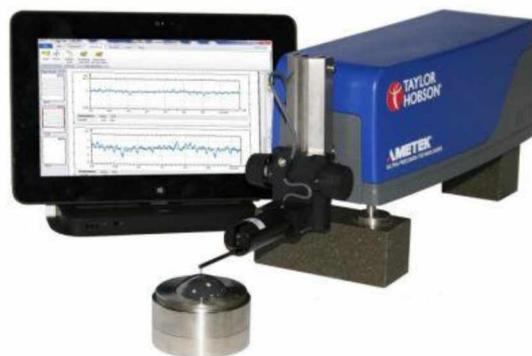


Figura 3.4.1 - Perfilômetro modelo Form Talysurf Intra fabricado pela companhia *Taylor Hobson*®.

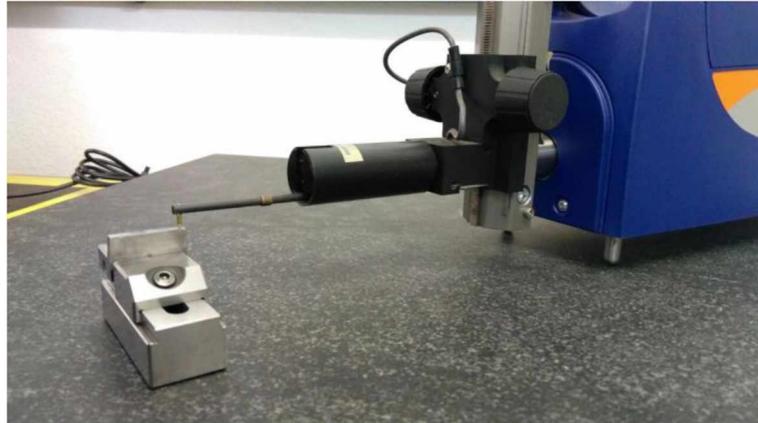


Figura 3.4.2 - Processo de medição de rebarbas.

Durante a medição da altura das rebarbas, foram coletadas as medidas tanto das rebarbas formadas durante o fresamento concordante quanto durante o discordante, conforme mostra a Figura 3.4.3.

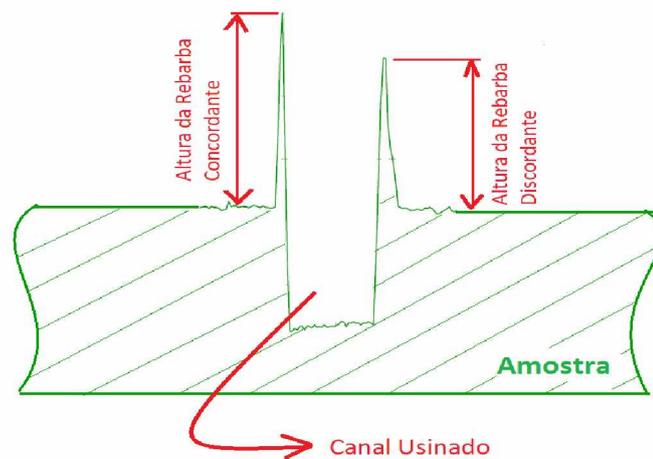


Figura 3.4.3 – Representação esquemática das rebarbas formadas.

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussões

Com a realização de todos os procedimentos, foram obtidos resultados sobre as ferramentas utilizadas (através de fotos) e sobre a superfície usinada (através de fotos e medição de rebarbas).

4.1. Desgaste das Ferramentas

As fotos das ferramentas permitem avaliar quais condições de corte foram mais severas e promovem um desgaste maior da ferramenta. Esta comparação foi feita entre os processos que usaram 4 mm/min (Tool 58) e 24 mm/min (Tool 61) como velocidade de avanço após realizarem 10 canais, ou seja, 40 mm usinados. Portanto, a ferramenta que apresenta melhor condição final indica quais parâmetros colaboram para uma maior vida da microfresa.

Um ponto importante a ser destacado é que a fresa utilizada nos ensaios com v_a igual a 14,4 mm/min ("Tool 60") falhou antes de completar 40 mm usinados, sendo assim não foi possível fazer esta observação, impossibilitando a comparação com as demais ferramentas. Os resultados destas análises podem ser observados na Figura 4.1.1 a seguir.

