



PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

**Análise da influência do avanço no microfresamento da liga Al6101 T6
através da qualidade superficial dos canais**

Geovanna Diniz Mendonça

Brasília - DF, 27 de setembro de 2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

Análise da influência do avanço no microfresamento da liga Al6101 T6 através da qualidade superficial dos canais

Geovanna Diniz Mendonça

*Projeto de Graduação 2 submetido ao Departamento de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenharia em Engenharia Mecânica*

Banca Examinadora

Profa. Déborah de Oliveira, Dra., UnB
Orientadora

Prof. Maksym Ziberov, Dr., UnB
Examinador interno

Prof. Lucival Malcher, Dr., UnB
Examinador interno

FICHA CATALOGRÁFICA

MENDONÇA, GEOVANNA DINIZ

Análise da influência do avanço no microfresamento da liga Al6101 T6 através da qualidade superficial dos canais [Distrito Federal] 2022.

210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Engenharia, Engenharia Mecânica, 2022).

Projeto de Graduação 2 - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica

- | | |
|---------------------|--------------------------|
| 1. Microfresamento | 2. Alumínio 6101 |
| 3. Avanço por dente | 4. Qualidade superficial |
| 5. Rugosidade | 6. Rebarbas |
| I. ENM/FT/UnB | |

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Geovanna Diniz Mendonça

TÍTULO: Análise da influência do avanço no microfresamento da liga Al6101 T6 através da qualidade superficial dos canais.

ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Geovanna Diniz Mendonça

Depto. de Engenharia Mecânica (ENM) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Agradecimentos

A Deus, que na sua infinita misericórdia e bondade me fortaleceu e me deu sabedoria para que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais, Juelene Diniz e Sergio Machado, e minhas irmãs, Maria Luiza e Laura, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim, que sempre me encheram de amor incondicional, mesmo estando longe. À minha avó Valdecy e ao meu avô Marinho (in memoriam) que fizeram o possível e o impossível para que eu tivesse uma educação de qualidade ao longo da vida.

Ao meu namorado, Rafael Melo, que foi um grande companheiro na minha jornada acadêmica, que me motivou, me ajudou e principalmente me apoiou nos momentos difíceis da graduação.

Aos meus amigos de graduação, George Harrison, Jaqueline Godoi, Marcelo Araújo, Elizeu Fonseca e Israel Ferreira, pelos momentos compartilhados na graduação e na vida, bons e ruins, que foram essenciais para que essa fase se tornasse mais leve e divertida.

À Universidade de Brasília, instituição que eu amo e admiro, por todo conhecimento a mim e aos meus colegas transmitidos, por todas as experiências que tive a honra de viver aqui.

À minha orientadora professora Déborah de Oliveira, por toda confiança em mim depositada.

Geovanna Diniz Mendonça

RESUMO

Com a evolução das indústrias e sua crescente necessidade de miniaturização de componentes, os processos em escala micro vem ganhando mais notoriedade no universo da usinagem. Os processos de microusinagem não podem ser caracterizados como uma simples redução dos processos de macrousinagem, isso porque, a espessura de corte e o tamanho do grão do material da peça são semelhantes ao tamanho do raio da aresta de corte, o que causa o efeito escala. O efeito escala é responsável pelo aumento da energia específica de corte, em função da diminuição da espessura de corte. Em relação ao material, ligas de alumínio são amplamente utilizadas nas indústrias, nos mais diversos setores. Em geral apresentam baixo peso específico, resistência mecânica relativamente elevada e boa condutividade térmica e elétrica. Com relação a microusinagem desse tipo de material, sua maior dificuldade se dá em função da alta ductilidade das ligas de alumínio. Considerando a vasta possibilidade de aplicação para microcomponente, esse trabalho tem como objetivo estudar o acabamento de microcanais usinados na liga de alumínio 6101, utilizando uma microfresa de metal duro, com 400 μm de diâmetro. O parâmetro de corte variado foi o avanço por dente, sua escolha foi baseada na literatura são eles 5 μm , 10 μm , 15 μm e 20 μm . A rotação foi de 6000 rpm e, foi mantida constante. No procedimento experimental realizou-se preparação de superfície, para garantir o paralelismo e planicidade. Também utilizou-se fluido de corte BIO100e e, para cada valor de avanço por dente, realizou-se um ensaio e uma réplica, totalizando 8 microcanais. A partir dos resultados experimentais, acredita-se que ocorreu um desgaste da ferramenta de corte, o que influenciou para os altos valores de rugosidades e a formação de grandes rebarbas. As marcas de avanços encontradas nos fundos dos canais mostra uma possível evolução do desgaste da ferramenta de corte no processo, nota-se também forte presença do efeito *ploughing* no fundo dos canais, bem como a presença de material aderido, o que pode indicar a formação de APC na ferramenta. Em relação as rebarbas formadas, acredita-se que tenha sido do tipo primárias e de topo. Sendo assim, nas condições propostas pelo trabalho, avanços por dente de 5 μm e, 10 μm , combinados com velocidade de corte de 7,5 m/min, mostraram-se satisfatórios no resultado final da superfície da peça.

Palavras chave: Microfresamento, alumínio 6101, avanço por dente, qualidade superficial, rugosidade, rebarbas.

ABSTRACT

With the evolution of industries and their growing need for miniaturization of components, micro-scale processes are gaining more prominence in the machining universe. The micro-machining processes cannot be characterized as a simple reduction of the macromachining processes, because the cutting thickness and the grain size of the workpiece material are similar to the size of the cutting edge radius, which causes the scale effect. The scale effect is responsible for the increase of the specific cutting energy as a function of the decrease of the cutting thickness. Regarding the material, aluminum alloys are widely used in the industries, in the most diverse sectors. In general they have low specific weight, relatively high mechanical strength and good thermal and electrical conductivity. Regarding the micromachining of this type of material, its greatest difficulty is due to the high ductility of aluminum alloys. Considering the vast possibility of application for micro-machining, this work aims to study the finishing of microchannels machined in the aluminum alloy 6101, using a carbide micro-mill, with 400 μm diameter. The varied cutting parameter was the feed per tooth, its choice was based on the literature they are 5 μm , 10 μm , 15 μm and 20 μm . The rotation was 6000 rpm and was kept constant. Surface preparation was performed in the experimental procedure, to ensure parallelism and flatness. BIO100e cutting fluid was also used, and for each feed value per tooth, one test and one replication were performed, totaling 8 microchannels. From the experimental results, it is believed that a wear of the cutting tool occurred, which influenced the high roughness values and the formation of large burrs. The advancement marks found on the bottoms of the channels show a possible evolution of the wear of the cutting tool in the process, it is also noted a strong presence of the *ploughing* effect on the bottom of the channels, as well as the presence of adhered material, which may indicate the formation of APC on the tool. Regarding the burrs formed, it is believed that they were primary and end burrs. Thus, in the conditions proposed in this work, tooth feed rates of 5 μm and 10 μm , combined with cutting speed of 7.5 m/min, were satisfactory in the final result of the surface of the piece.

Keywords: Micromilling, aluminum 6101, feed per tooth, surface quality, roughness, burrs.

LISTA DE FIGURAS

Figura. 1.1:	Componentes obtidos através de processos de microfabricação: (a) Módulo de air bag (Tolfree e Jackson, 2007) e, (b) Sistema de microdosagem de medicamentos (TEKNIKER, 2018 apud Gomes, 2013, p. 3).	1
Figura. 1.2:	Ferramenta de corte do processo de fresamento convencional, e ferramenta de corte do processo de microfresamento (Bissacco, 2004 apud Bissacco, Hansen e Chiffre, 2005).	2
Figura. 2.1:	Presença da microusinagem na área: (a) Médica - Organs on chips (SUN et al., 2016) e, (b) Ambiental - Microsensores Carirsens (ENVEA, 2008).	5
Figura. 2.2:	Dimensão e precisão do processo de microusinagem (adaptado Chae, Park e Freiheit, 2006).	6
Figura. 2.3:	Menor peça de xadrez do mundo ((adaptado de SYADRISTY, 1969, p.88 apud Ziberov, 2017).	7
Figura. 2.4:	Relação entre o tamanho do grão e a espessura de corte para: (a) usinagem convencional e, (b) microusinagem (adaptado de Bissacco, Hansen e Chiffre, 2005).	8
Figura. 2.5:	Efeito do raio da aresta de corte (a) na usinagem convencional e (b) na microusinagem (adaptado de Aramcharoen e Mativenga, 2009).	9
Figura. 2.6:	Espessura mínima de corte (R_e - raio da ferramenta de corte, h - espessura não deformada do cavaco e, h_m - espessura mínima do cavaco) (adaptado de Chae, Park e Freiheit 2006).	10
Figura. 2.7:	Componentes da força de corte no processo de usinagem (STOETTERAU, 2003).	11
Figura. 2.8:	Processo de microfresamento (adaptado de Shizuka et al., 2011).	13
Figura. 2.9:	Principais fatores ao estudar microfresamento (adaptado de Câmara et al., 2012).	13
Figura. 2.10:	Variação da espessura de corte durante o microfresamento (Gomes, 2019).	14
Figura. 2.11:	Mecanismos de corte no microfresamento frontal (adaptado de Bayesteh, Ko e Jun, 2016).	15
Figura. 2.12:	Variação da rugosidade média da superfície, R_a , com valores de avanço por dente, na microusinagem da liga Ti_6Al_4V (adaptado de Aslantas et al., 2016).	17
Figura. 2.13:	Rugosidade superficial média, R_a , em função do avanço e da velocidade de corte (adaptado de Filiz et al., 2007).	17
Figura. 2.14:	Rugosidade da superfície sob condições secas e MQL para (a) diferentes avanços e, (b) diferentes velocidades (adaptado de Li e Chou 2010)	18

Figura. 2.15:	Imagens dos canais obtidas via MEV: (a) $a_p = 30 \mu\text{m}$, $f_z = 3 \mu\text{m}$ e $n = 20000 \text{ rpm}$; (b) $a_p = 30 \mu\text{m}$, $f_z = 3 \mu\text{m}$ e $n = 30000 \text{ rpm}$; (c) $a_p = 10 \mu\text{m}$, $f_z = 3 \mu\text{m}$ e $n = 20000 \text{ rpm}$ e, (d) $a_p = 10 \mu\text{m}$, $f_z = 3 \mu\text{m}$ e $n = 30000 \text{ rpm}$ (Santos et al., 2015).	20
Figura. 2.16:	Classificação das rebarbas no processo de fresamento (adaptado Lee e Dornfeld, 2002).	21
Figura. 2.17:	Tipos de rebarbas na microusinagem: (a) rebarba primária, (b) rebarba em forma de agulha, (c) rebarba tipo pena e, (d) rebarba menor (Chern et al., 2007).	21
Figura. 2.18:	Formação de rebarba primária em microfresamento, onde: a) deformação elástica do material, b) fratura do material deformado, c) rebarba se curva e d) início de um novo ciclo (adaptado de Chern et al., 2007).	22
Figura. 2.19:	Rebarbas formadas a partir de (a) e (b) microfresa novas e, (c) e (d) a partir de microfresa desgastadas (adaptado de Zhang, Yuan e Wang, 2017).	23
Figura. 2.20:	Mecanismo de controle de rebarbas no microfresamento: (a) extensão dos limites da peça com o material de suporte, (b) Crescimento da trinca no material de suporte, (c) formação de rebarbas no suporte; (d) separação do suporte e peça (adaptado de Kou et al. 2015).	24
Figura. 2.21:	Vista superior para (a) microfresa desgastada, (b) e (c) microfresa nova, sem revestimento (adaptado de Teng et al., 2018).	26
Figura. 2.22:	(a) Formação de APC na ferramenta sem revestimento; (b) Indício de desgaste abrasivo na ferramenta sem revestimento; (c) Lascamento sucedido na ferramenta revestida (adaptado de Berestovskyi, Hung e Lomeli, 2014).	26
Figura. 2.23:	Esquema de montagem do experimento (CAMPOS, 2014).	30
Figura. 2.24:	(a) Topo da microfresa utilizada para a operação, (b) vista ampliada da borda de corte da microfresa (Kumar, Deb e Paul, 2018).	31
Figura. 2.25:	Direção de medição da rugosidade média da superfície no microcanal (adaptado de Kumar, Deb e Paul, 2018).	32
Figura. 2.26:	(a) Tipos de rebarbas formadas no microfresamento dos microcanais, (b) Medição da largura da rebarba (adaptado, Kumar, Deb e Paul, 2018).	33
Figura. 2.27:	Variação de largura da rebarba superior com a velocidade de corte e avanço por dente (adaptado, Kumar, Deb e Paul, 2018).	34
Figura. 2.28:	Variação da energia específica: (a) Peça 1 e (b) Peça 2, com ângulo de ataque de 0° , velocidade de corte de 10 mm/s e espessura de corte de $40 \mu\text{m}$ (Nahata, Kota e Ozdoganlar, 2020).	35
Figura. 2.29:	Tamanho das rebarbas, após 45 minutos de processo, para cada parâmetro de corte (Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).	37
Figura. 2.30:	Comprimento e largura das rebarbas (adaptado de Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).	37

Figura. 2.31:	Rebarbas de entrada, com tempo de usinagem de, aproximadamente, (a) 36 s, (b) 72 s, (c) 108 s, (d) 144 s, (e) 180 s e, (f) 216 s (Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).	38
Figura. 2.32:	Formação de rebarbas, com velocidade de corte de 90.000 rpm e velocidade de avanço de 0,5 mm/s, com a condição de ferramenta (a) nova e afiada; (b) ferramentas desgastadas, onde as rebarbas inferiores são maiores que as rebarbas superiores (adaptado de Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).	39
Figura. 2.33:	Condição do microcanal usinado com velocidade de corte de 70000 rpm, velocidade de avanço de 1 mm/s e, condição da ferramenta (a) após 15 minutos; (b) após 30 minutos; (c) após 45 minutos (adaptado de Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).	39
Figura. 3.1:	Centro de usinagem vertical VEGA XH7132.	41
Figura. 3.2:	Microferramenta MS2MSD0040 (adaptado de, MITSUBISHI, 2018).	41
Figura. 3.3:	Esquema da geometria e dimensões dos canais microfresados em uma liga de Al6101.	43
Figura. 3.4:	Microscópio Olympus LEXT OLS4100.	44
Figura. 3.5:	Direção de medição da rugosidade.	45
Figura. 3.6:	Medição da altura das rebarbas.	46
Figura. 4.1:	Valores das rugosidades para o ensaio de microfresamento de uma liga Al 6101 T6.	47
Figura. 4.2:	Presença do efeito ploughing observada no fundo do canal 5.	49
Figura. 4.3:	Desgaste de flanco e ponta quebrada, em uma microfresa revestida de DLC (adaptado de Ziberov, 2018).	50
Figura. 4.4:	Presença de aresta postíça de corte em uma microfresa revestida de DLC, na superfície principal de folga, durante a microusinagem (adaptado de Ziberov, 2018).	50
Figura. 4.5:	Fundo dos canais microusinados em uma liga de alumínio AL6101 T6.	52
Figura. 4.6:	Presença de materiais aderidos ao fundo dos canais microusinados em uma liga de alumínio Al 6101 T6.	53
Figura. 4.7:	Marcações circulares da microfresa (adaptado de Ziberov, 2018).	54
Figura. 4.8:	Marcações circulares da microfresa no microfresamento da liga de alumínio 6101.	54
Figura. 4.9:	Altura das rebarbas concordantes e discordantes para o microfresamento de uma liga de alumínio 6101.	55
Figura. 4.10:	Rebarbas descontínuas observadas no canal 6 do microfresamento de uma liga de alumínio 6101 T6.	56
Figura. 4.11:	Rebarbas curvadas, observadas no canal 4 do microfresamento da liga de alumínio 6101.	57

LISTA DE TABELAS

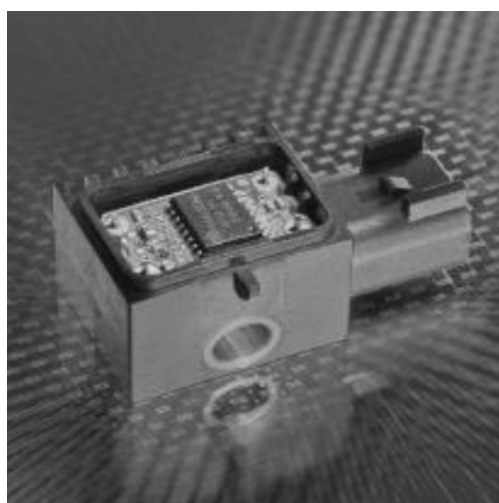
Tabela. 2.1:	Principais elementos de liga e os efeitos de sua adição.	28
Tabela. 2.2:	Séries de liga de alumínio para trabalho mecânico.	29
Tabela. 3.1:	Composição química da liga de alumínio 6101.	40
Tabela. 3.2:	Parâmetros elásticos para a liga de alumínio 6101.	40
Tabela. 3.3:	Parâmetros de corte empregados no microfresamento do alumínio 6061. .	42
Tabela. 3.4:	Parâmetros de corte empregados na preparação da superfície da liga de alumínio 6061.	42
Tabela. 3.5:	Parâmetros de corte por canal.	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO	3
1.2	JUSTIFICATIVA	3
1.3	OBJETIVOS.....	3
1.4	PUBLICAÇÕES	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	MICROUSINAGEM.....	5
2.1.1	EFEITO ESCALA	7
2.1.2	ESPESSURA DE CORTE	9
2.1.3	FORÇAS DE CORTE	10
2.1.4	INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA DO MATERIAL	12
2.2	MICROFRESAMENTO	12
2.2.1	MECANISMO DE CORTE	14
2.2.2	RUGOSIDADE SUPERFICIAL	15
2.2.3	FORMAÇÃO DE REBARBAS.....	19
2.2.4	DESGASTE DA FERRAMENTA	24
2.3	MICROFRESAMENTO DE ALUMÍNIO.....	27
2.3.1	O ALUMÍNIO	27
2.3.2	ANÁLISE INICIAL DO MICROFRESAMENTO DE ALUMÍNIO	29
3	METODOLOGIA.....	40
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	40
3.2	MÁQUINA FERRAMENTA E FERRAMENTA DE CORTE	40
3.3	MICROFRESAMENTO DA AMOSTRA.....	42
3.4	VÁRIAVEIS DE SAÍDA.....	43
3.4.1	RUGOSIDADE SUPERFICIAL	44
3.4.2	ALTURA DAS REBARBAS.....	45
3.4.3	QUALIDADE DA SUPERFÍCIE	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	QUALIDADE SUPERFICIAL.....	47
4.1.1	RUGOSIDADE SUPERFICIAL E IMAGENS DOS CANAIS MICROUSINADOS.....	47
4.1.2	ALTURA DAS REBARBAS	55
5	CONCLUSÕES.....	58
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A crescente necessidade das indústrias por miniaturização de componentes torna os processos de microfabricação mais usuais. Nos anos 60, os componentes industriais miniaturizados eram, basicamente, as peças que compõem os relógios de pulso (Masuzawa, 2000). Algumas áreas, da indústria atual, possuem uma demanda maior para peças micro e nanos, como é o caso das indústrias de fabricação de sensores e das indústrias médicas. Exemplos disso são as produções de sensores de sistemas micro eletro mecânicos, do inglês *Micro-ElectroMechanical*, (Figura 1.1 a) e, sistemas de microdosagem de medicamentos (Figura 1.1 b) (Gomes, 2013; Oliveira, 2019).



(a)



(b)

Figura 1.1: Componentes obtidos através de processos de microfabricação: (a) Módulo de air bag (Tolfree e Jackson, 2007) e, (b) Sistema de microdosagem de medicamentos (TEKNIKER, 2018 apud Gomes, 2013, p. 3).

Existem alguns processos que podem ser aplicados como microfabricação, entretanto, alguns se destacam mais que os outros. É o caso da microusinagem, que é um dos principais processos utilizados na obtenção de peças nano ou micro. As peças produzidas através da microusinagem possuem boa qualidade superficial e exatidão dimensional, além de permitir que diversos tipos de materiais sejam utilizados (Cheng e Huo, 2013). Entretanto, garantir essa boa qualidade superficial ainda é um desafio para os processos de microusinagem, uma vez que a má escolha de parâmetros de corte podem produzir superfícies com elevadas rugosidades e, com a presença de rebarbas (Kiswanto, Zariatn e Ko, 2014; Aslantas et al., 2016).

A microusinagem é definida como o processo de fabricação que varia de dezenas de micrometros a alguns milímetros (Chae, Park e Freiheit, 2006) e, trata-se de um processo que não pode ser resumido a apenas reduzir as dimensões dos processos de usinagem convencionais. Isso porque, uma redução de escala do processo implica em mudança de comportamento de alguns parâmetros, como força de corte, formação de cavacos, etc. Então, para realizar processos em escala

micro, é necessário estudar o efeito escala, que influenciará no comportamento do material a ser usinado (Cheng e Huo, 2013). A diferença de escala entre os processos, implica na dimensão da cunha de corte que, no processo em escala micro, tem a dimensão da microestrutura do material usinado. Dessa forma, a microestrutura do material passa a influenciar no processo, podendo causar aumento na energia de corte (Liu e Melkote, 2007).

O microfresamento se destaca dentre as opções de microusinagem, isso porque, é um método que permite a fabricação de peças com geometrias complexas e, por esse motivo, trata-se do processo comumente utilizado nas mais diversas indústrias. A remoção de material, nesse tipo de processo, é induzida por *ploughing*, fricção, deformação plástica e elástica ao invés do processo de corte. A presença da fricção provoca um aumento na rugosidade superficial e, produz rebarbas, o que prejudica a qualidade superficial da peça usinada (Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014). Para a execução desse processo, é necessário que as microfresas apresentem um diâmetro maior que o da região útil em, por exemplo, 10x. Essa é uma maneira de garantir uma maior rigidez da ferramenta e, conseqüentemente, melhorar a qualidade superficial das peças (Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014; Ziberov, 2018).

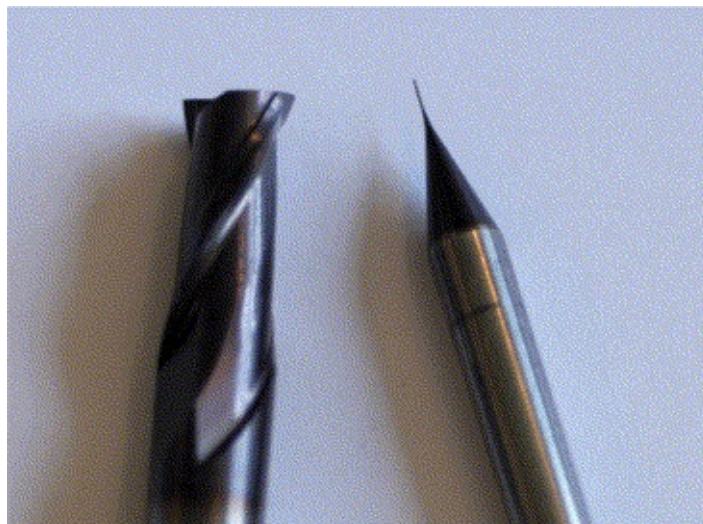


Figura 1.2: Ferramenta de corte do processo de fresamento convencional, e ferramenta de corte do processo de microfresamento (Bissacco, 2004 apud Bissacco, Hansen e Chiffre, 2005).

A ampla maioria dos estudos encontrados na literatura empregam materiais de boa usinabilidade nos processos de escala micro, com o intuito de facilitar as análises que serão estudadas. Nesse sentido, o alumínio é um material com boas propriedades para ser empregado em processos de microusinagem. Apesar de apresentar uma boa usinabilidade e de ser amplamente utilizado nos diferentes tipos de indústrias, o alumínio não é um material amplamente abordado nos estudos de microfresamento. Embora exista uma grande gama de estudos que abordam os parâmetros de corte, e suas influências no microfresamento, é necessário estudar o comportamento do alumínio, pois cada material influencia no resultado final e o conhecimento obtido para um material não pode ser fielmente aplicado a outro (Gomes, 2013).

1.1 MOTIVAÇÃO

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho é a versatilidade encontrada na aplicação do alumínio. Trata-se de um material com grande potencial para ser usado em processos de microusinagem, de maneira geral e, de um material pouco estudado pelos pesquisadores em aplicações de microfresamento. Acredita-se que o processo de microfresamento de alumínio tem um grande potencial para aplicações práticas e teóricas. Além disso, sabe-se que essas ligas tem enorme potencial para serem empregadas em componentes eletromecânicos, que por sua vez são um dos principais grupos de produtos fabricados por microusinagem, junto com moldes e componentes biomecânicos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A escolha da liga de alumínio 6101 se deu devida sua ampla aplicação, nos mais diferentes tipos de indústrias. Por se tratar de um material que apresenta boa usinabilidade e, por ser pouco explorado, optou-se por utilizar essa liga, para que assim, fosse possível observar o seu comportamento.

Com isso, espera-se que o desenvolvimento deste trabalho contribua com a literatura, no que diz respeito a seleção de parâmetros para a obtenção do melhor acabamento da peça, para que então, ela possa ser empregada nos mais diversos setores industriais.

1.3 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo analisar a influência do avanço nos microcanais usinados a partir do microfresamento, utilizando uma microfresa de metal duro com 400 μm de diâmetro e, revestimento de $(\text{Al}, \text{T}_i)\text{N}$, em uma peça de alumínio 6101. Os parâmetros de corte foram selecionados respeitando as limitações da máquina ferramenta. A partir disso, os objetivos específicos são:

- Analisar a rugosidade dos canais;
- Analisar a altura das rebarbas;
- Analisar a qualidade superficial, de maneira qualitativa;

Para todas as análises, serão determinados parâmetros de corte críticos que resultem nos melhores resultados para cada variável.

1.4 PUBLICAÇÕES

Durante o desenvolvimento desse trabalho foi possível elaborar artigos para publicações em congressos. Os artigos podem ser visualizados nos apêndices deste trabalho. São eles:

- i. *Principais características para a baixa usinabilidade do inonel 718 com foco no processo de fresamento.* Publicado no II Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.
- ii. *Influência do avanço na qualidade superficial de uma liga de canais obtidos por microfresamento da liga Al 6101.* Publicado no XXIV Colóquio de Usinagem.
- iii. *Formação de rebarbas no microfresamento de ligas de alumínio.* Publicado no XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM).
- iv. *Desafios no microfresamento de ligas de alumínio.* Publicado no 30º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC).

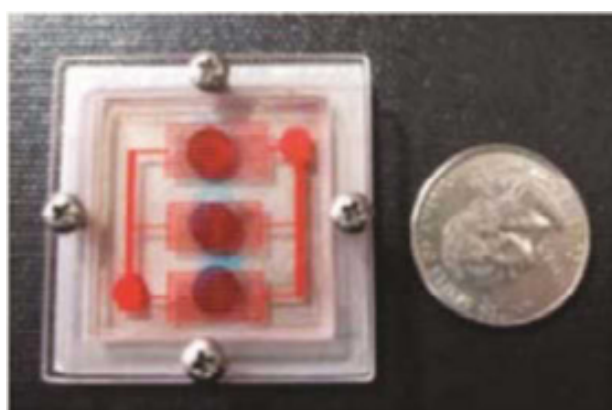
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MICROUSINAGEM

A necessidade de realizar microusinagem surge com o aumento da demanda de peças consideradas micro e nano para o desenvolvimento das tecnologias, essa é uma técnica crucial para a produção dos componentes necessários para a evolução. Microcomponentes são essenciais para áreas como (Chae, Park e Freiheit, 2006):

- Biomédico;
- Aeroespacial;
- Automotivo;
- Ambiental;

No contexto das áreas médicas, a microusinagem pode ser encontrada em dispositivos que atuam como órgãos artificiais, simulando as atividades fisiológicas de órgãos humanos, são os chamados *organs on chips* (Figura 2.1 a) (SUN et al., 2016). Na área ambiental, a microusinagem pode ser encontrada em microsensores ambientais, que são utilizados para monitorar os poluentes do ar e gases odoríficos (Figura 2.1 b) (ENVEA, 2008).



(a)



(b)

Figura 2.1: Presença da microusinagem na área: (a) Médica - Organs on chips (SUN et al., 2016) e, (b) Ambiental - Microsensores Carirsens (ENVEA, 2008).

Na literatura não existe uma única definição para microusinagem, vários autores a definem de formas diferentes. Segundo Ziberov et al. (2016), a microusinagem mecânica é o processo de

fabricação de dispositivos e componentes miniaturizados cujos tamanhos podem divergir de dezenas de microns a vários milímetros. Chae, Park e Freiheit (2006) dizem que, a microusinagem, assim como a usinagem convencional, molda a superfície do material utilizando uma ferramenta de corte. A diferença é que, as ferramentas de corte utilizadas na microusinagem são ferramentas de corte miniaturizadas. A Figura 2.2 apresenta as dimensões envolvidas nos processos de usinagem. Pode-se observar que, o processo de microusinagem é classificado como um processo de alta ou ultra precisão.

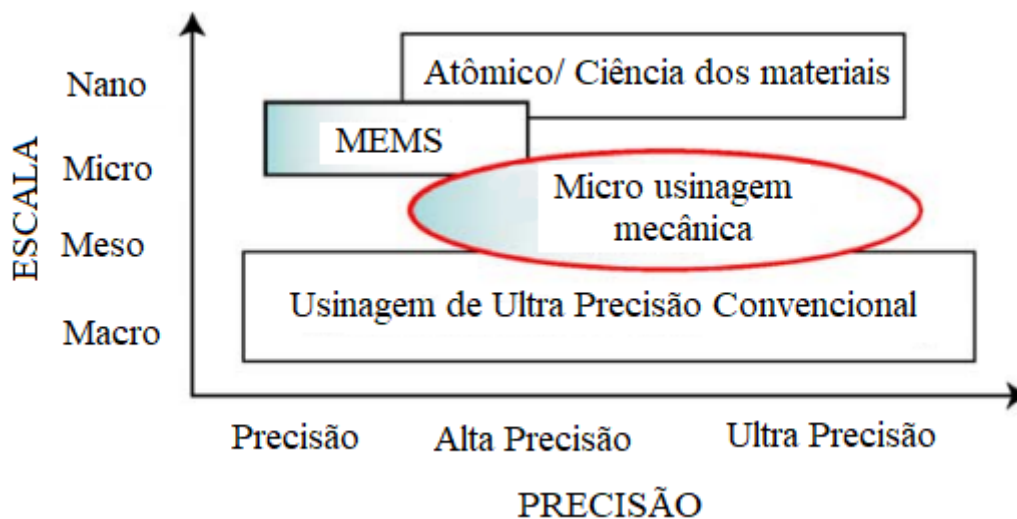


Figura 2.2: Dimensão e precisão do processo de microusinagem (adaptado Chae, Park e Freiheit, 2006).

Na definição de Câmara et al. (2012), os autores dizem que a microusinagem é definida com base nas dimensões das ferramentas de corte, que devem estar em uma faixa de $1\ \mu\text{m}$ a $1000\ \mu\text{m}$. Já Jain (2015) fala que a microusinagem é um processo de fabricação no qual o material é removido diretamente por uma microferramenta. Esse processo também pode ser definido em razão da espessura de corte, sendo esse um dos principais parâmetros para a microusinagem (Venkatesh et al., 2017). Vale ressaltar que, ao contrário do que acontece na usinagem convencional, a aresta de corte de uma microusinagem é maior do que a espessura de corte, conforme definição de Chae, Park e Freiheit, (2006). Classifica-se ainda como microusinagem processos que possuem a espessura de corte variando de $0,01\ \mu\text{m}$ a $200\ \mu\text{m}$ de acordo com Masuzawa e Tönshoff (1997), ou de $0,01\ \mu\text{m}$ a $2\ \mu\text{m}$, segundo Ng et al. (2006) e também, aqueles processos em que a espessura de corte é inferior a $900\ \mu\text{m}$ (Masuzawa, 2000).

Atualmente, diversos setores das indústrias possuem a necessidade de aplicação de microcomponentes, como a indústria eletrônica. Mas, é a área médica que mais se beneficia dos processos de microusinagem (Ziberov et al., 2020). No campo da medicina, pode-se encontrar miniaturização de ferramentas médicas, com o objetivo de reduzir a dor do paciente em uma cirurgia. Além disso, a área necessita de ferramentas que permitam a manipulação de células biológicas e genes e, essas ferramentas devem ter *microefectores* (Masuzawa, 2000). A microusinagem é uma das tecnologias que permitem a medicina alcançar seus objetivos.