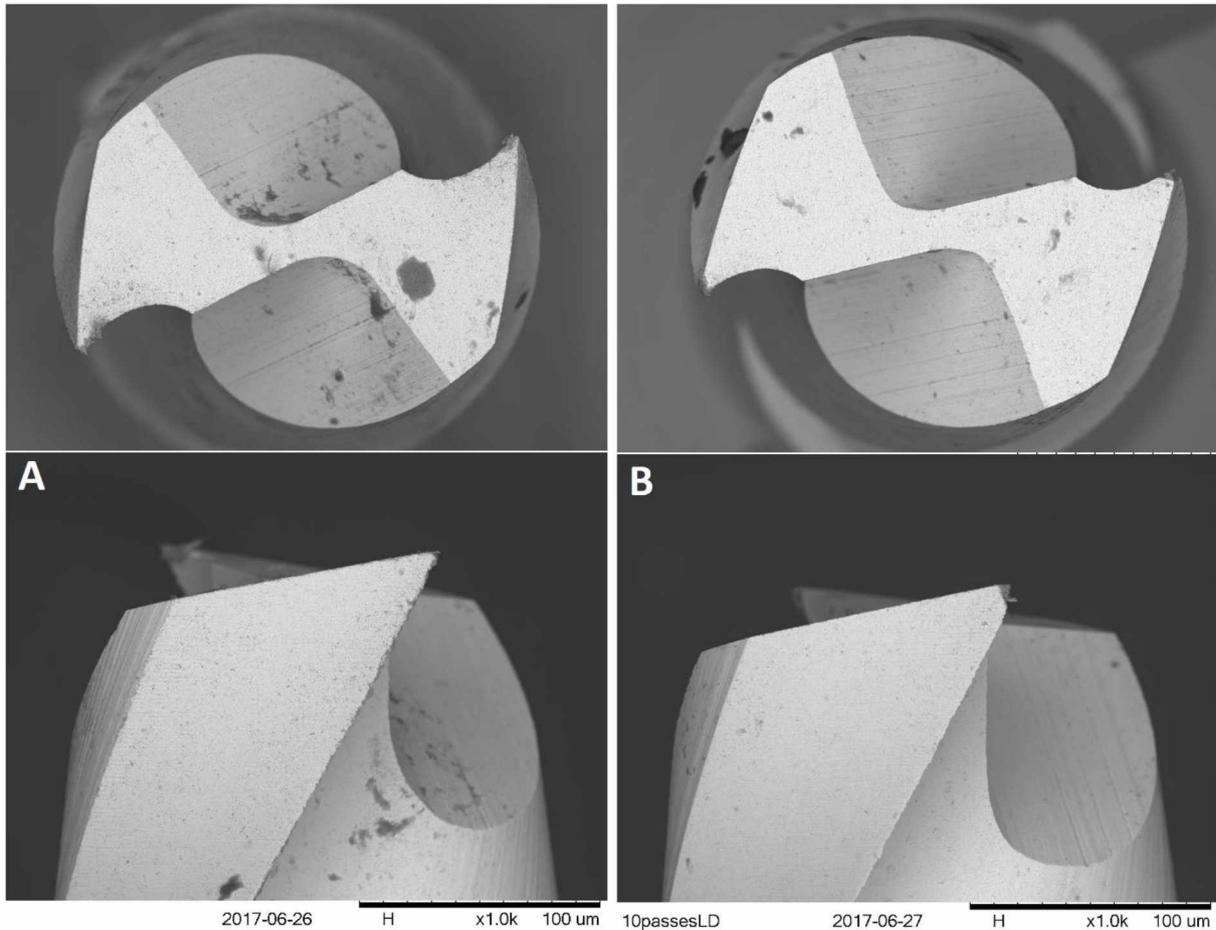


Figura 4.1.1 – A) Ferramenta Tool 58 (4mm/min como velocidade de avanço) após de 10 canais usinados (4 mm cada). B) Ferramenta Tool 61 (24mm/min como velocidade de avanço) após 10 canais usinados (4 mm cada). Aumento de 1000 vezes.

Através da Figura 4.1.1 é possível perceber que após 40 mm usinados com as ferramentas mostradas, a ferramenta “Tool 58” apresentou um desgaste menor, sendo o tipo predominante, em ambos os casos, o desgaste de flanco, ocorrendo principalmente por adesão devido as altas temperaturas. Isto pode ser comprovado por uma integridade maior da aresta de corte. É importante ressaltar que ambos os testes foram feitos sobre as mesmas condições e as fotografias também foram feitas de maneira idêntica.

Segundo Machado et. al (2009), os custos gerados por um processo podem ser reduzidos aumentando as variáveis de velocidade de corte da ferramenta e/ou a velocidade de avanço, porém existem limites para estes aumentos, pois a partir de certo ponto tem-se uma redução drástica da vida útil da ferramenta. Desta forma, é

possível comprovar que a velocidade de avanço tem o mesmo efeito sobre a vida útil da ferramenta tanto no fresamento convencional quanto na escala micro. Isto se deve ao aumento da temperatura no processo de usinagem, que altera as propriedades mecânicas da ferramenta e eleva as taxas de desgaste.

Após concluir os 20 passes propostos (80 mm), as ferramentas “Tool 58” ($v_a = 4$ mm/min) e “Tool 61” ($v_a = 24$ mm/min) foram novamente analisadas, conforme apresentado na Figura 4.1.2. Percebeu-se que para a fresa que usinou com menor velocidade de avanço, a aresta de corte estava quebrada, enquanto a outra ferramenta estava apenas desgastada. Não é possível afirmar ao certo o evento que causou a falha, mas sabe-se que ela ocorreu entre o 13º e 14º passe.

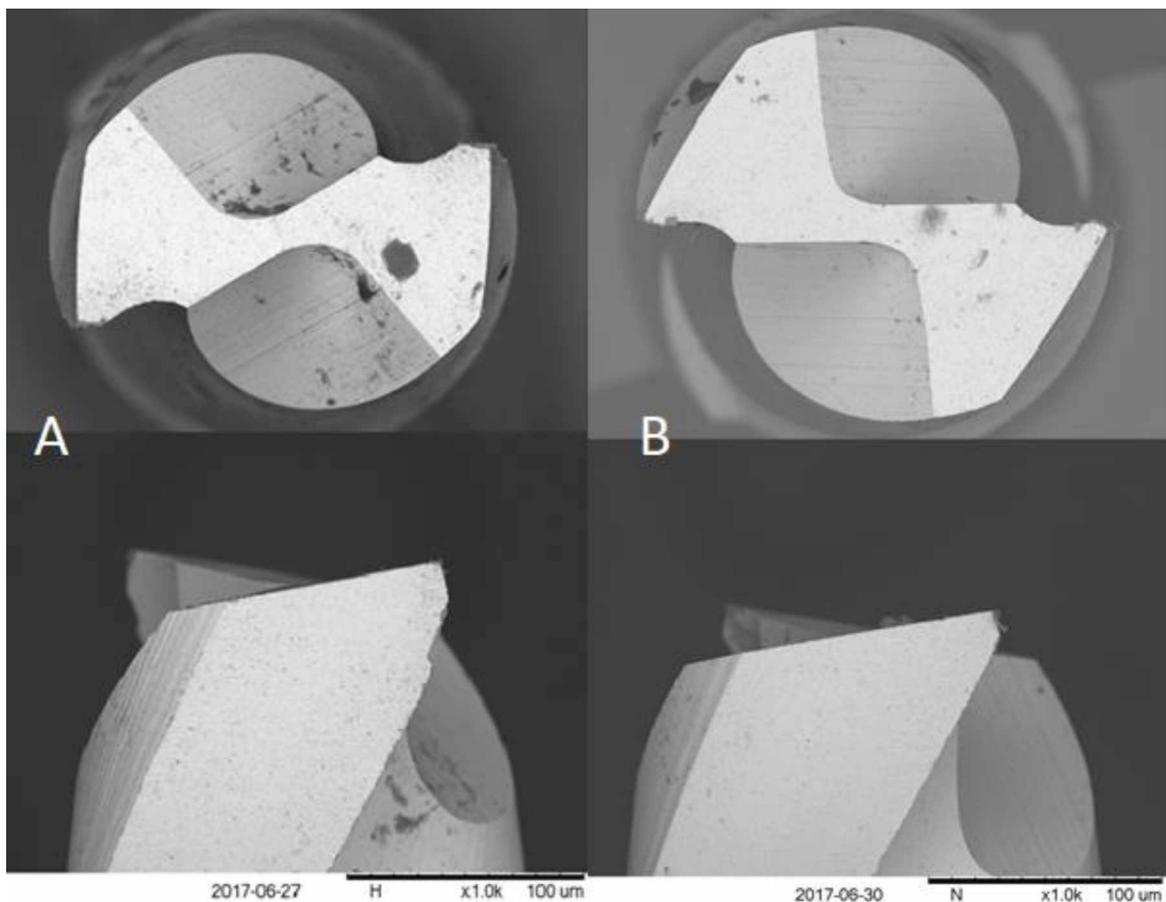


Figura 4.1.2 – A) Ferramenta Tool 58 ($v_a = 4$ mm/min) após de 20 canais usinados (4 mm cada). B) Ferramenta Tool 61 ($v_a = 24$ mm/min) após de 20 canais usinados (4 mm cada).

Aumento de 1000 vezes.

4.2. Integridade Superficial

Já em relação a superfície usinada, os resultados obtidos estão vinculados à medição da altura das rebarbas (h) e das imagens feitas no MEV. Os resultados de todas as medições estão separados nas tabelas 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4, sendo os valores de h para as ferramentas “Tool 58” (antes e após a quebra), “Tool 60”, “Tool 61”, respectivamente. Importante ressaltar que nesta primeira análise, foram observados apenas os resultados dos testes cujas as ferramentas ainda não haviam falhado.