A microusinagem vai além do campo da ciência. As aplicações de microusinagem podem ser encontradas nas artes plásticas, por exemplo. Segundo Ziberov (2017), o artista plástico Mykola Syadristy, de origem ucraniana, produziu, em 1969, o que foi considerado o menor xadrez do mundo. As peças do jogo possuem diâmetro médio de $14\ \mu\text{m}$. O diâmetro da base da peça (Figura 2.3) tem $6\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$ de altura e $2\ \mu\text{m}$ na parte superior.

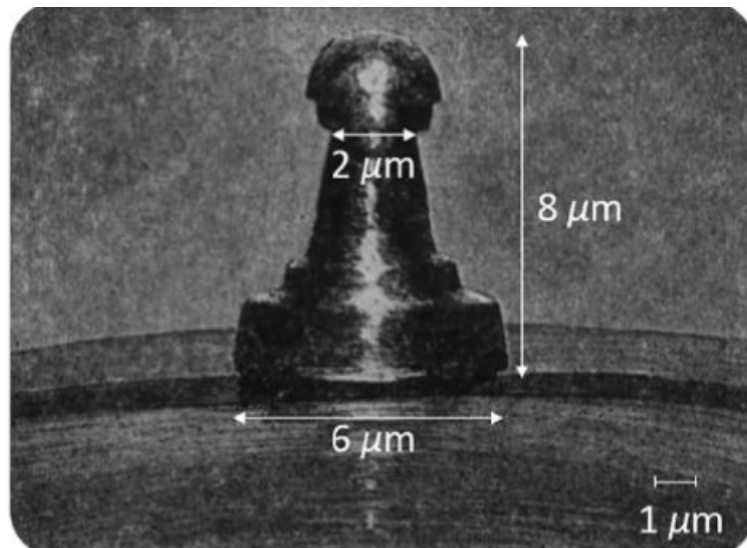


Figura 2.3: Menor peça de xadrez do mundo ((adaptado de SYADRISTY, 1969, p.88 apud Ziberov, 2017).

2.1.1 Efeito escala

Câmara et al. (2012) comentam que, na microusinagem a espessura de corte e o tamanho do grão do material de trabalho apresentam dimensões semelhantes ao raio da aresta de corte. Em função disso, as abordagens frequentemente utilizadas para usinagem convencional, não podem ser aplicadas na microusinagem. Aramcharoen e Mativenga (2009) apontam que, essa redução da espessura de corte e do raio da aresta de corte causam uma diferença nos principais mecanismos do processo macro e micro. É o chamado *efeito escala*. O efeito escala é caracterizado por um aumento considerável da energia específica de corte. Em outras palavras, é o aumento da energia, por unidade de volume de material removido, em função da redução da espessura de corte (Chae, Park e Freiheit, 2006; Liu e Melkote, 2007).

Em consequência da redução do raio da aresta de corte e da espessura de corte, o avanço por dente também é reduzido. Entretanto, o tamanho do grão do material usinado se mantém. Sendo assim, na usinagem convencional a formação de cavacos engloba o cisalhamento de vários grãos. Em contrapartida, na microusinagem o cavaco é formado a partir da usinagem de poucos ou um único grão de cada vez. Essa é uma peculiaridade que se aplica a todos os processos de escala micro e, está representada na Figura 2.4 (Bissacco, Hansen e Chiffre, 2005).

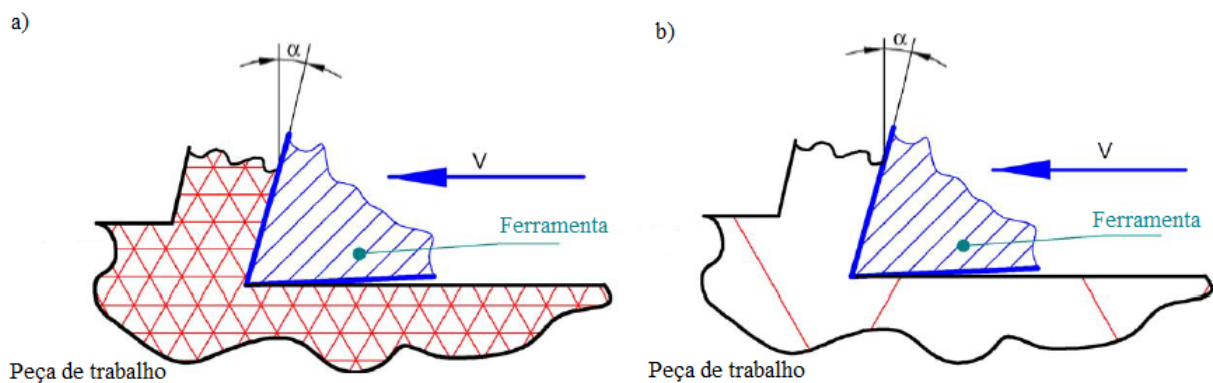


Figura 2.4: Relação entre o tamanho do grão e a espessura de corte para: (a) usinagem convencional e, (b) microusinagem (adaptado de Bissacco, Hansen e Chiffre, 2005).

2.1.1.1 Raio da Aresta de Corte

Na microusinagem o raio da aresta de corte torna-se significativo no que diz respeito a espessura do material a ser removido. As ferramentas possuem um raio de aresta de corte arredondado (Bissacco, Hansen e Chiffre, 2005; Aramcharoen e Mativenga, 2009), devido a limitações do processo. Isso faz com que o raio da aresta seja limitado a valores de $1 \mu\text{m}$ a $4 \mu\text{m}$ (Bissacco, Hansen e Chiffre, 2005).

Na macrousinagem a ferramenta de corte é perfeitamente afiada, de forma que, não existe o contato entre o material e a ferramenta ao longo da superfície de folga. Isso faz com que o material seja removido pela força mecânica de cisalhamento, que acontece como consequência da interação da ferramenta afiada com a peça, resultando na formação de cavaco. Já na microusinagem, quando o tamanho do grão é semelhante a espessura de corte, a aresta arredondada fragmenta apenas um único grão (Aramcharoen e Mativenga, 2009).

A Figura 2.5 contém a representação do efeito do raio da aresta de corte nos processos de usinagem convencional e de microusinagem. Observando a Figura 2.5 nota-se que, na usinagem convencional o ângulo de saída (γ) é praticamente igual ao ângulo nominal da ferramenta. Já no processo de microusinagem, a espessura do corte (h) é bem menor que o raio de corte (r_c), o que gera um ângulo de saída negativo ($-\gamma$). Um ângulo de saída negativo gera a remoção de material nas proximidades do raio da aresta de corte, gerando o efeito *ploughing* (designado como sulcamento), o que provoca uma deformação plástica e/ou elástica do material durante o processo (Bissacco, Hansen e Chiffre, 2005; Aramcharoen e Mativenga, 2009).

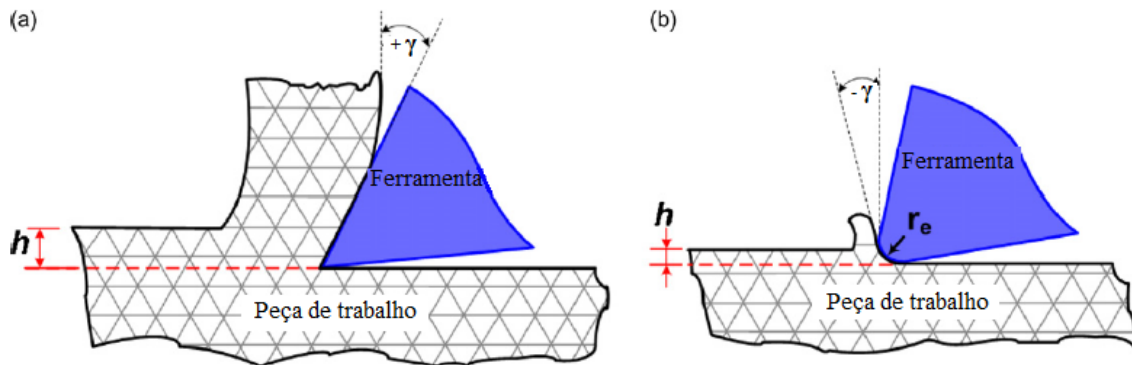


Figura 2.5: Efeito do raio da aresta de corte (a) na usinagem convencional e (b) na microusinagem (adaptado de Aramcharoen e Mativenga, 2009).

A consequência disso, segundo Gomes (2019), é que, ocorre um aumento das forças cisalhantes e, da energia cinética do corte, causada pela recuperação elástica do processo. No estudo de Chae, Park e Freiheit (2006), os autores também abordam esse efeito. Segundo eles, o ângulo de saída negativo afeta a magnitude das forças de corte, em consequência disso, um maior volume de material se torna totalmente plástico para que uma quantidade de material, relativamente pequena, seja removida, gerando então o aumento da energia cinética. Sendo assim, é possível dizer que o raio da aresta de corte influencia na formação de cavacos. Uma consequência do aumento das forças de corte é a aceleração do desgaste da ferramenta, uma vez que ocorre um aumento da deflexão e gera arestas postizas de corte (Chae, Park e Freiheit, 2006).

2.1.2 Espessura de Corte

A espessura de corte (h) é espessura de material que será removido da peça durante o processo de usinagem (Cheng e Huo, 2013). Nos processos de microusinagem, não existe formação de cavacos se a espessura de corte (h) for menor que a espessura mínima de corte (h_m), que por sua vez depende do material da peça e do raio da aresta de corte (Chae, Park e Freiheit, 2006). Assim, para que aconteça a remoção de cavaco, a espessura de corte deve ser maior que a espessura mínima de corte (Chae, Park e Freiheit, 2006). A Figura 2.6 representa um esquema da espessura mínima de corte e remoção do material.

Quando a espessura de corte (h) é menor que a espessura mínima de corte (h_m) (Figura 2.6 a), ocorre uma deformação elástica do material, sem a formação de cavaco. Isso acontece devido ao pequeno ângulo da superfície de folga e da superfície da peça, o que gera apenas atrito (fenômeno *rubbing*). Quando a espessura de corte (h) é aproximadamente igual a espessura mínima de corte (h_m) (Figura 2.6 b), ocorre a formação de cavacos por cisalhamento e, a deformação elástica continua ocorrendo. Ou seja, uma parte do material é retirada por cisalhamento e a outra parte passa por deformação elástica e/ou plástica. Finalmente, quando a espessura de corte é maior que a espessura mínima (Figura 2.6 c), a deformação elástica reduz radicalmente e a formação de cavacos acontece devido ao cisalhamento. Sendo assim, a quantidade de material removido

corresponde a espessura de corte definida (Chae, Park e Freiheit, 2006; Liu et al., 2004).

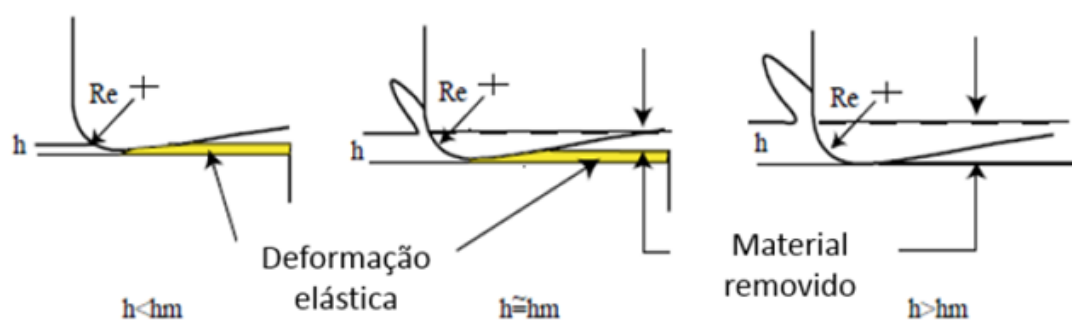


Figura 2.6: Espessura mínima de corte (R_e raio da ferramenta de corte, h - espessura não deformada do cavaco e, h_m espessura mínima do cavaco) (adaptado de Chae, Park e Freiheit 2006).

De acordo com Aramcharoen e Mativenga (2009), a determinação da relação da espessura mínima de corte e o raio da aresta é fundamental para evitar, ou diminuir, o efeito *ploughing*. Essa relação depende do raio da aresta de corte e do material da peça. Sendo assim, é muito complexo determinar a espessura mínima do cavaco durante um processo, mesmo que se conheça a aresta de corte (Chae, Park e Freiheit, 2006).

Na literatura, é possível encontrar diferentes formas de determinação para essa espessura mínima de cavaco. Alguns autores empregam o uso de elementos finitos (FE) ou, previsões experimentais. No trabalho de Malekian, Park e Jun (2009), os autores definiram que a espessura mínima de corte, para o microfresamento de uma liga de alumínio Al6061-T6, equivale ao raio da aresta de corte multiplicado por 0,23. Já Yuan, Zhou e Dong (1996), estimaram que a espessura mínima de corte varia entre 20% e 40% do raio da aresta de corte.

2.1.3 Forças de Corte

As forças de corte são um parâmetro importante a ser estudado nos processos de microusinagem. Durante o processo, existem forças atuantes nos elementos da máquina ferramenta, ferramenta e peça. Estudar essas forças faz com que seja possível estimá-las. As forças de corte também podem influenciar nos requisitos da potência necessária para o corte, na condição da ferramenta de corte e no resultado final da usinagem (Machado et al., 2009, p. 77).

As forças do processo de usinagem são as forças totais que atuam sobre a cunha cortante. As componentes das forças de corte estão no plano ortogonal, sendo as mais relevantes aquelas que estão contidas no plano de trabalho e no plano efetivo de referência (Ferraresi, 2018). As forças de corte possuem três componentes (Figura 2.7) que agem diretamente na cunha cortante e, por decorrência, no processo (Machado et al., 2009, p. 78). São elas:

- Força de corte ou força principal de corte (F_c): é a força projetada no plano de trabalho, na

direção do corte. É causada pela velocidade de corte (Machado et al., 2009, p. 78).

- Força de avanço (F_f): é a força projetada no plano de trabalho, na direção do avanço. É causada pela velocidade de avanço (Machado et al., 2009, p. 78).
- Força passiva ou força de profundidade (F_p): é a força perpendicular ao plano de trabalho (Machado et al., 2009, p. 78).

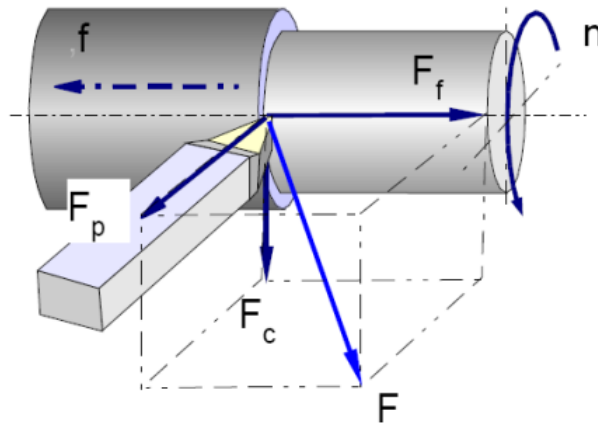


Figura 2.7: Componentes da força de corte no processo de usinagem (STOETERAU, 2003).

Segundo Cheng e Huo (2013), ao contrário do que acontece no processo convencional (macro) de usinagem, reduzir a espessura de corte pode aumentar a energia específica, que é a quantidade de energia necessária para a remoção de um volume unitário de material e, é definida pela razão entre a potência de corte e a taxa de remoção. O efeito da espessura de corte, na força de corte, é incerto. Segundo, Bissacco, Hansen e Chiffre (2005), a força pode ser elevada devido ao aumento da seção transversal, mas, também pode ser reduzida por esse mesmo efeito, uma vez que o ângulo de saída da ferramenta se torna mais positivo e diminui o efeito de *ploughing*.

No estudo de Kim e Kim (1995), é possível encontrar algumas diferenças analíticas para as forças de corte no processo de macrousinagem e no processo de microusinagem. No processo de usinagem convencional (macro), as forças de cisalhamento ocorrem ao longo do plano de cisalhamento e, no processo de microusinagem, a tensão de cisalhamento aumenta de forma contínua nas proximidades da aresta de corte.

Nos estudos de Liu et al. (2004), fica evidente que os efeitos da vibração da ferramenta e a recuperação elástica da peça influenciam na amplitude das forças de corte, em baixas taxas de avanço fazendo com que este efeito também interfira nas forças de corte. Taxas de avanço muito baixas geram uma instabilidade, em razão da deflexão elástica da peça e, em consequência disso, ocorre uma variação na espessura do cavaco, gerando a vibração.