Tabela 4.2.1 – Alturas de rebarba (h) para os ensaios realizados com a ferramenta “Tool 58” antes da quebra da aresta.

	Entrada do Canal			Meio do Canal			Saída do Canal			Média	
	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante
Passe 1	16,0428	8,7793	12,4110	3,3473	11,0352	7,1913	13,5103	10,2644	11,8874	10,9668	10,0263
Passe 2	19,6561	3,7180	11,6870	13,2497	12,5071	12,8784	5,9082	10,0579	7,9831	12,9380	8,7610
Passe 3	12,8803	13,4853	13,1828	9,1379	10,5956	9,8668	18,0661	12,3198	15,1930	13,3615	12,1336
Passe 4	15,1096	39,5781	27,3439	12,3721	9,9591	11,1656	12,0314	14,9505	13,4910	13,1710	21,4959
Passe 5	11,1592	8,1239	9,6416	12,3447	6,2454	9,2951	11,7642	14,6381	13,2012	11,7560	9,6692
Passe 6	18,8465	8,3344	13,5904	9,2847	15,3779	12,3313	14,3987	6,0567	10,2277	14,1766	9,9230
Passe 7	19,1346	15,2896	17,2121	9,5066	21,8645	15,6856	12,9492	13,3203	13,1348	13,8635	16,8248
Passe 8	13,4695	11,7930	12,6313	13,5605	12,8372	13,1989	12,8495	9,2875	11,0685	13,2932	11,3059
Passe 9	7,2759	13,0402	10,1580	13,1813	14,6988	13,9401	13,5440	30,5884	22,0662	11,3337	19,4425
Passe 10	12,9066	19,8336	16,3701	10,3580	12,2950	11,3265	16,3162	15,4690	15,8926	13,1936	15,8659
Passe 11	11,4847	11,5676	11,5262	13,7339	10,1694	11,9516	9,8399	5,5582	7,6991	11,6862	9,0984
Passe 12	10,9216	11,9339	11,4277	3,7368	15,4530	9,5949	11,2451	11,9932	11,6192	8,6345	13,1267
Passe 13	8,3990	11,2310	9,8150	12,9472	12,3065	12,6268	12,5673	10,7184	11,6429	11,3045	11,4186
Média	13,63741	13,59291	13,61516	10,52006	12,71883	11,61945	12,69155	12,70942	12,70048	12,28301	13,00705

Tabela 4.2.2 – Alturas de rebarba (h) para os ensaios realizados com a ferramenta “Tool 58” após a quebra da aresta.

	Entrada do Canal			Meio do Canal			Saída do Canal			Média	
	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante
Passe 14	0,0000	0,0000	0,0000	0,2624	1,0595	0,6610	0,4040	3,1459	1,7750	0,2221	1,4018
Passe 15	1,0935	6,2924	3,6929	0,8211	0,7570	0,7891	0,0465	1,3252	0,6858	0,6537	2,7915
Passe 16	0,3351	0,3980	0,3666	0,0000	0,0000	0,0000	0,4066	0,4308	0,4187	0,2473	0,2763
Passe 17	0,7742	1,3555	1,0648	1,3939	0,8112	1,1026	0,3652	0,4872	0,4262	0,8444	0,8846
Passe 18	0,6692	0,0179	0,3435	0,9852	2,5946	1,7899	0,8883	0,0000	0,4441	0,8476	0,8708
Passe 19	2,0933	2,0788	2,0860	0,4915	0,2772	0,3844	0,1266	4,1354	2,1310	0,9038	2,1638
Passe 20	0,0000	0,0000	0,0000	0,8382	0,3142	0,5762	0,5498	0,7439	0,6469	0,4627	0,3527
Média	0,70933	9,54491	1,07913	0,68461	0,83053	0,75757	0,39815	1,46691	0,93253	0,59736	1,24879

Tabela 4.2.3 – Alturas de rebarba (h) para os ensaios realizados com a ferramenta “Tool 60” antes da quebra da aresta.

	Entrada do Canal			Meio do Canal			Saída do Canal			Média	
	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante
Passe 1	10,0727	9,2080	9,6404	4,7977	5,2233	5,0105	4,5495	5,3491	4,9493	6,4733	6,5935
Passe 2	5,5715	6,2638	5,9177	3,5794	8,3942	5,9868	4,2218	10,7178	7,4698	4,4576	8,4586
Passe 3	5,3387	10,5882	7,9635	3,5046	5,7890	4,6468	10,8287	5,1001	7,9644	6,5573	7,1591
Passe 4	5,8495	7,5572	6,7034	9,2129	9,0239	9,1184	5,3564	4,9859	5,1712	6,8063	7,1890
Passe 5	10,1470	7,9421	9,0446	6,0320	6,8426	6,4373	5,2573	5,7747	5,5160	7,1454	6,8531
Passe 6	11,4687	10,9697	11,2192	5,2748	6,1788	5,7268	8,5047	7,4193	7,9620	8,4161	8,1893
Passe 7	10,7370	13,9275	12,3323	12,5569	11,5222	12,0396	10,1171	11,4625	10,7898	11,1370	12,3041
Média	8,45501	9,49379	8,97440	6,42261	7,56772	6,99517	6,97650	7,25849	7,11749	7,28471	8,10666

Tabela 4.2.4 – Alturas de rebarba (h) para os ensaios realizados com a ferramenta “Tool 61”.

	Entrada do Canal			Meio do Canal			Saída do Canal			Média	
	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante	Média	Concordante	Discordante
Passe 1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5977	0,1642	0,3810	0,1992	0,0547
Passe 2	0,7714	0,7377	0,7546	0,4408	0,8817	0,6613	0,7950	0,5245	0,6598	0,6691	0,7146
Passe 3	1,4437	1,1865	1,3151	0,5649	1,0981	0,8315	1,0816	1,2815	1,1816	1,0301	1,1887
Passe 4	0,0000	0,0000	0,0000	0,1284	1,3537	0,7411	1,0210	0,1806	0,6008	0,3831	0,5114
Passe 5	1,3951	0,6519	1,0235	0,6746	1,7678	1,2212	0,0628	0,7912	0,4270	0,7108	1,0703
Passe 6	0,9554	0,4200	0,6877	0,5234	0,3280	0,4257	1,0032	0,6741	0,8387	0,8273	0,4740
Passe 7	0,9448	1,2761	1,1105	0,8459	1,4231	1,1345	1,4506	0,3215	0,8861	1,0804	1,0069
Passe 8	1,1858	1,1440	1,1649	0,4269	0,7235	0,5752	0,0698	0,7706	0,4202	0,5608	0,8794
Passe 9	3,0072	0,2715	1,6394	0,7209	0,2643	0,4926	1,5716	0,7991	1,1854	1,7666	0,4450
Passe 10	4,3904	0,5302	2,4603	0,3866	0,6124	0,4995	0,6177	0,5838	0,6008	1,7982	0,5755
Passe 11	0,6058	1,6201	1,1130	0,6683	1,6410	1,1547	0,2855	0,7132	0,4994	0,5199	1,3248
Passe 12	0,1561	2,3586	1,2574	0,0000	0,2281	0,1141	0,6592	1,7600	1,2096	0,2718	1,4489
Passe 13	1,8018	1,3030	1,5524	0,8630	1,7394	1,3012	0,5997	1,9247	1,2622	1,0882	1,6557
Passe 14	0,0291	0,5229	0,2760	0,0507	0,0000	0,0254	0,2735	1,3467	0,8101	0,1178	0,6232
Passe 15	0,0000	1,2623	0,6312	0,0000	1,8368	0,9184	1,2321	2,4196	1,8259	0,4107	1,8396
Passe 16	0,2887	0,0000	0,1444	0,0000	1,8882	0,9441	0,3494	1,2108	0,7801	0,2127	1,0330
Passe 17	3,4920	0,4155	1,9538	0,0000	0,9991	0,4996	0,0813	0,4349	0,2581	1,1911	0,6165
Passe 18	1,4898	0,5999	1,0449	0,0000	0,0815	0,0408	0,7888	1,7543	1,2716	0,7595	0,8119
Passe 19	2,8312	1,4763	2,1538	0,3618	2,0030	1,1824	1,8302	2,5041	2,1672	1,6744	1,9945
Passe 20	3,0489	1,9816	2,5153	1,8181	3,0868	2,4525	0,7207	2,2808	1,5008	1,8626	2,4497
Média	1,39186	0,88791	1,13988	0,42372	1,09783	0,76077	0,75457	1,12201	0,93829	0,85672	1,03591

A partir destes dados foram elaborados os gráficos a seguir. O primeiro deles, que corresponde a Figura 4.2.1, traz a comparação entre a média das alturas das rebarbas para cada passe realizado com as diferentes ferramentas. Desta forma, é possível estabelecer qual a melhor velocidade de avanço quando se busca um melhor acabamento superficial, quando o quesito de comparação é apenas a formação de rebarbas no processo de fabricação. Além disto, é possível estabelecer também uma relação entre o tipo de fresamento (concordante e discordante) e a integridade da superfície fresada.

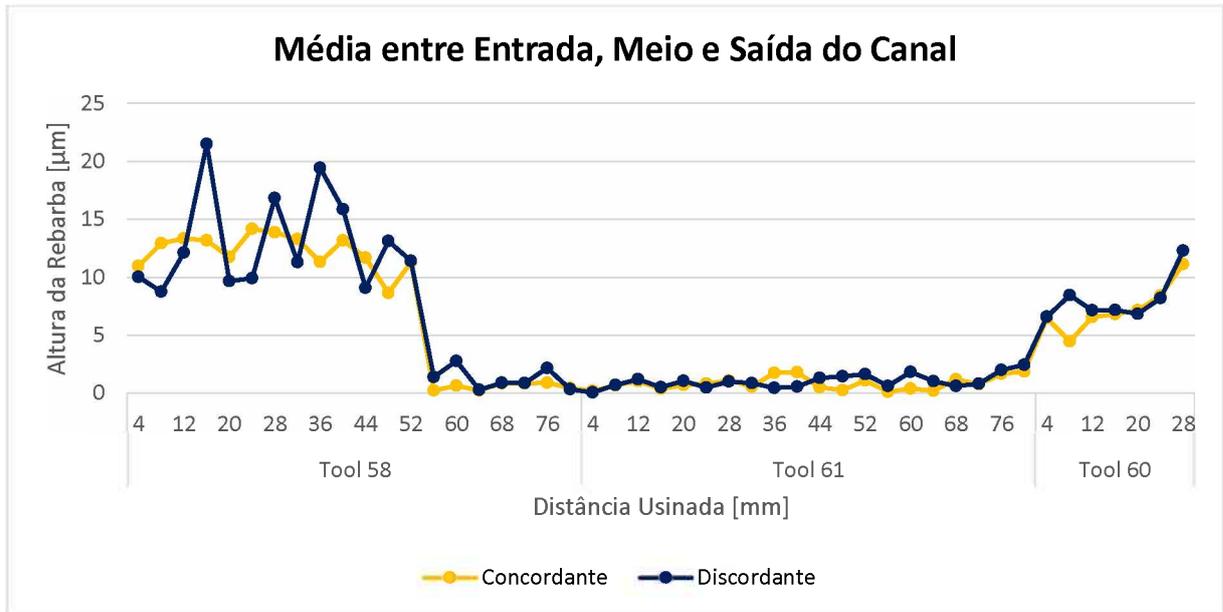


Figura 4.2.1 – Gráfico da Altura Média da Rebarba em função da Distância Usinada tanto para o fresamento concordante quanto o discordante.

Pelas tabelas e pelo gráfico é possível afirmar que quanto maior a velocidade de avanço, melhor será a integridade da superfície, pois a altura da rebarba será menor. Isto ocorre pois, para pequenos avanços, a ocorrência de efeito *ploughing* se torna maior, logo o corte será mais imperfeito e as deformações serão ainda maiores. Quando o avanço for maior, irá prevalecer o corte, reduzindo o efeito *ploughing*, reduzindo as deformações e consequentemente a altura das rebarbas.

Outra constatação que é possível ser feita está relacionada ao tipo de fresamento. O processo concordante, no geral, apresentou menores rebarbas que o discordante. Este fenômeno ocorre porque o segundo procedimento promove maior vibração, que influencia diretamente na qualidade da peça usinada, reduzindo este parâmetro de saída.

Todas estas constatações podem ser verificadas ainda melhor quando são observadas as fotos dos canais fabricados. A Figura 4.2.2 traz um canal com cada uma das ferramentas, feitos sob as mesmas condições e que mostra a influência da velocidade de avanço, bem como a relação entre o fresamento concordante/discordante no acabamento superficial. A direita de cada uma das imagens, tem-se as rebarbas formadas pelo procedimento discordante.