Assim, não é possível utilizar os modelos que são frequentemente utilizados nos processos de macrousinagem para antever as forças de corte nos processos de microusinagem. Isso porque nos processos micro, a profundidade de corte é repetidamente menor que a espessura mínima de

formação de cavaco, o que é utilizado para manter as tolerâncias e, evitar a quebra da ferramenta. Porém, essa diferença de tamanho entre a espessura de corte e a espessura mínima de cavaco cria um ângulo de saída negativo significativo entre a ferramenta de corte e a peça usinada. Além disso, alguns outros fatores, como a deflexão da ferramenta e os efeitos elásticos-plásticos do material da peça, não podem ser ignorados na análise das forças (Chae, Park e Freiheit, 2006). De maneira semelhante ao que acontece com a espessura mínima de corte, muitos autores recorrem a simulação de elementos finitos para determinar as forças de corte de um processo, além dos modelos numéricos e analíticos.

2.1.4 Influência da microestrutura do material

Nos processos de microusinagem os tamanhos dos grãos dos materiais possuem extrema importância, uma vez que a espessura de corte possui dimensões aproximadas aos grãos. Desse modo, ao contrario do que acontece no processo macro, a formação de cavacos acontece dentro de um único grão (Bissacco, Hansen e Chiffre 2005).

O estudo de Chae, Park e Freiheit (2006) mostra que, na usinagem convencional, o corte acontece em vários grãos simultaneamente, isso permite dizer que, as propriedades mecânicas dos materiais são mais relevantes que as propriedades dos grãos. Dessa forma, os materiais utilizados em usinagem convencional são homogêneos e isotrópicos. Já no processo de microusinagem, o corte acontece em um único grão, que podem possuir diferentes orientações cristalográficas e propriedades. Esses fatores podem influenciar na força de corte, na energia específica, no acabamento da peça e na vibração da ferramenta durante o processo. Sendo assim, é possível dizer que na microusinagem os materiais são heterogêneos e anisotrópicos (Cheng e Huo, 2013; Chae, Park e Freiheit, 2006).

2.2 MICROFRESAMENTO

Os processos de microfresamento são amplamente empregados na fabricação de micro peças com geometria complexa, para uma vasta gama de materiais de engenharia (Vogler, DeVor e Kapoor, 2003). Esse tipo de processo emprega microfresas de topo, cujo diâmetro pode variar de 100 μm a 500 μm (Cardoso e Davim, 2012). O efeito de escala que esse tipo de processo está submetido torna-o divergente do processo de fresamento habitual, entretanto as grandezas de processo bem como o formato e a nomenclatura das ferramentas são iguais, já que a cinemática é a mesma (Fleischer et al., 2008). A Figura 2.8 aborda o processo de microfresamento, onde a_p representa a profundidade de corte e a_e a penetração de trabalho.

Para uma melhor qualidade da peça microusinada alguns autores indicam a otimização de alguns parâmetros do processo. Assim, o microfresamento apresenta alguns fatores que devem ser levados em consideração, representados na Figura 2.9. Para alcançar um bom desempenho durante o processo de corte é necessário a combinação de alguns fatores, que devem ser cuidadosamente

selecionados, como velocidade de corte, profundidade de corte, fluido de corte, sentido do corte e, avanço por dente. Em relação as ferramentas de corte, os dois fatores mais importantes são o material da ferramenta e, a geometria. Esses fatores podem influenciar no desempenho. Para um material ser considerado bom para uma ferramenta, ele deve apresentar uma combinação de alta dureza e tenacidade e estabilidade química a altas temperaturas (Cheng e Huo, 2013).

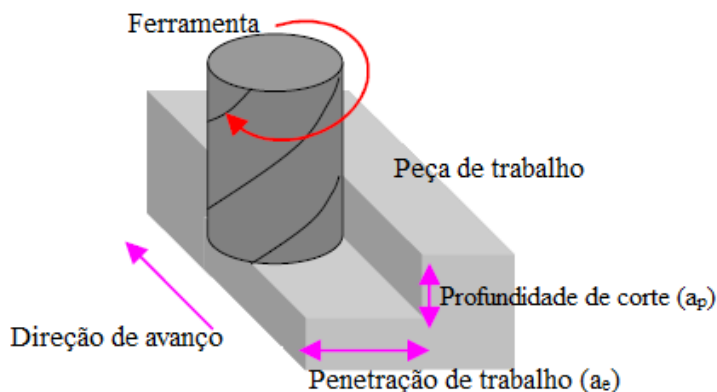


Figura 2.8: Processo de microfresamento (adaptado de Shizuka et al., 2011).

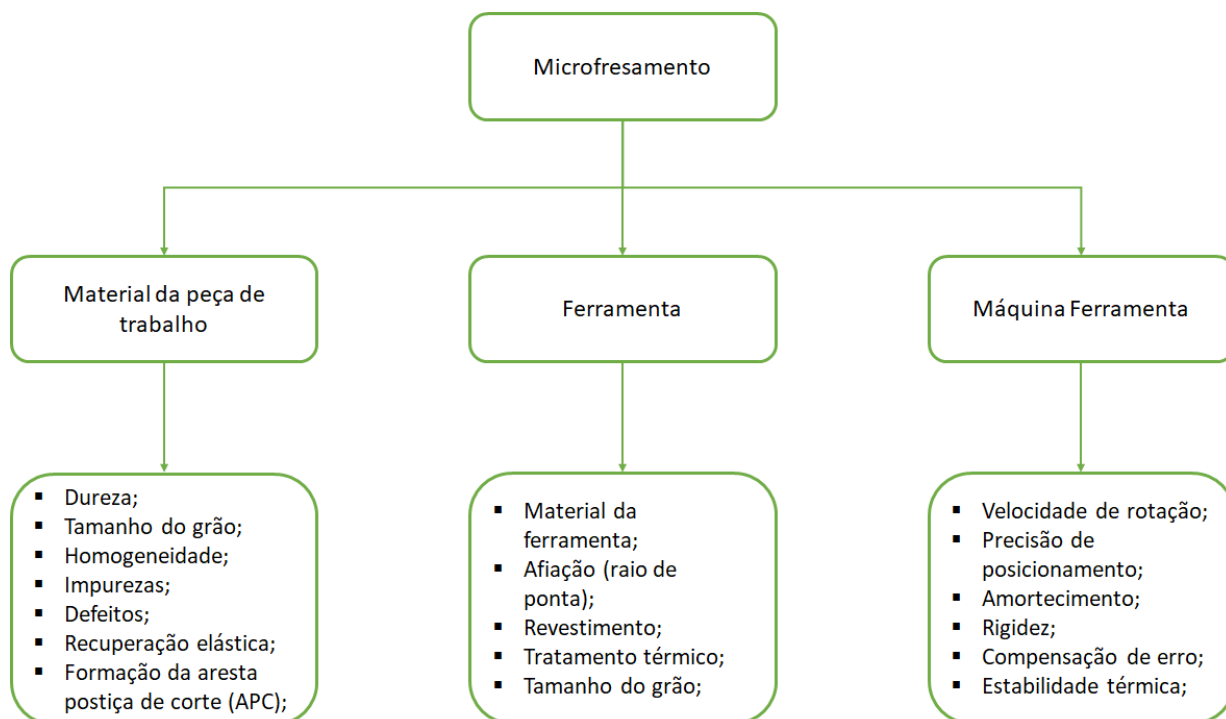


Figura 2.9: Principais fatores ao estudar microfresamento (adaptado de Câmara et al., 2012).

Para garantir uma alta precisão dimensional e, boa qualidade da superfície, as máquinas-ferramentas devem apresentar uma alta rigidez estática, amortecimento e, elevada precisão de movimentação, além de uma alta velocidade de corte, para que seja possível alcançar um ótimo desempenho durante o processo de corte e, altas taxas de remoção de material. Devido aos peque-

nos diâmetros encontrados nas ferramentas de corte, as máquinas-ferramentas devem obter uma alta capacidade de rotação e uma baixa excentricidade (Cheng e Huo, 2013).

2.2.1 Mecanismo de Corte

De acordo com o estudo de Gomes (2019), o microfresamento frontal é um processo no qual o eixo da ferramenta de corte é perpendicular a direção de avanço. Normalmente, a ferramenta possui mais de uma aresta de corte, que rotaciona em torno do seu próprio eixo. A peça é fixada na mesa da máquina ferramenta e, é ela que realiza o movimento de avanço; sendo assim, cada aresta de corte entra e sai da peça a cada movimento da mesa. Durante o processo, a cada passagem da ferramenta de corte, a espessura de corte (h) vai de zero, até o valor permitido do avanço por dente e , retorna para zero. É por esse motivo que algumas regiões não geram cavaco, pois haverá regiões em que a espessura de corte será menor que a mínima. É possível observar essa diferença de espessura de corte na Figura 2.10.

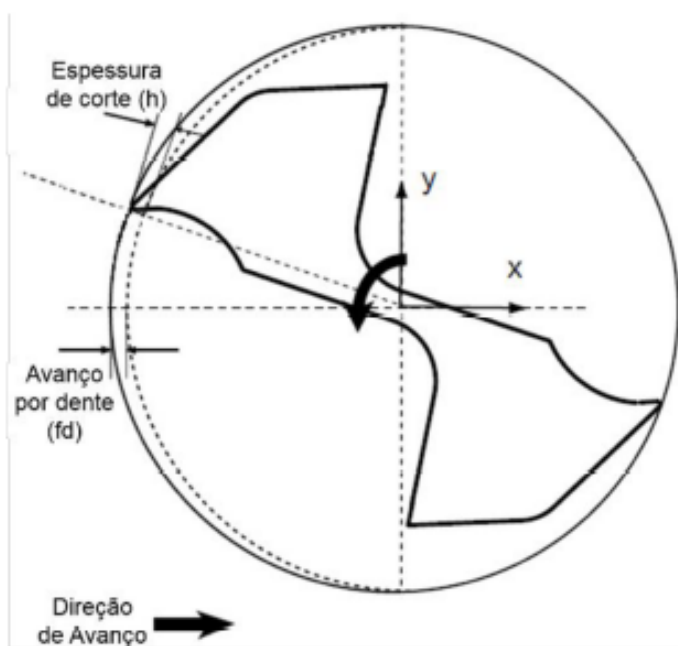


Figura 2.10: Variação da espessura de corte durante o microfresamento (Gomes, 2019).

Definir o avanço por dente em um processo de microfresamento não é tarefa fácil, uma vez que, conforme for o valor, não será possível a formação de cavacos, nos casos em que o avanço por dente é menor que a espessura de corte, onde os principais mecanismos são o *ploughing* e o atrito (Cheng e Huo, 2013). Segundo Bayesteh, Ko e Jun (2016), quando o avanço por dente é maior que a espessura de corte, acontece o *ploughing* e o cisalhamento. O *ploughing* ocorrerá na entrada e na saída da ferramenta, enquanto o cisalhamento ocorrerá na região que haverá formação de cavaco, onde a espessura de corte é maior que a espessura mínima, conforme apresentado na

Figura 2.11.

A variação da espessura de corte define também o movimento da ferramenta de corte, que pode ser concordante ou discordante. O microfresamento discordante acontece quando a espessura de corte inicia-se em zero e aumenta até aproximar-se do valor de avanço por dente (f_z), nessa situação, os sentidos da velocidade de corte e de avanço são opostos. Já no microfresamento concordante a espessura de corte coincide com o valor do avanço por dente logo no início, ou seja, começa com o seu valor máximo e depois decresce até zero. O sentido do avanço e da velocidade de corte coincidem para o microfresamento concordante (Bayesteh, Ko e Jun, 2016).

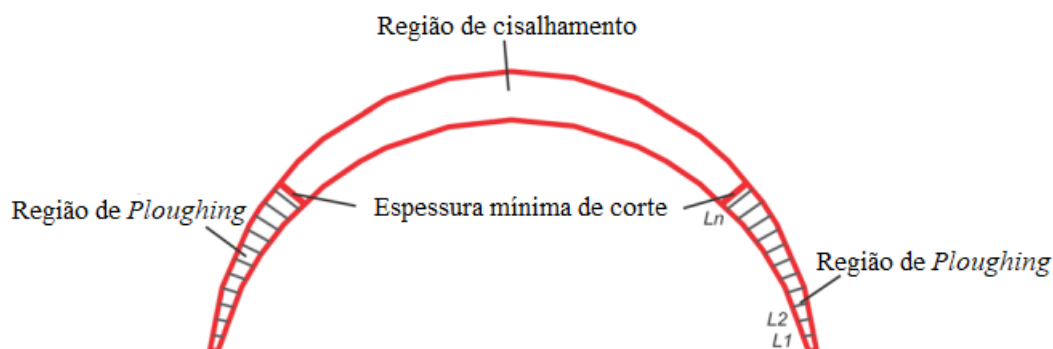


Figura 2.11: Mecanismos de corte no microfresamento frontal (adaptado de Bayesteh, Ko e Jun, 2016).

2.2.2 Rugosidade superficial

De acordo com Machado et al. (2009, p. 278), a rugosidade de uma superfície pode ser composta por irregularidades finas ou erros microgeométricos, que são resultados do processo de corte. A rugosidade da superfície pode ser usada como parâmetro de saída para obter controle sobre um processo de usinagem. Alguns parâmetros como, a máquina ferramenta empregada, a geometria e material da ferramenta, as propriedades do material da peça e operação de usinagem, influenciam na rugosidade superficial.

A rugosidade de uma superfície pode ser avaliada a partir dos parâmetros de amplitude, parâmetros de espaço e, parâmetros híbridos. Os parâmetros de amplitude são determinados pelas alturas dos picos, profundidade dos vales, ou ambos. Já os parâmetros de espaço dizem respeito ao espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície e, por fim, os parâmetros híbridos são determinados pela combinação dos outros dois parâmetros. O R_a é aplicado como um parâmetro de processo e é o parâmetro de altitude mais empregado. Alteração de valores nesse parâmetro refletem alterações no processo, particularmente no desgaste da ferramenta (Machado et al., 2009, p. 280).

Segundo Huo e Cheng (2013), a rugosidade superficial está relacionada com o efeito escala pois, menores espessuras resultam em menores rugosidades. Alguns estudos mostram que a partir de um determinado valor, a diminuição da espessura de corte produz um aumento na rugosidade. Desta forma, existe um avanço que produz a menor rugosidade superficial e está associado à

espessura mínima de corte.

No trabalho de Aslantas et al. (2016), os autores estudaram o desempenho de corte de uma liga de titânio, Ti_6Al_4V , com microfresas de topo, de dois canais, com $508 \mu m$ de diâmetro e revestidas de NCD e, raio de aresta na faixa de $1,45 \mu m$ e $1,92 \mu m$, com velocidade de corte de 20000 rpm , profundidade de corte de $100 \mu m$ e, avanço por dente de $0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 2,5, 4 \mu m/dente$, por fim, o comprimento de corte adotado pelos autores foi de 20 mm . Nesse estudo, os autores analisaram a rugosidade superficial da peça microfresada e notaram que, o valor da rugosidade aumenta quando o avanço por dente é menor que $0,5 \mu m/dente$. Já para valores mais elevados de avanço por dente, a rugosidade também sofre um aumento, como pode ser observado na Figura 2.12. Sendo assim, para as condições adotadas no trabalho dos autores, o valor crítico para avanço por dente é de $0,5 \mu m/dente$. Quando o avanço por dente é menor que o valor crítico, os autores notaram que a razão $f_z/Re < 0,4$ e, conseqüentemente, o corte não é concluído. Portanto, a região de $f_z \leq 0,5$ é a região de sulcamento.

No trabalho de Filiz et al. (2007), os autores estudaram o microfresamento de uma liga de cobre 101 puro. As microfresas adotadas foram microfresas de tungstênio, com $254 \mu m$ de diâmetro, com velocidades de corte de $40, 80$ e 120 m/min , avanço de $0,75, 1,5, 3$ e $6 \mu m/aresta$ e, profundidade de corte de $30 \mu m$. Os autores avaliaram a rugosidade superficial em função do avanço e da velocidade de corte, como pode ser notado na Figura 2.13. Eles constataram que, nas maiores velocidades de corte, 80 m/min e 120 m/min , a rugosidade superficial se manteve constante até $3 \mu m/aresta$ e, para maiores avanços, a rugosidade começa a aumentar, quando o cisalhamento se torna predominante. As rugosidades medidas foram maiores que as rugosidades teóricas, o que significa que a espessura mínima de corte, os efeitos de *ploughing* e da recuperação elástica, influenciam na rugosidade superficial.