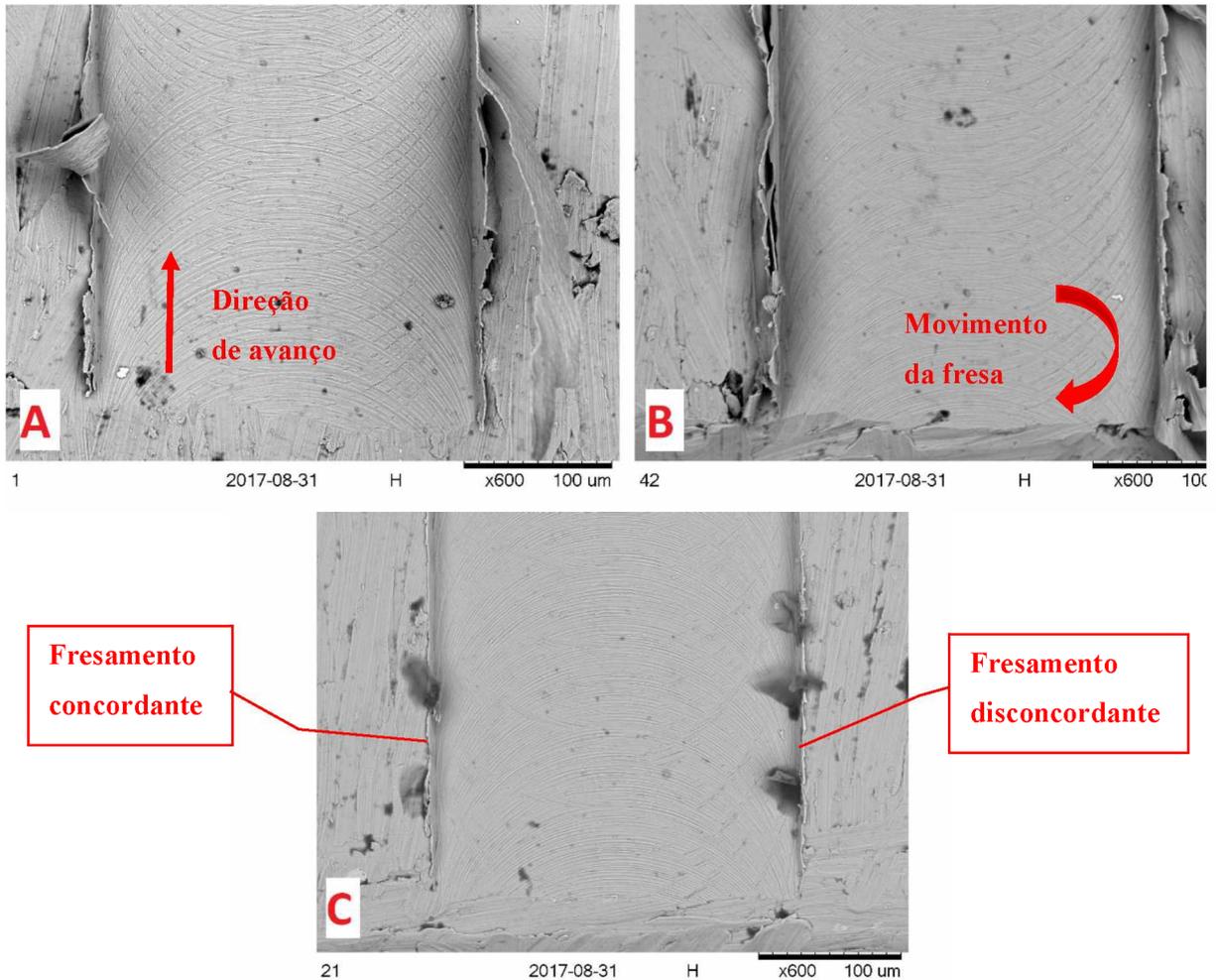


Figura 4.2.2 – Primeiro canal usinado para cada uma das velocidades de avanço de. (A) “Tool 58” – 4 mm/min, (B) “Tool 60” – 14,4 mm/min e (C) “Tool 61” – 24 mm/min. Aumento de 600 vezes.

Um outro ponto observado foi a relação entre h e a posição da rebarba. Isto quer dizer que é possível estabelecer um ponto de comparação entre a altura das rebarbas formadas na entrada, no meio e no fim do canal. Logo, dependendo do ponto onde a rebarba foi formada, ela pode ter características diferentes, principalmente o tamanho, que influenciarão diretamente a qualidade do canal gerado no microfresamento.

A Figura 4.2.3 contém o gráfico da média entre fresamento concordante e discordante, a fim de analisar apenas a influência do posicionamento de formação da rebarba.

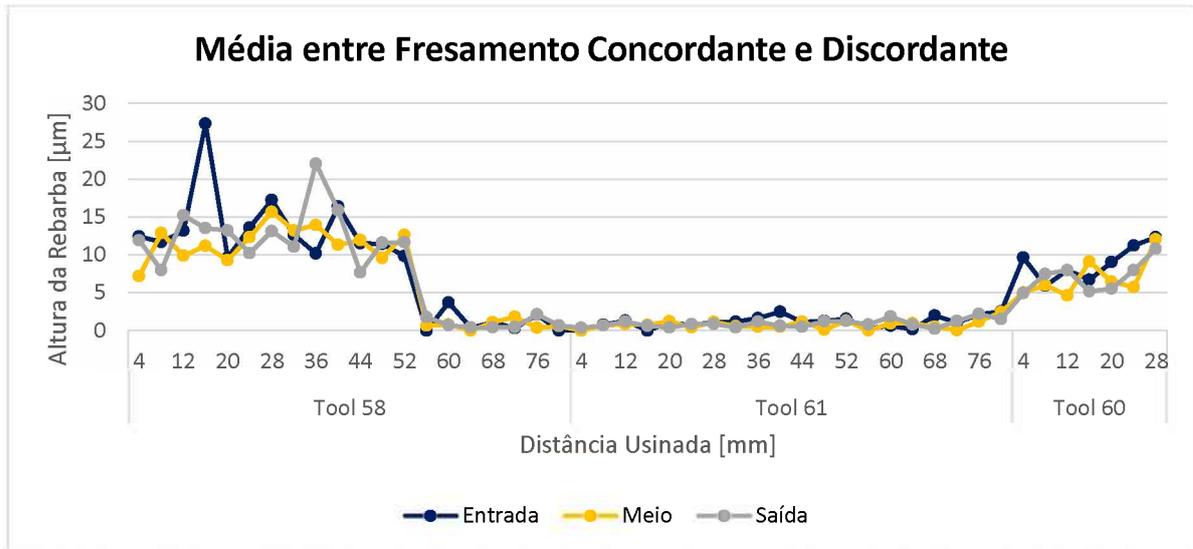
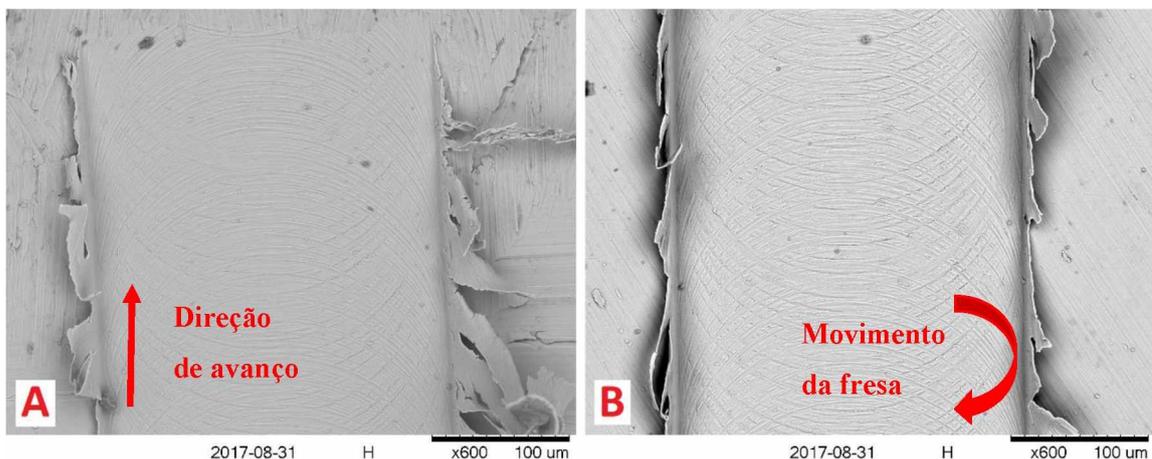


Figura 4.2.3 – Gráfico das médias das alturas das rebarbas no fresamento discordante e concordante em função da distância usinada para a Entrada, Meio e Saída dos canais.

Aliado às informações das tabelas 4.2.1 a 4.2.4, a Figura 4.2.3 permite afirmar que, no geral, as rebarbas formadas na entrada no canal, ou seja, logo após a ferramenta trocar a peça são maiores que as que geradas no meio e fim do canal. Seguindo este raciocínio, a saída também apresenta rebarbas mais altas que o meio da peça. Este fenômeno pode ser explicado pelas variações de força tanto na entrada quando na saída da ferramenta, influenciando diretamente na integridade superficial da peça. Para corroborar com a análise, as fotos tiradas das superfícies fresadas (Figuras 4.2.4 a 4.2.6), demonstram bem a influência da posição da rebarba na peça usada em procedimentos de microfresamento.



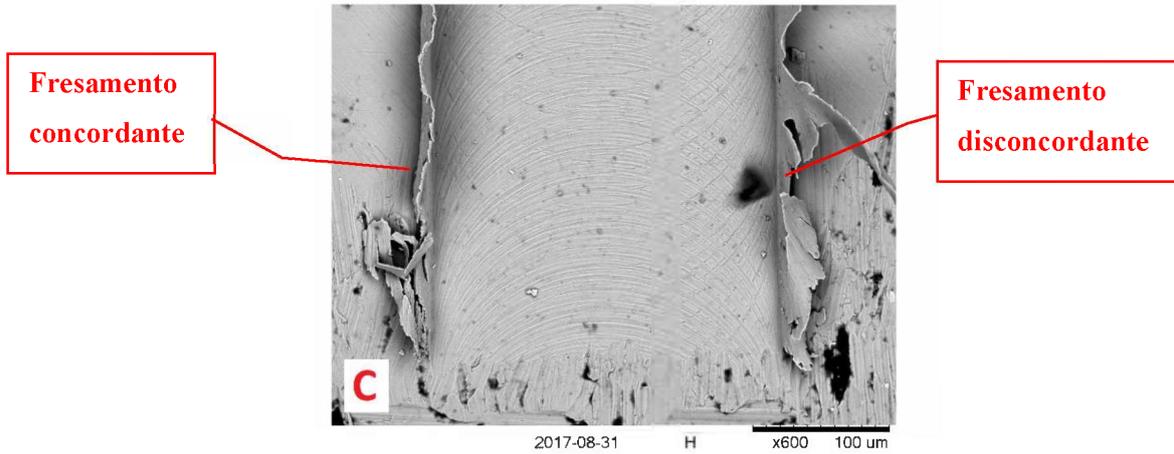


Figura 4.2.4 – Terceiro canal para velocidade de avanço de 4 mm/min (Tool 58). (A) Entrada, (B) Meio e (C) Saída. (Aumento de 600x).

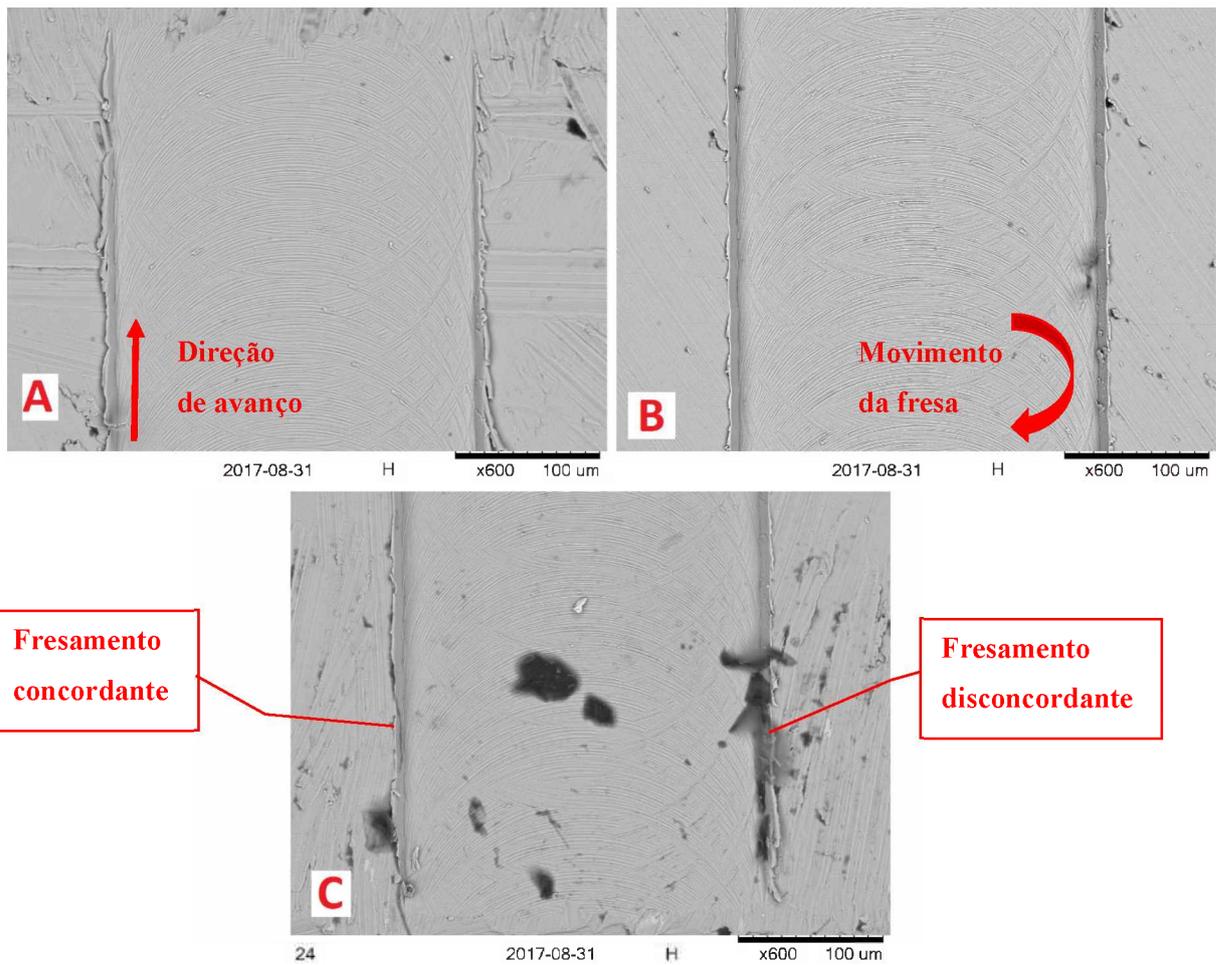


Figura 4.2.5 – Quarto canal para velocidade de avanço de 24 mm/min (Tool 61). (A) Entrada, (B) Meio e (C) Saída. (Aumento de 600x).