Para a menor velocidade de corte, 40 m/min , a rugosidade se manteve constante até, aproximadamente, $1,5 \mu m/aresta$. Entre $1,5$ e $3 \mu m/aresta$ a rugosidade sofreu um aumento e, entre 3 e $6 \mu m/aresta$, a rugosidade sofreu uma redução. Essa redução não foi explicada, uma vez que não teve sua causa definida. Dessa forma, os autores concluíram que, os melhores acabamentos superficiais são obtidos nos menores avanços (Filiz et al., 2007).

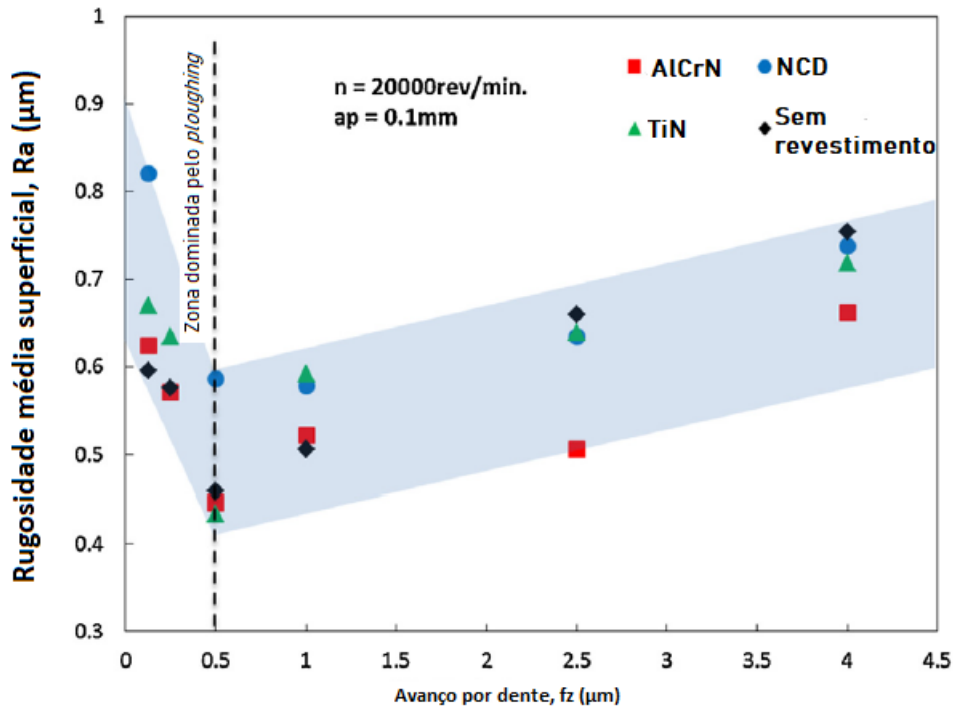


Figura 2.12: Variação da rugosidade média da superfície, Ra, com valores de avanço por dente, na microusinagem da liga Ti_6Al_4V (adaptado de Aslantas et al., 2016).

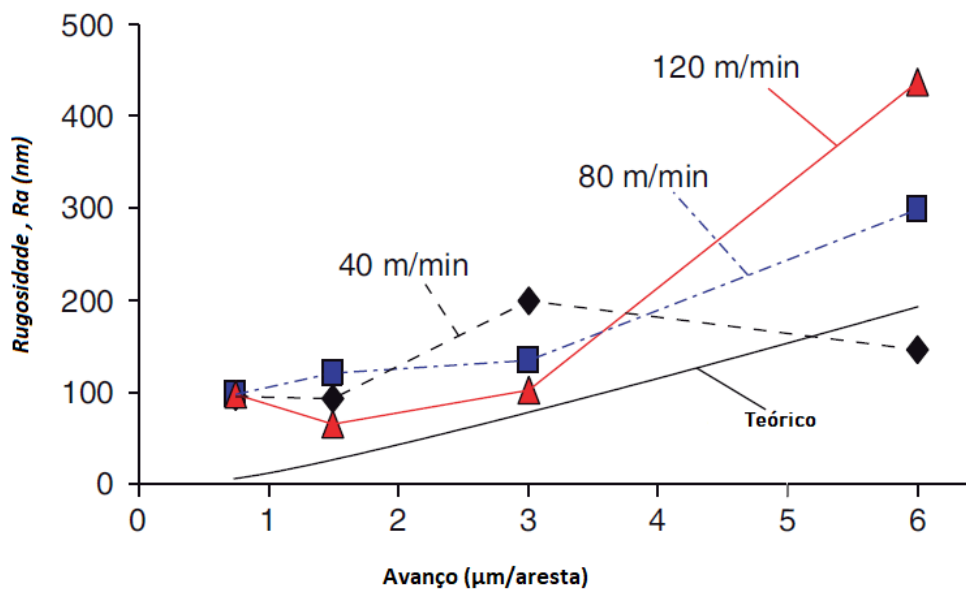
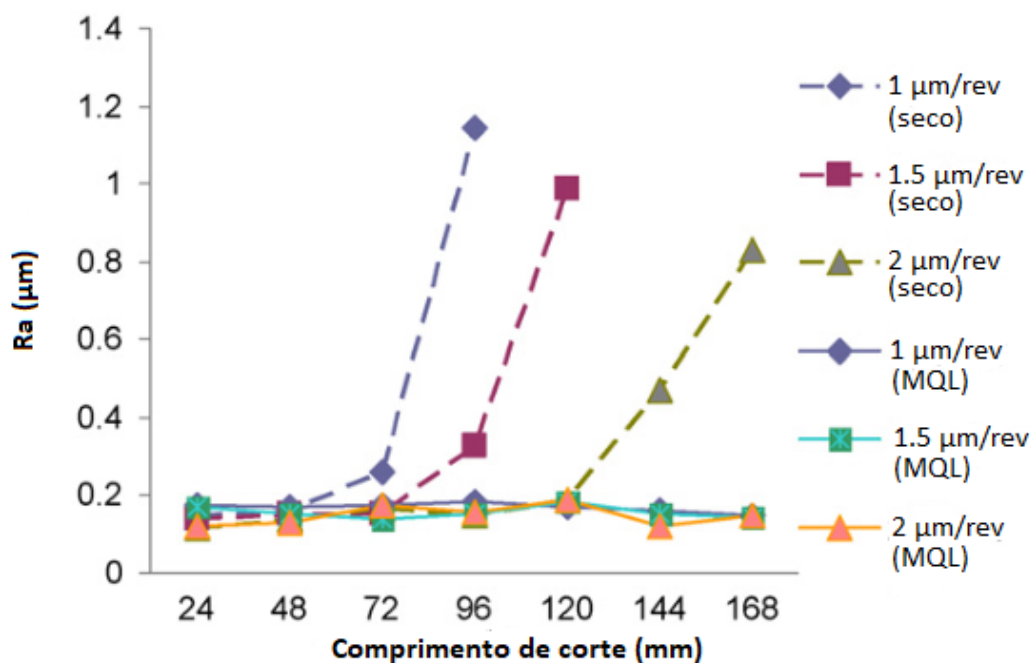


Figura 2.13: Rugosidade superficial média, R_a , em função do avanço e da velocidade de corte (adaptado de Filiz et al., 2007).

Quando uma microusinagem é realizada utilizando fluido de corte têm-se um melhor acabamento da peça. Nesse contexto, Li e Chou (2010), avaliaram o efeito da mínima quantidade de

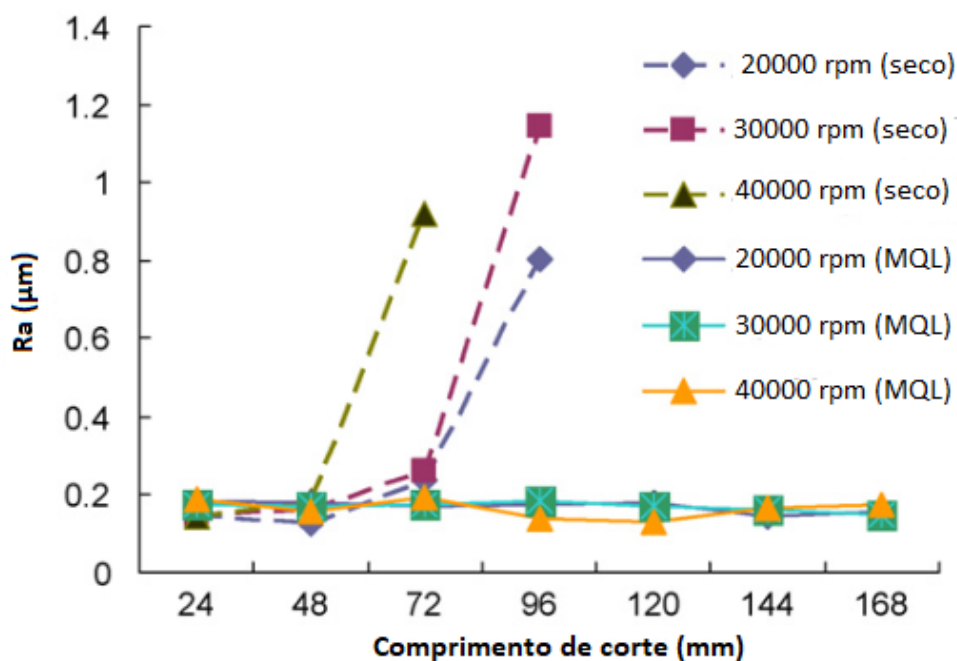
lubrificação (MQL) no microfresamento de um aço SKD 61. Os autores relataram que, com o uso do fluido de corte, a rugosidade superficial não sofre grandes alterações, mesmo com diferentes avanços ou comprimentos de corte. Ao contrário do que acontece no microfresamento a seco, onde a rugosidade superficial sofre alteração conforme o comprimento de corte e os avanços.

Com o uso do fluido de corte, os autores relataram que, o valor de R_a não ultrapassou $0,2 \mu\text{m}$, conforme mostra a Figura 2.14. A Figura 2.14 (b), mostra os valores obtidos para a rugosidade superficial na condição de microfresamento a seco e com o uso do fluido de corte, para diferentes velocidades de rotação. Mesmo com a alteração da velocidade, é notório que o comportamento da rugosidade se mantém, ou seja, a rugosidade da superfície, em condição MQL, não sofre grandes alterações. É importante ressaltar que, os valores da rugosidade superficial, no corte a seco, sofrem influência do desgaste do flanco da ferramenta. Isso explica o aumento elevado que a rugosidade apresenta a partir de determinados comprimento de usinagem, sabe-se que o comprimento de usinagem está diretamente relacionado com o desgaste, e dessa forma, este salto no valor de rugosidade para as diferentes condições está associado, segundo os autores, ao aumento do desgaste de flanco.



(a)

Figura 2.14: Rugosidade da superfície sob condições secas e MQL para (a) diferentes avanços e, (b) diferentes velocidades (adaptado de Li e Chou 2010)



(b)

Continuação da Figura 2.14: Rugosidade da superfície sob condições secas e MQL para (a) diferentes avanços e, (b) diferentes velocidades (adaptado de Li e Chou 2010).

2.2.3 Formação de Rebarbas

Entende-se por rebarbas as projeções indesejadas de material na aresta de um componente usinado devido à deformação plástica, que podem afetar as tolerâncias dimensionais, causar distorções e, reduzir a eficiência e vida de um componente (Avila et al. 2004). A presença de rebarbas é inevitável nas operações de usinagem. Em processos de microusinagem a remoção de rebarbas torna-se crítica, em razão do tamanho das peças (Gomes, 2019).

As rebarbas merecem atenção, dado que a sua formação pode interferir diretamente na qualidade final da superfície microusinada e na funcionalidade da peça. Deve-se tomar cuidado no manuseio de rebarbas, uma vez que elas apresentam riscos de corte. Assim como na usinagem convencional, os processos de rebarbação são importantes, porém, os processos convencionais não são diretamente replicados na microusinagem, por causarem erros dimensionais e tensões residuais nos microcomponentes (Lee e Dornfeld, 2002).

Santos et al. (2015) estudaram o microfresamento do aço inoxidável duplex UNS 32205 com microfresas de metal duro revestidas de TiN, com um diâmetro de 381 µm. Os parâmetros de corte utilizados pelos autores foram avanços de 2 µm/volta e 3 µm/volta, profundidade de corte de 10 µm e 30 µm e, velocidades de corte de 20.000 rpm e 30.000 rpm. As rebarbas obtidas no processo foram analisadas e, notaram-se que elas apresentaram dimensões de, aproximadamente 70 µm, que são consideradas elevadas. Entretanto os autores observaram que esse fenômeno não apresentou correlação com os parâmetros de processo analisados, relacionando-o com a comple-

xidade do processo.

As rugosidades dos canais também foram observadas. Notou-se que, a rugosidade sofreu pouca influência com a variação da velocidade de rotação, porém a rugosidade foi afetada pelo avanço. Quando o avanço passou de 2 μm para 3 μm a rugosidade (R_a) sofreu uma redução que variou de 0,001 μm e 0,002 μm . Segundo o estudo, a profundidade de corte foi o fator que apresentou maior influência na rugosidade, provocando uma redução de 0,01 μm com a variação de $a_p = 30 \mu\text{m}$ para $a_p = 10 \mu\text{m}$. Os resultados dos canais, após as variações de parâmetros, podem ser observados na Figura 2.15 (Santos et al., 2015).

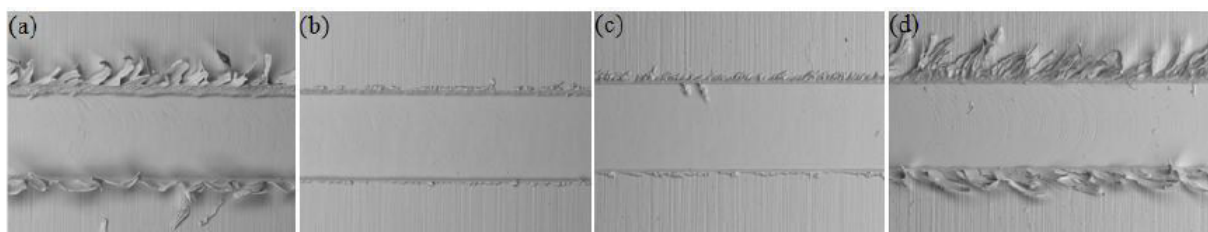


Figura 2.15: Imagens dos canais obtidas via MEV: (a) $a_p = 30 \mu\text{m}$, $f_z = 3 \mu\text{m}$ e $n = 20000 \text{ rpm}$; (b) $a_p = 30 \mu\text{m}$, $f_z = 3 \mu\text{m}$ e $n = 30000 \text{ rpm}$; (c) $a_p = 10 \mu\text{m}$, $f_z = 3 \mu\text{m}$ e $n = 20000 \text{ rpm}$ e, (d) $a_p = 10 \mu\text{m}$, $f_z = 3 \mu\text{m}$ e $n = 30000 \text{ rpm}$ (Santos et al., 2015).

No estudo de Lee e Dornfeld (2002), os autores caracterizam algumas rebarbas conforme sua localização, que estão demonstradas na Figura 2.16. Aos estudarem a formação de rebarbas em um alumínio 6061-T6 e cobre 110, em função dos parâmetros de usinagem, eles notaram que as rebarbas do tipo rebarba de entrada, rebarba de entrada lateral concordante, rebarba de topo concordante e discordante, rebarba de saída e rebarba de saída lateral discordante, são os tipos que sofrem influência dos parâmetros de corte em suas formações. Isso porque a rebarba de entrada lateral discordante, a rebarba de saída lateral concordante e a rebarba de entrada na parte inferior do microcanal são mínimas. Um resultado semelhante foi encontrado no trabalho de Santos (2016) que demonstrou, no estudo do microfresamento de um aço inoxidável duplex UNS S32205, que as rebarbas de entrada e saída na parte inferior do canal, a rebarba de entrada lateral discordante e a rebarba de saída lateral concordante foram mínimas.