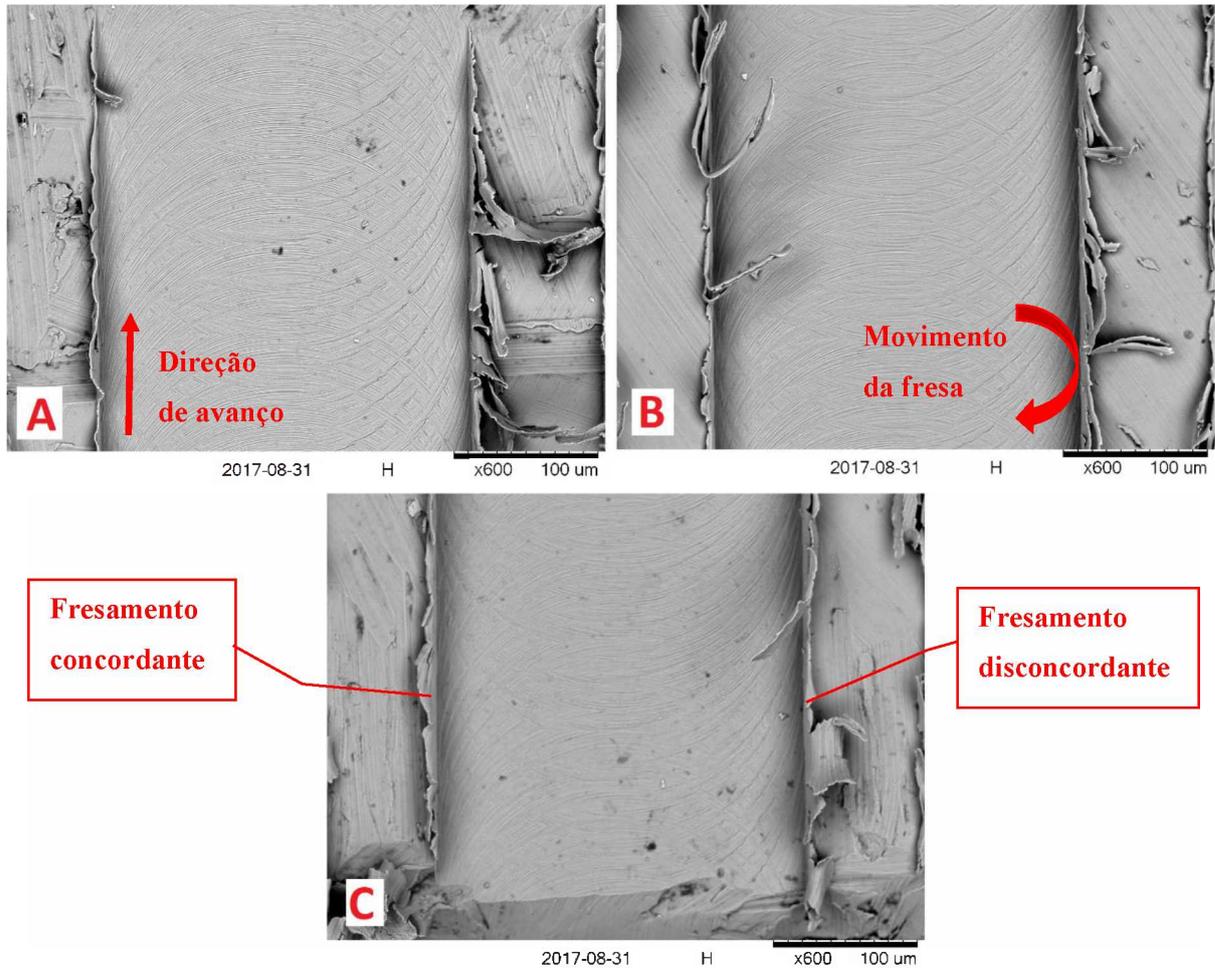


Figura 4.2.6 – Terceiro canal para velocidade de avanço de 14,4 mm/min (Tool 60). (A) Entrada, (B) Meio e (C) Saída. (Aumento de 600x).

A análise qualitativa das imagens colabora com a análise dos dados coletados através do perfilômetro. Portanto, a posição de formação da rebarba na peça tem uma forte influência sobre o tamanho das estruturas geradas e o impacto que isto causa na qualidade superficial de uma peça obtida através de processos de microfresamento.

Por fim, uma outra questão que é importante esclarecer é em relação aos canais utilizando a microfresa “Tool 58” que ao atingir 52 mm usinados (13 passes) houve uma queda significativa das alturas das rebarbas. Isto ocorreu porque exatamente neste momento aconteceu a quebra da aresta de corte, que modificou os mecanismos atuantes, não havendo mais o corte perfeito. A Figura 4.2.7 evidencia esta alteração nas rebarbas formadas.

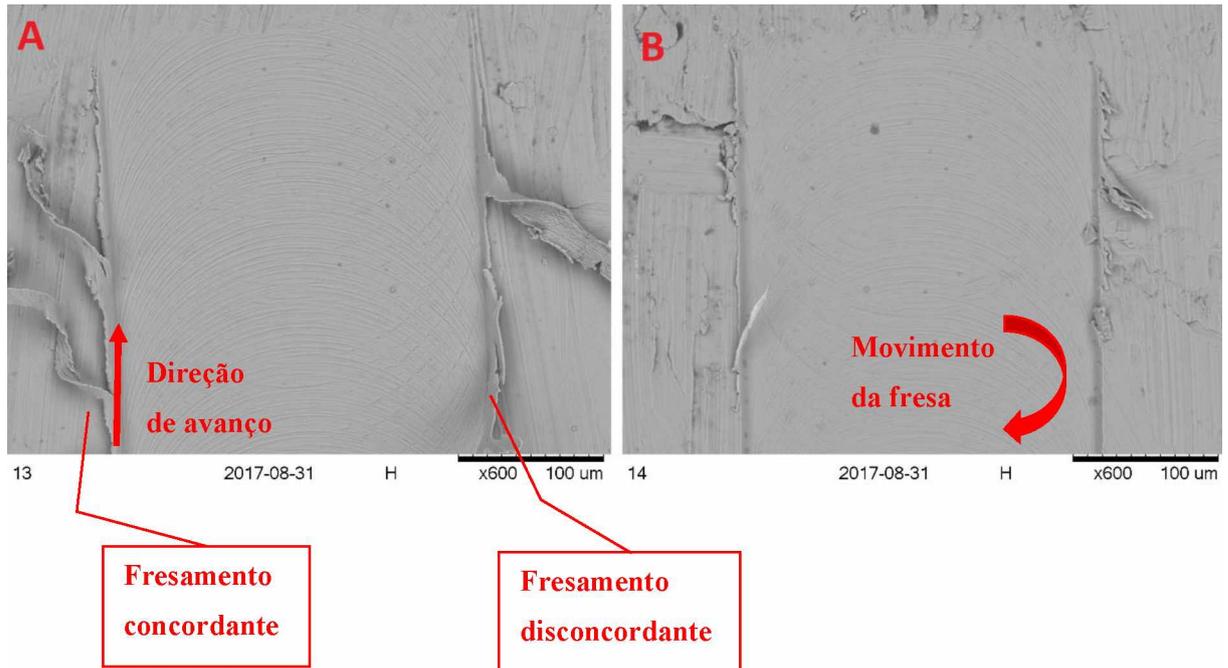


Figura 4.2.7 – Comparação entre o 13° (A) e 14° (B) passes da microfresa “Tool 58”.
É nítido a redução do tamanho das rebarbas (Aumento de 600x).