As rebarbas de topos são as mais estudadas pelos pesquisadores da área, visto que elas são as maiores rebarbas em um processo de microusinagem. As rebarbas de topo podem ser de diferentes formas, como mostra o estudo de Chern et al. (2007). Os autores estudaram a formação de rebarbas na microusinagem e dividiram-as em quatro tipos: rebarba primária, rebarba em forma de agulha, rebarba pena e, rebarba menor. A Figura 2.17 ilustra os quatro tipos de rebarbas identificadas pelos autores. As rebarbas primárias são formadas quando a ferramenta não é capaz de gerar cavaco e existe então só o atrito. O material disposto na frente da microfresa é empurrado deformando-se plasticamente (Figura 2.18 (a)). A partir desse processo ocorre uma fratura próxima ao centro (Figura 2.18 (b)) e, a rebarba primária se forma (Figura 2.18 (c)) e então, a rebarba primária se curva até atingir um comprimento que pode chegar a ser a metade do diâmetro da microfresa (Figura 2.18 (d)). A Figura 2.18 ilustra todo esse processo.

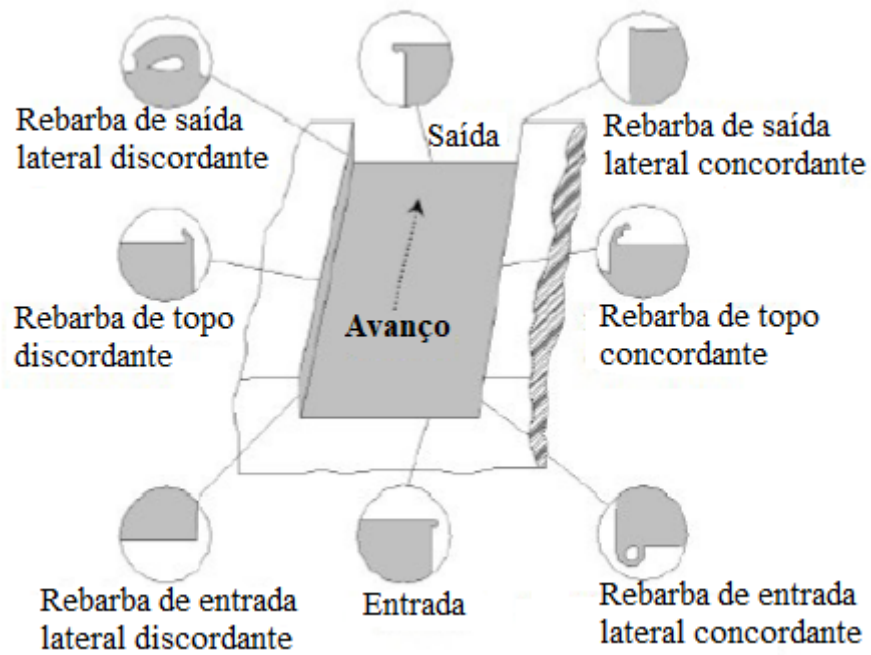


Figura 2.16: Classificação das rebarbas no processo de fresamento (adaptado Lee e Dornfeld, 2002).

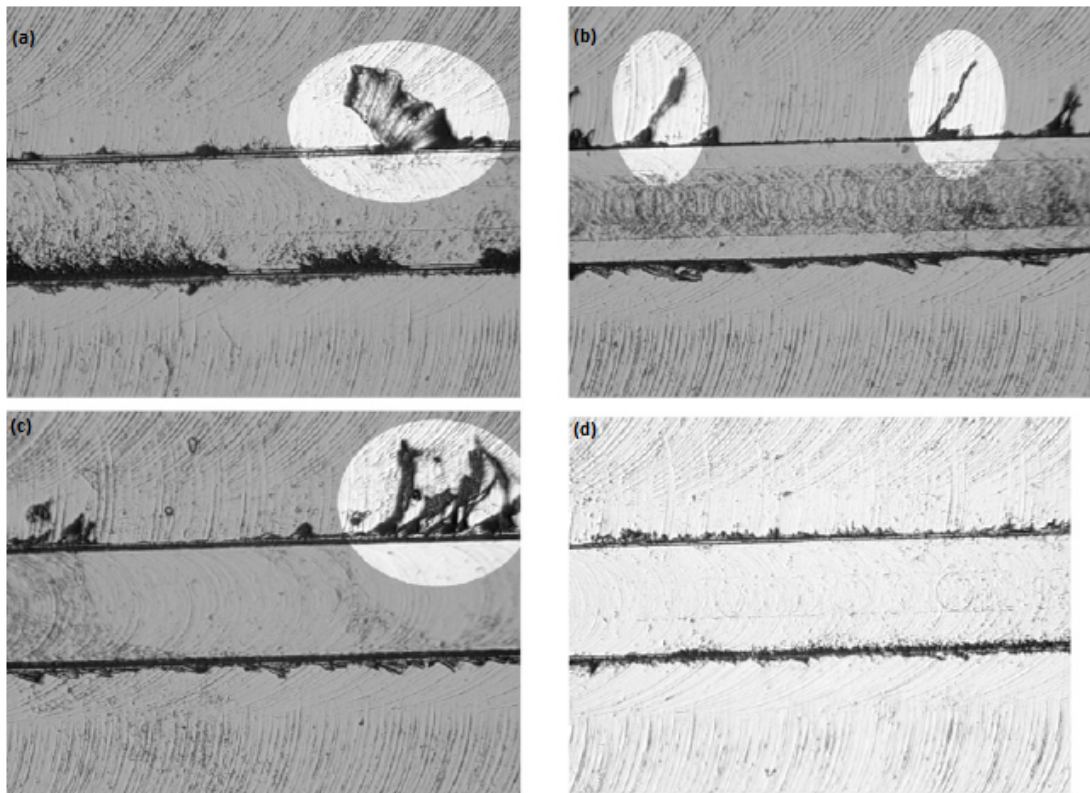


Figura 2.17: Tipos de rebarbas na microusinagem: (a) rebarba primária, (b) rebarba em forma de agulha, (c) rebarba tipo pena e, (d) rebarba menor (Chern et al., 2007).

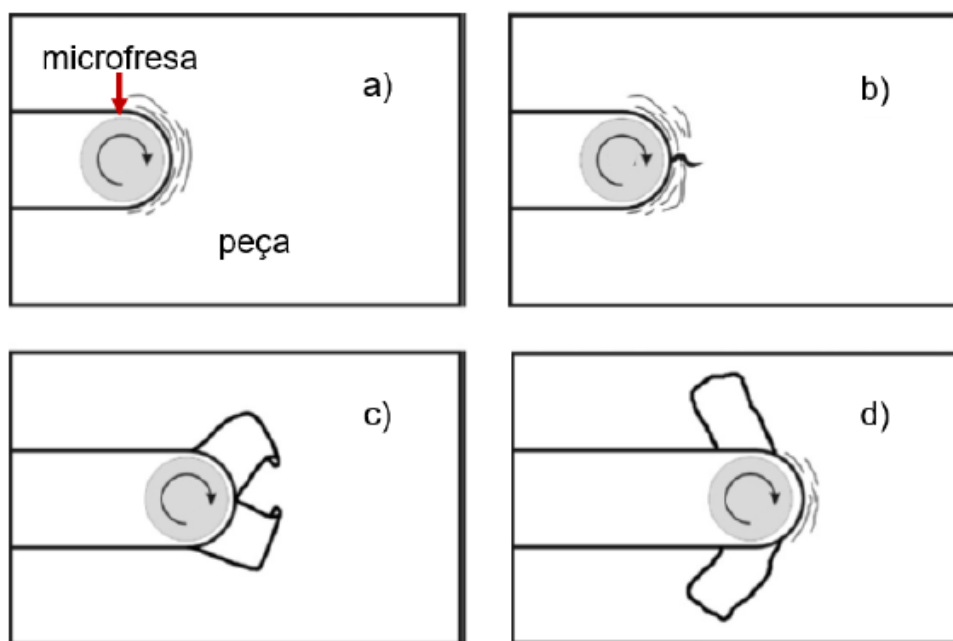


Figura 2.18: Formação de rebarba primária em microfresamento, onde: a) deformação elástica do material, b) fratura do material deformado, c) rebarba se curva e d) início de um novo ciclo (adaptado de Chern et al., 2007).

Zhang, Yuan e Wang (2017), analisaram a influência dos parâmetros de corte empregados no microfresamento de um alumínio 6061-T6. A ferramenta utilizada foi de metal duro de grão fino e diâmetro de $500 \mu\text{m}$. Os parâmetros escolhidos para a análise das rebarbas foram: velocidades de corte de 7500, 8500, 9500, 10500, 11500 e, 12500 rpm; avanço por dente de 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0 e $4,0 \mu\text{m/z}$; profundidade de corte de 30, 40, 50, 60, 70 e $80 \mu\text{m}$.

Os autores perceberam que, quanto maiores os valores dos parâmetros, maiores serão as rebarbas. Para velocidades de corte variando de 7500 rpm a 10500 rpm, os autores relataram que as rebarbas sofrem ligeiro aumento em suas dimensões. Existe uma zona crítica de velocidade (9500 rpm a 10500 rpm) que leva a menores dimensões das rebarbas, isso pode ser explicado pelo aumento da velocidade de corte, que provoca apenas uma maior taxa de remoção do material. Com o aumento contínuo da velocidade de corte, ocorre o aumento da taxa de remoção do material e, essa torna-se dominante durante o processo, fazendo com que as dimensões das rebarbas aumentem gradativamente.

Analisando o avanço por dente notou-se que, quando esse era igual ao valor da espessura mínima de corte as rebarbas sofreram redução de tamanho. Isso ocorre porque o efeito *ploughing* deixa de prevalecer. Se o avanço por dente for maior que a espessura mínima, então haverá um aumento no tamanho das rebarbas. Ainda, os autores perceberam que as rebarbas aumentam também em função da profundidade de corte. O estudo mostrou que, as rebarbas tendem a aumentar com a mudança de profundidade de corte, na condição de velocidade de corte de 10500 rpm e um avanço por dente de $4 \mu\text{m}$. A justificativa para tais aumentos é que a remoção de material é maior nessas condições, o que acaba gerando também um desgaste na ferramenta.

Os autores observaram também que o tamanho das rebarbas são diretamente afetados pela

condição da ferramenta de corte. Em casos em que as ferramentas de corte são novas, as rebarbas são pequenas e tendem a ser distribuídas de forma homogênea por toda a borda do canal microcrousinado. Nos casos em que se tem uma ferramenta de corte desgastada, as rebarbas possuem dimensões bem maiores, o que pode dificultar a operação de rebarbação. A situação das rebarbas, de acordo com o desgaste da ferramenta de corte, podem ser observadas na Figura 2.19.

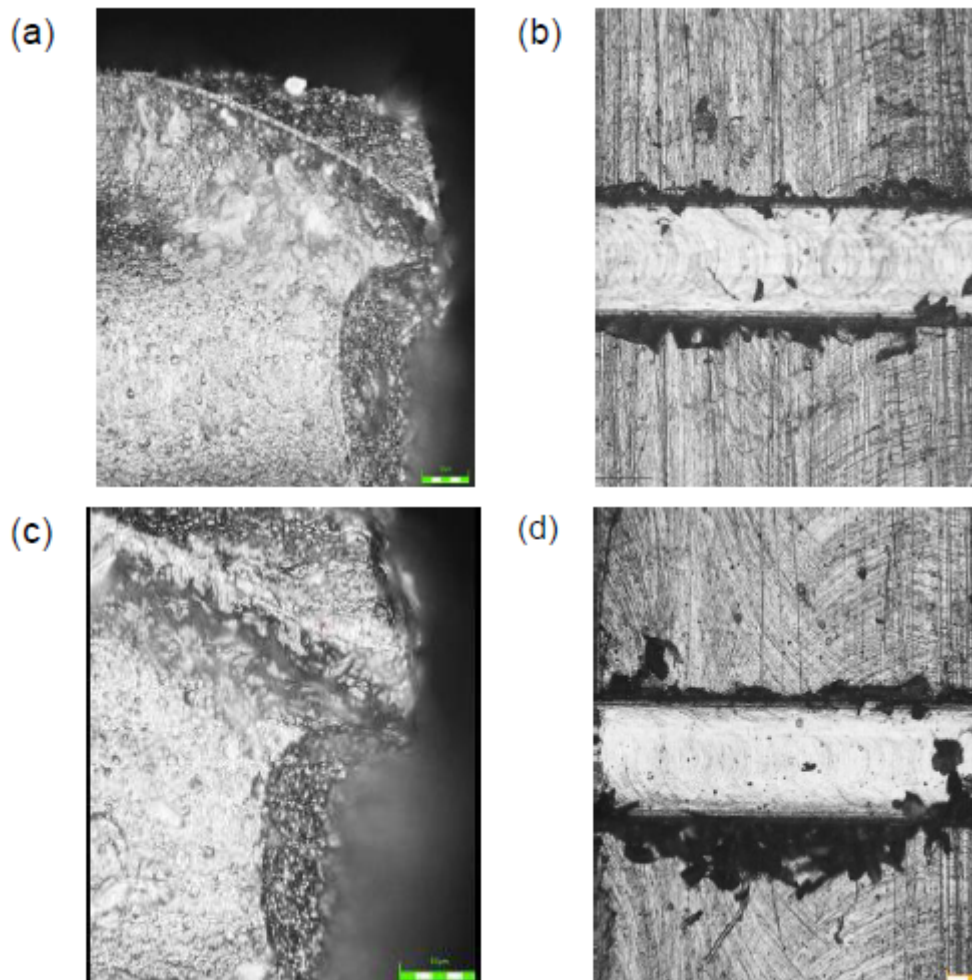


Figura 2.19: Rebarbas formadas a partir de (a) e (b) microfresa novas e, (c) e (d) a partir de microfresa desgastadas (adaptado de Zhang, Yuan e Wang, 2017).

No estudo de Kou et al. (2015) os autores propõem um meio de prevenção para a formação de rebarbas, que está ilustrado na Figura 2.20. Eles sugerem que seja utilizado um suporte, posicionado na superfície da peça usinada, para produzir uma força auxiliar e proporcionar um aumento de rigidez da sua aresta, de forma a dificultar o aumento das deformações plásticas até a borda. Isso faz com que as zonas plásticas e elásticas sejam estendidas ao material de suporte. É importante destacar que o material utilizado como suporte deve apresentar boa rigidez e resistência, para que assim ele seja capaz de fornecer a força auxiliar e diminuir os riscos de ruptura. Deve apresentar também uma boa capacidade de deposição e remoção de material da superfície da peça e o material não pode ocasionar variação nas propriedades físicas e químicas da peça usinada.

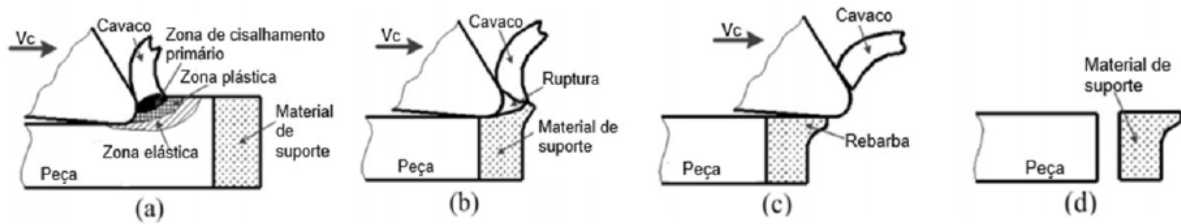


Figura 2.20: Mecanismo de controle de rebarbas no microfresamento: (a) extensão dos limites da peça com o material de suporte, (b) Crescimento da trinca no material de suporte, (c) formação de rebarbas no suporte; (d) separação do suporte e peça (adaptado de Kou et al. 2015).

2.2.4 Desgaste da Ferramenta

As ferramentas utilizadas no processo de microusinagem estão sujeitas a sofrer desgaste, que pode ocorrer rapidamente e de maneira imprevisível. O monitoramento do desgaste das ferramentas de corte nos processos de microfresamento é fundamental devido ao tamanho reduzido delas, que impede, a olho nu, a percepção de quebra ou danos na ferramenta durante a realização do processo. Além disso, as ferramentas desgastadas afetam diretamente na qualidade das superfícies geradas. Portanto, estas devem ser substituídas no momento correto para que os requisitos de alta precisão do microfresamento sejam atingidos (Zhu, Wong e Hong, 2009). O monitoramento do desgaste é imprescindível para garantir a credibilidade do processo, uma vez que o desgaste da microferramenta aumenta devido ao ângulo negativo da mesma, o que causa uma redução no ângulo de cisalhamento e aumenta à resistência à deformação plástica (Oliveira, 2019).