Assim, como está evidenciado na Figura 4.2.1 e exemplificado na imagem anterior (Figura 4.2.7) ocorre uma redução nas rebarbas formadas quando a ferramenta perde sua aresta de corte. Contudo, outros parâmetros devem ser estudados a fim de emitir um parecer final sobre a qualidade da superfície. A rugosidade seria um bom parâmetro para ser coletado, porque ela aumentará com a aresta de corte imperfeita.

CAPÍTULO V

Conclusões

Com relação ao desgaste da ferramenta conclui-se que:

- Quanto menor a velocidade de avanço ou avanço por dente sem alterar os demais parâmetros de corte, menor será o desgaste sofrido pela microfresa e, portanto, maior sua vida útil.

Já em relação ao acabamento superficial da superfície usinada, pode-se concluir que:

- Ao aumentar o avanço por dente, nota-se uma diminuição na altura das rebarbas formadas.
- As rebarbas formadas no meio do canal em geral são menores que as rebarbas formadas no fim e no início, principalmente devido a ação das forças de corte, que sofrem grandes variações ao longo do processo.
- Devido ao aumento de vibração, o fresamento discordante apresenta uma pior qualidade superficial da peça.
- Caso haja quebra da aresta cortante, o fresamento passa a ser imperfeito, reduz o corte do material. Este processo diminui a altura as rebarbas formadas, mas tem efeitos sobre a qualidade total do canal usinado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. **Precision Engineering**, Philadelphia, v. 4, p.402-407, 2009.
- BERESTOVSKIY, D.; HUNG, W. N. P. Surface finish of Ball-End Milled Microchannels. In. **International Conference on Micromanufacturing**, Canadá. Anais. V.80, p1-8, 2013.
- BOMBONATO, S. G.; LUSTOSA, A. A.; SILVA, M. B. Análise do desgaste de ferramentas via emissão acústica com aplicações de redes neurais. **Horizonte Científico**, Uberlândia, v. 2, n. 2, dez. 2008.
- BRINKSMEIER, E.; RIEMER, O.; STERN, R. **Machining of precision parts and microstructures**. Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium, pp. 3-11, 2002.
- BOOTHROYD, G., KNIGHT, W.A., 1989, **Fundamentals of Machining and Machine Tools**, 2ed. Edition, Marcel Dekker, Nova Iorque.
- CÂMARA, M. A. *et al.* State of the art on micromilling of materials, a review. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 28, n. 8, p. 673-685, 2012.
- CHAE, J.; PARK, S.; FREIHET, T. Investigation of micro-cutting operation. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, New York, v. 46, n. 3-4, p. 313-332, 2006.
- CHENG, K.; HUO, D. Applications: Micro Cutting Mechanics. In: CHENG, K.; HUO, D. **Micro-Cutting: Fundamentals and Applications**. United Kingdom: Wiley, 2013. p. 19-44.
- COUTO, A., **Caracterização microestrutural da liga ti-6al-4v comercial utilizada como biomaterial**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17, 2006. Foz do Iguaçu.
- CUNHA, D. F. **Influência da utilização do fluido de corte com adição de grafeno na temperatura de usinagem e formação de rebarba no processo de**

microfresamento. 2016. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, L.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 4 ed. São Paulo: Art. Liber, 2006. 247p.

EGASHIRA, K.; TAKEMOTO, S.; MASAO, Y. **Fabrication and cutting performance of cemented tungsten carbide micro-cutting tools**. Precision Engineering, vol. 35, nº 4, pp. 547-553, 2011.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Editora Blucher, 1970.

FROES, F.H. **Titanium: physical metallurgy, processing, and applications**. ASM International (2015).

FLEISCHER, J. *et al.* **Design and manufacturing of micro milling tools**. Microsystem Technologies, vol. 14, nº 9-11, pp. 1771-1775, 2008.

JAWAHIR, I., S. *et al.* **Surface integrity in material removal processes: Recent advances**. CIRP Annals- Manufacturing Technology, vol. 60, nº 2, pp. 603-626, 2011.

JEONG, Y., H. *et al.* **Deburring microfeatures using micro-EDM**. Journal of materials processing technology, vol. 209, nº 14, pp. 5399-5406, 2009.

LEKKALA, R. *et al.* Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling. **Precision Engineering**. v. 35, p. 625-637, 2011.

LIU, X., DEVOR, R. E., KAPOOR, S. G., EHMANN, K. F. **The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v.126, p. 666-678, 2004.

MACHADO, A. *et al.* **Teoria da Usinagem Dos Materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

MARKUS, W. **Aspectos Tecnológicos da Minimização e Eliminação de Fluido de Corte no Processo de Torneamento com Insertos de Metal-duro Revestido com TiN**. 2001. 113p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MASUZAWA, T. **State of the art of micromachining**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Amsteram, v. 49, n. 2, p. 473-488, 2000.

METAIS & Ligas | Titânio | Informações Técnicas. [S. /], [2018]. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=93>. Acesso em: 11 dez. 2018.

MOUGO, Adriane Lopes. **MICROFRESAMENTO DO AÇO SUPERDUPLEX: UMA COMPARAÇÃO MECANÍSTICA COM OS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICO E FERRÍTICO PARA AS FORÇAS DE USINAGEM E AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE USINADA**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

OLVERA, O.; BARROW, G. Na 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.

PICARELLI, Tiago Cacossi. **Microfresamento: Estudo e Aplicação do Processo**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Santa Bárbara d'Oeste, 2015.

SIMONEAU, A.; NG, E.; ELBESTAWI, M. A. **Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 46, p.467-481, 2006.

FERNANDES, V.; MARTENDAL, C. TITÂNIO e suas ligas. [S. /], [2018]. Disponível em: <http://engenheirodemateriais.com.br/2016/01/27/titanio-e-suas-ligas/>. Acesso em: 11 dez. 2018.

TAKÁCS, M.; VERÖ, B.; MÉSZÁROS. **Micromilling of metallic materials**. Journal of Materials Processing Technology. V138, p.152-155, 2003.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K., **Metal Cutting**, 4th Edition, Butterworth Heinemann, 2000.

WHITEHOUSE, D. J. Review Article: Surface metrology. **Meas. Sci. Technol.** v. 8, p. 955-972, 1997.

WOON, K. S. et al. **Investigations of tool edge radius effect in micromachining:**
A fem simulation approach. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 195, p.
204–211, April 2008.