Segundo Machado et al. (2009, p. 247), existem duas grandes causas para realizar a substituição da ferramenta de corte, são elas:

- i. Ocorrência de uma avaria (trinca, lascamento ou quebra). As avarias são mais comuns no corte interrompido, devido aos choques mecânicos e térmicos inerentes a tais processos;
- ii. O desgaste atinge proporções elevadas e pode comprometer o bom andamento do processo. Este desgaste acontece de forma progressiva e pode se desenvolver por diferentes mecanismos. O desgaste acontece tanto nas superfícies de folga como na superfície de saída das ferramentas, em cortes contínuos ou interrompidos;

Do ponto de vista da tribologia, desgaste é a destruição de uma ou mais camadas superficiais que compõem um sistema tribológico. Já do ponto de vista da norma ISO 3685 (ISO, 1993) desgaste é a mudança da forma original da ferramenta durante o corte, que resulta na perda de material. Segundo Tansel et al. (2000), na microusinagem as microferramentas possuem uma vida menor comparando com usinagem convencional, além de que, a vida da microferramenta é menos previsível na microusinagem dos metais. Uma falha e/ou quebra da microferramenta só pode ser detectada quando a força aumenta três ou quatro vezes.

Atualmente existem diferentes métodos para acompanhar o desgaste da microfresa. Eles po-

dem ser realizados por medições diretas ou indiretas. Os métodos diretos determinam o valor real de uma variável, como medidas ópticas e alterações dimensionais na peça de trabalho. Já os métodos indiretos, o valor real é definido com a aplicação relações empíricas. Alguns exemplos são, as força de usinagem, os ruídos gerado pelo processo, a vibração, o campo de temperatura e sinais de emissão acústica (Gomes, 2019).

Na literatura é possível encontrar diferentes métodos de medição de desgaste. Desde trabalhos que mesclam métodos diretos e indiretos, à trabalhos que utilizam apenas uma metodologia. No trabalho de Malekian, Park e Jun (2009), os autores realizaram a identificação do desgaste da ferramenta de corte através de métodos indiretos, no microfresamento de uma liga de alumínio 7075 com ferramentas de metal duro, revestidas com (Al, TiN) e, 500 μm de diâmetro com duas arestas de corte. Foram utilizados sensores para captar os sinais das forças de corte, aceleração e emissão acústica. Juntos, os três sensores foram capazes de identificar a condição da ferramenta de corte de forma satisfatória.

Teng et al. (2018) estudaram o microfresamento de um material sintetizado de Mg/Ti, utilizando microfresas de 500 μm de diâmetro, sem revestimentos. O processo se deu com uma rotação 80.000 rpm, $a_p = 100 \mu\text{m}$, avanços por dente no intervalo de 0,75 μm a 3,0 μm e, velocidades de corte de 31,4, 62,8 e, 125,6 m/min. Nesse estudo, os autores notaram uma redução significativa no diâmetro da ferramenta de corte, quando comparada a uma ferramenta nova (Figura 2.21), que acontece devido a perda de material da ferramenta. Os autores relataram que, o maior desgaste foi observado a uma velocidade de 31,4 m/min, enquanto para a maior velocidade, de 125,6 m/min, o desgaste de flanco apresentou-se mais estável e mediu-se o menor desgaste e a menor redução de diâmetro. Em relação ao avanço por dente, o desgaste de flanco e a redução do diâmetro aumentam com com a redução do avanço, então, o maior desgaste deu-se no avanço por dente de 0,75 μm , enquanto o maior avanço, de 3,0 μm , apresentou o menor desgaste de ferramenta. Sendo assim, a principal causa do aumento no desgaste da ferramenta de corte é o desgaste de flanco, que acontece de maneira não uniforme e, está associado ao lascamento na aresta principal de corte.

Os tipos de revestimento das ferramentas podem influenciar diretamente na sua vida útil. No trabalho de Biermann, Steiner e Krebs (2013), foram avaliados os desgastes em cinco tipos de revestimentos (TiN, AlCrN, CrN, AlTiN e TiAlN), no microfresamento de um aço inoxidável austenítico. Os autores verificaram que, nas microfresas revestidas com CrN e TiN, o desgaste apresentado foi mais severo. Para o revestimento de CrN a ferramenta apresentou um lascamento no revestimento e na aresta de corte. Esse lascamento ocasionou a exposição do substrato da ferramenta, podendo causar adesão de material da peça e à formação de APC, resultando em um cisalhamento permanente da ferramenta. Já para as ferramentas com revestimento de TiN, os autores relataram que o principal mecanismo de desgaste foi o lascamento na aresta de corte, que pode ser atribuído à adesão de material da peça. Os revestimentos de AlCrN e TiAlN exibiram bons resultados em termos de desgaste, não apresentaram fragmentação nem lascamento.

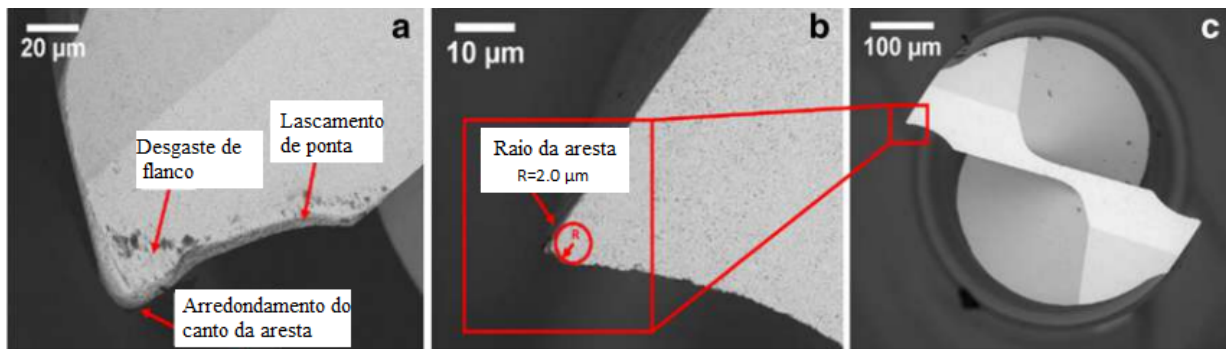


Figura 2.21: Vista superior para (a) microfresa desgastada, (b) e (c) microfresa nova, sem revestimento (adaptado de Teng et al., 2018).

Berestovskyi, Hung e Lomeli (2014), compararam o desgaste ocorrido em ferramentas de metal duro sem revestimento com o desgaste ocorrido em ferramentas revestidas com AlTiN. Os autores observaram uma formação considerável de aresta postiça de corte (APC) (Figura 2.22 (a) e (b)) e, um desgaste abrasivo nas ferramentas sem revestimento. Já nas ferramentas revestidas, os autores não constataram a ocorrência de desgaste abrasivo, apenas lascamento ao longo da aresta de corte (Figura 2.22 (c)). Além disso, não houve formação expressiva de APC nas ferramentas com revestimento.

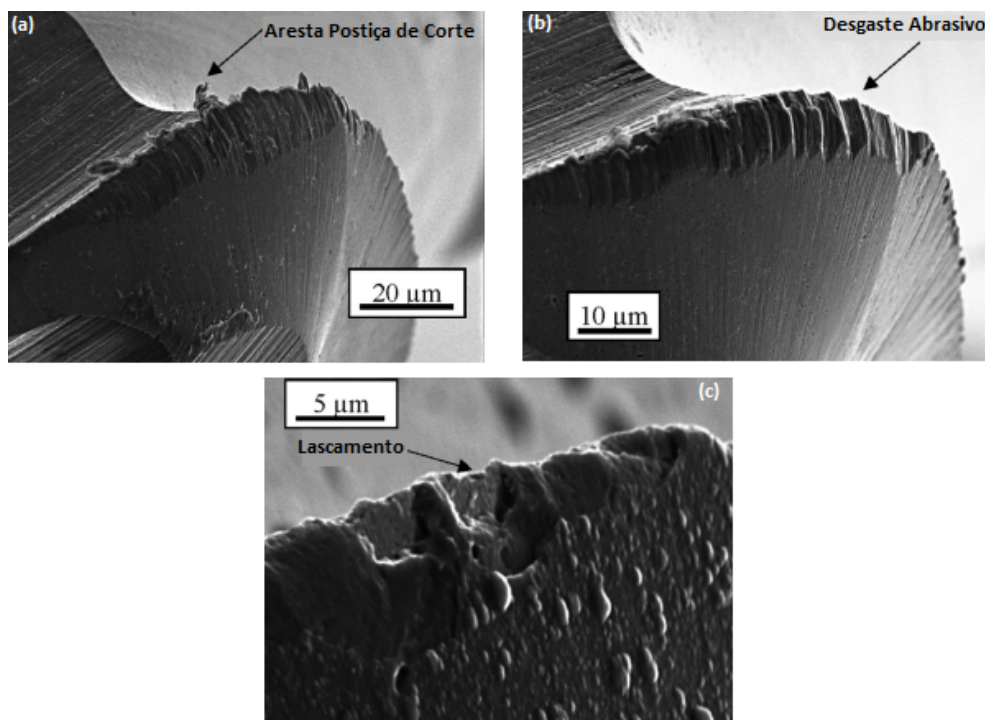


Figura 2.22: (a) Formação de APC na ferramenta sem revestimento; (b) Indício de desgaste abrasivo na ferramenta sem revestimento; (c) Lascamento sucedido na ferramenta revestida (adaptado de Berestovskyi, Hung e Lomeli, 2014).

No fresamento convencional existem algumas normas que abordam a aferição do desgaste da ferramenta de corte, como a ISO 8688-1 (ISO, 1989) e, ISO 8688-2 (ISO, 1989). Porém,

essas normas não podem ser replicadas para os processos de microfresamento. Sendo assim, não existe uma conformidade sobre a verificação do desgaste da ferramenta para processos de microusinagem.

Nesse contexto, os autores tentam identificar os melhores critérios de fim de vida para cada caso estudado, um desses autores foi Ziberov (2018) que assumiu um critério para definir o fim da vida da ferramenta. Em seu estudo, o autor adotou um valor experimental de 15 μm de desgaste como o parâmetro de fim de vida da ferramenta, para uma microfresa de 152,4 μm de diâmetro. Esse parâmetro foi considerado para ferramentas revestidas de TiAlN e também de DLC.

2.3 MICROFRESAMENTO DE ALUMÍNIO

2.3.1 O Alumínio

O alumínio é um material metálico versátil, econômico e atrativo para diferentes tipos de aplicações. Trata-se de um material amplamente utilizado em vários tipos de indústrias, como a de bens de consumo, transportes, construção civil, elétrica e de embalagens. O alumínio é um material que apresenta um baixo peso específico ($2,7 \text{ g/cm}^3$), para uma proporcionalmente elevada resistência mecânica, elevada condutividade térmica e elétrica, baixa temperatura de fusão (660°C) e, alta eletrocondutividade ($3,5 \times 10^4 \text{ } |\Omega \cdot \text{cm}|^{(-1)}$). Sua rede cristalina é do tipo cúbica de face centrada (CFC) (Feitosa, 2007).

O alumínio possui uma alta maleabilidade e ductilidade, o que significa que é um material de fácil conformação, sendo possível adequá-lo aos mais variados projetos. Então, é possível afirmar que o alumínio possui uma alta trabalhabilidade, que é definida como a capacidade que o material apresenta para ser submetido a deformações sem sofrer falha, além de apresentar uma capacidade de endurecer gradativamente (Feitosa, 2007).

2.3.1.1 Ligas de Alumínio

A adição de elementos de liga no alumínio torna-o um material com propriedades mecânicas atraentes para a utilização na engenharia, apresentando excelentes propriedades mecânicas, térmicas e elétricas. Os elementos mais comuns são o Mg, Mn, Si, Cu e Zn, seus efeitos variam de acordo com a quantidade presente na liga e com a combinação com outros elementos (Hirsch, Skrotzki e Gottstein, 2008). Em geral, os elementos podem ser divididos entre aqueles que conferem à liga a sua característica principal (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento de moldes) e os que têm função acessória, como o controle de microestrutura e das impurezas e traços que prejudicam a fabricação ou a aplicação do produto, os quais devem ser controlados no seu teor máximo (ABAL, 2005).

Segundo ABAL (2005), o alumínio quando fundido dissolve outros metais e metalóides, como o silício, que atua como metal. Quando ele se resfria e se solidifica, alguns dos constituintes da

liga podem ser retidos em solução sólida. Isto proporciona à estrutura atômica do metal uma forma mais rígida. Os átomos podem ser visualizados como sendo arranjados em uma rede cristalina regular, formando átomos de tamanhos diferentes daqueles do elemento de liga principal. Quando o metal está quente ele é capaz de manter uma quantidade maior de elementos de liga em solução sólida, se comparado ao seu estado frio. O resfriamento faz com que ocorra a precipitação do excesso dos elementos de liga da solução, que por sua vez, pode acontecer na forma de partículas duras, consistindo de compostos intermediários como CuAl_2 ou Mg_2Si . Esses agregados tornam a rede cristalina mais rígida e, conseqüentemente, endurecem a liga.

Torre (2004), diz que a baixa resistência mecânica do alumínio puro impossibilita-o de ser utilizado em sua forma *in natura*. Por isso, deve utiliza-lo ligado a outros metais que não causem um aumento sensível de sua densidade e, proporcionem uma melhora nas suas características mecânicas. Os principais elementos de liga e os efeitos ocasionados por sua adição estão listados na Tabela 2.1

Tabela 2.1: Principais elementos de liga e os efeitos de sua adição.

ELEMENTOS	EFEITOS OCACIONADOS
Cobre (Cu)	Aumento progressivo da resistência e da dureza até adição de 12% Cu. Conferir um liga boas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas (resistência ao calor, fácil usinagem) mas, não resistem tão bem à corrosão.
Silício (Si)	Teores crescentes de silício, até o ponto eutético, aumentam a fluidez e a resistência mecânica da liga e diminuem a fragilidade a quente e a contração do material (resistente a corrosão, não tão bom condutor térmico, baixo coeficiente de dilatação térmica, difícil usinagem).
Magnésio (Mg)	Aumento do limite de resistência e dureza, além aumento na resistência à corrosão e excelente usinabilidade. Boa resistência ao impacto.
Zinco (Zn)	Confere ao alumínio excelente limite de resistência e ductilidade à temperatura ambiente. Por outro lado, aumenta a susceptibilidade à corrosão sob tensão.

Fonte: Bradaschia, 1987.

Segundo Davis et al. (1993), as propriedades finais apresentada pela liga depende do elemento de liga adicionado. O autor cita também que a interação que ocorre entre os elementos é um fator fundamental para as propriedades mecânicas finais. Um bom exemplo é a formação de precipitados, que se aplica às ligas das série 6xxx.

Além da adição dos elementos de liga, as ligas de alumínio podem ser utilizadas em diferentes

estados de processamento. Para isso, é necessário conhecer a aplicação final da liga. Em alguns casos, ela pode ser empregada em seu estado bruto. Para os casos onde seu estado bruto não é favorável, a liga pode ser submetida a diversos tratamentos. Em situações onde é necessário aumentar a resistência mecânica, as ligas podem ser encruadas, tratadas termicamente, ou ambas (Maia et al., 2012).

As ligas de alumínio para trabalho mecânico são classificadas de acordo com a sua composição, usando uma designação de quatro dígitos. O primeiro dígito representa o principal elemento de liga, sendo o dígito 1 reservado ao alumínio não ligado (Tabela 2.2). As ligas da série 2xxx, 6xxx e 7xxx são as ligas de alumínio tratáveis termicamente (Silva et al., 2010).

Tabela 2.2: Séries de liga de alumínio para trabalho mecânico.

Principais Elementos de Liga	Série
Alumínio, 99,0% mínimo	1xxx
Cobre	2xxx
Manganês	3xxx
Silício	4xxx
Magnésio	5xxx
Magnésio e silício	6xxx
Zinco	7xxx
Outros elementos	8xxx
Série livre	9xxx

Fonte: Silva et al., 2010.

Dentre as diferentes séries, ressalta-se a série 6XXX, que contém ligas que possuem ligações consideradas de média resistência mecânica, boa resistência a corrosão, soldabilidade, conformabilidade e usinabilidade. As ligas produzidas para tarugos são da série 6xxx, ou seja, ligas de alumínio com silício e magnésio como principais elementos de liga, 70% da produção consiste das ligas 6060 e 6063. Os 30% restantes englobam as ligas 6005, 6061, 6101, 6082, 6351 e 6463. Ligas da série 6XXX são tratáveis termicamente, apresentam boa resistência mecânica, excelente conformabilidade e boa resistência à corrosão (GOMES, 2013)

2.3.2 Análise Inicial do Microfresamento de Alumínio

O microfresamento de alumínio não é um assunto amplamente abordado nas literaturas. Mas, sabe-se que para usinagem macro considera-se que o alumínio é um material que apresenta boa usinabilidade principalmente por possuir baixa dureza.

Campos (2016), estudou o microfresamento de uma liga de alumínio 6351-T6, com o objetivo de determinar as forças de corte no processo. Para o estudo foi utilizada uma barra de 47x50x15 mm com furos de 3 mm (para a fixação no dinamômetro), uma microfresa helicoidal de diâmetro de 381 µm com 2 dentes. A Figura 2.23 mostra um esquema de montagem do experimento utilizado pelo autor. Os parâmetros de corte empregados no experimento foram: avanço por dente de 1,4 e 5 µm/rot, velocidade de corte de 20000, 25000 e 30000 rpm e, profundidade de

corte de 0,1 mm (valor superior ao raio da aresta). O autor realizou faceamento no corpo de prova, antes da realização do experimento, afim de garantir uma face perfeitamente plana.

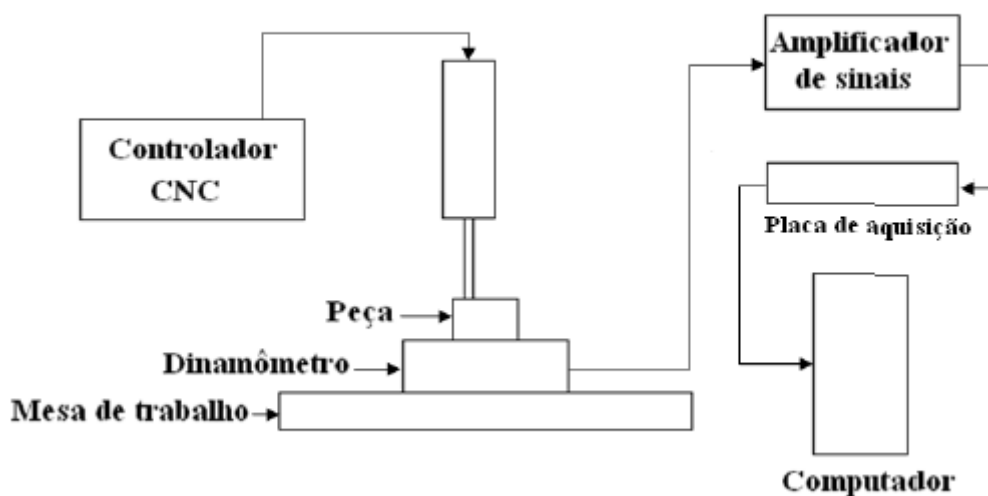


Figura 2.23: Esquema de montagem do experimento (CAMPOS, 2014).

No desenvolvimento dos testes, o autor usinou um comprimento de corte de 15 mm, para que fosse possível verificar o comportamento das forças. Nos resultados observou-se que, com a velocidade de corte de 20000 rpm não foi verificado um desalinhamento da ferramenta. Mas, quando velocidade de corte passou para 25000 rpm e 30000 rpm a influência de desalinhamento da ferramenta de corte fica nítida nos valores da força de corte, uma vez que a espessura de corte varia durante o processo. A vibração da máquina é uma possível explicação para esse fato. O desalinhamento da ferramenta faz com que cada dente corte uma espessura diferente, com isso, ao analisar as forças, percebe-se picos diferentes em cada dente. Constatou-se ainda uma quebra de dente na microfresa, o que é um indicativo de que, durante o processo, os dentes não estavam removendo a quantidade de material especificada pelos parâmetros de corte (Campos, 2016).

Kumar, Deb e Paul (2018), estudaram o microfresamento em uma liga de alumínio 6061 e em uma liga de cobre. Para a análise, foram considerados os resultados obtidos para a liga de alumínio. Os autores usaram uma fresa de topo plana, de carboneto de tungstênio, com dois canais e revestida de TiAlN com 50 μm de diâmetro e raio de corte de 2,4 μm , que está representada na Figura 2.24. Eles realizaram microusinagem em microcanais utilizando lubrificação por quantidade mínima (MQL) de bico duplo. O lubrificante aplicado foi o UNILUBE 9107, que é um lubrificante a base de éster sintético.

As características de usinabilidade analisadas foram: forças de corte, rugosidade média superficial e tamanho das rebarbas. Os parâmetros de corte adotados foram: comprimento do canal de 0,5 mm, penetração de trabalho de 25 μm , velocidades de corte de 10, 30 e 50 m/min, avanço por dente de 1,2,4 e 6 μm , e taxa de fluxo MQL 10 ml/h. As amostras do material foram fresadas

em ambos os lados para manter o paralelismo e a retidão da superfície.

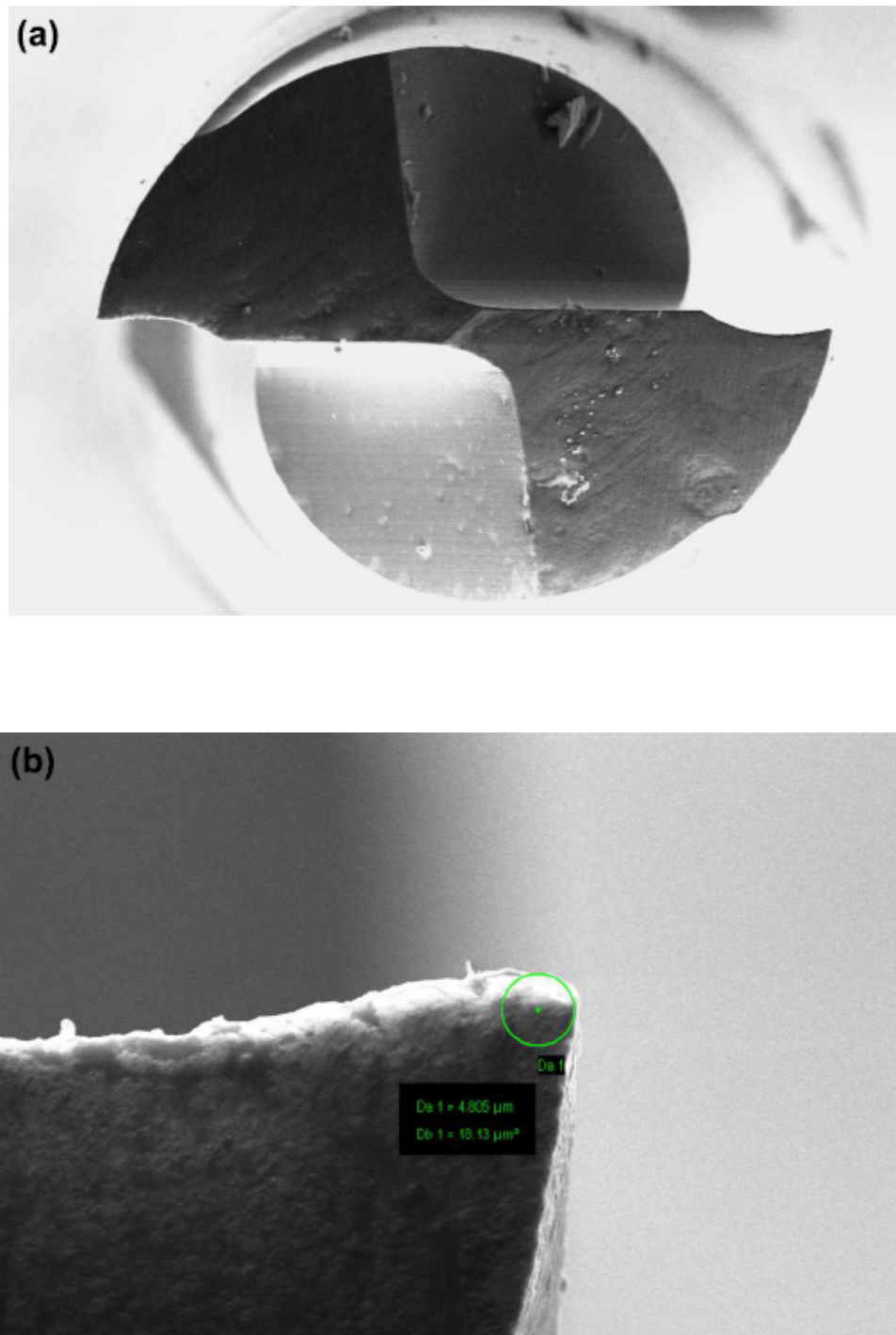


Figura 2.24: (a) Topo da microfresa utilizada para a operação, (b) vista ampliada da borda de corte da microfresa (Kumar, Deb e Paul, 2018).

Para medir as forças de corte os autores utilizaram um dinamômetro piezoelétrico, Kistler 9254, de três componentes e, mediram-as em três direções: força de corte longitudinal (F_x), força de corte transversal (F_y) e força vertical (F_z). Os autores constataram que, em todas as direções,

as forças tendem a ser maiores para valores mais elevados de avanço por dente e velocidade de corte. Os maiores valores de forças encontrados foram, $F_x = 0,33$ N, $F_y = 0,16$ N e $F_z = 0,21$ N.

A rugosidade média da superfície foi medida na direção da microsuinagem, como mostra a Figura 2.25. Para a mesma velocidade de corte e, um menor avanço por dente, nota-se uma baixa rugosidade superficial. Já para maiores velocidades de corte, nota-se superfícies mais lisas. A rugosidade média de superfície, para o alumínio 6061 obtida no trabalho variou na faixa de 28,2 nm a 86,9 nm (Kumar, Deb e Paul, 2018).

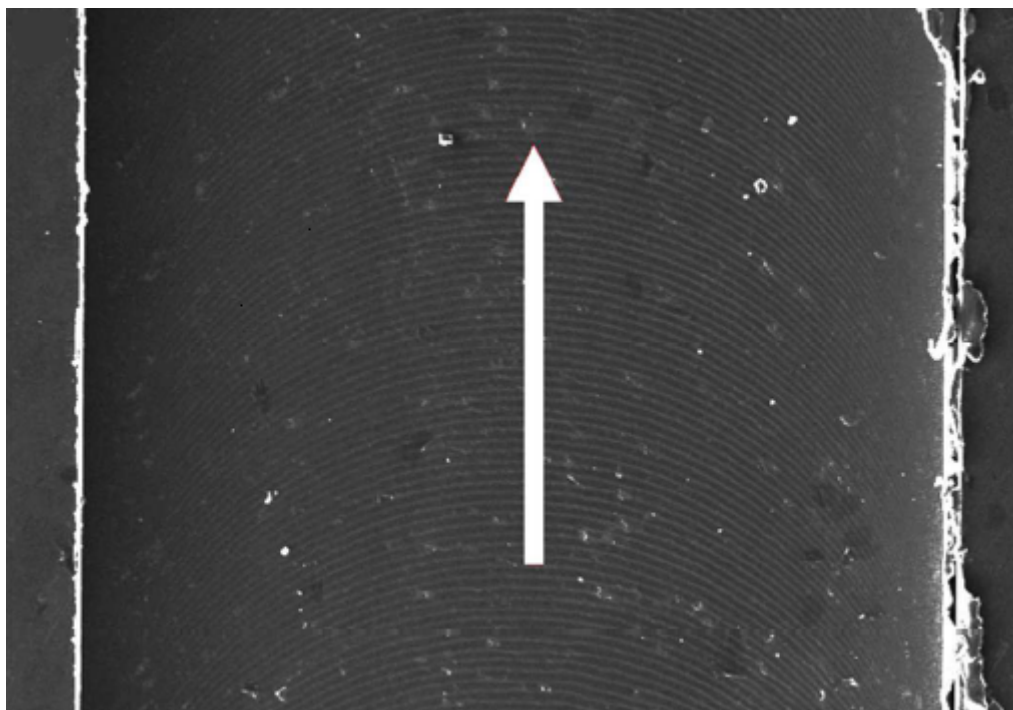


Figura 2.25: Direção de medição da rugosidade média da superfície no microcanal (adaptado de Kumar, Deb e Paul, 2018).

Kumar, Deb e Paul (2018) mediram ainda as rebarbas no lado discordante e no lado concordante do microfresamento. A rebarba superior foi medida em diferentes locais e obteve-se a média para uma melhor precisão da medição. Na Figura 2.26 (a) é possível observar os diferentes tipos de rebarbas formados durante o microfresamento dos microcanais estudados. É possível visualizar a rebarba superior, rebarba de entrada e, rebarba de saída. O estudo relata que a rebarba superior foi medida nos dois lados do microfresamento (discordante e concordante), como mostra a Figura 2.26 e, que presença de aresta postíca de corte causou rebarbas com interrupções ao longo do canal.

A análise feita mostra que, para uma mesma velocidade, considerando maiores avanço por dente, obteve-se menores rebarbas tanto no lado concordante como no lado discordante. A Figura 2.27 mostra os resultados obtidos com a variação da velocidade de corte e do avanço por dente. A largura máxima da rebarba é de 12,86 μm para o fresamento discordante e de 15,28 μm para o fresamento concordante. Kiswanto et al. (2015), relataram uma tendência semelhante no

fresamento de microcanais em liga de alumínio 1100. Eles também relataram que as rebarbas de fresamento inferior são maiores do que as rebarbas de fresamento superior (Kumar, Deb e Paul, 2018).

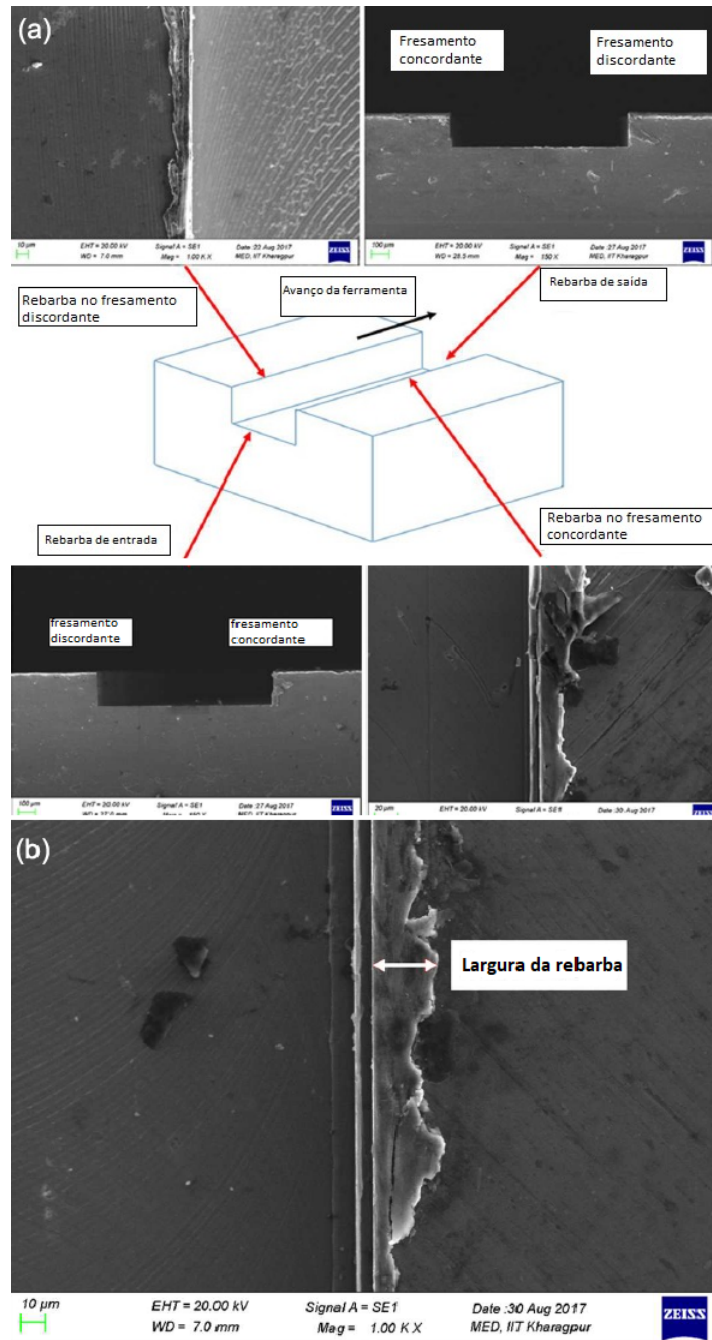


Figura 2.26: (a) Tipos de rebarbas formadas no microfresamento dos microcanais, (b) Medição da largura da rebarba (adaptado, Kumar, Deb e Paul, 2018).

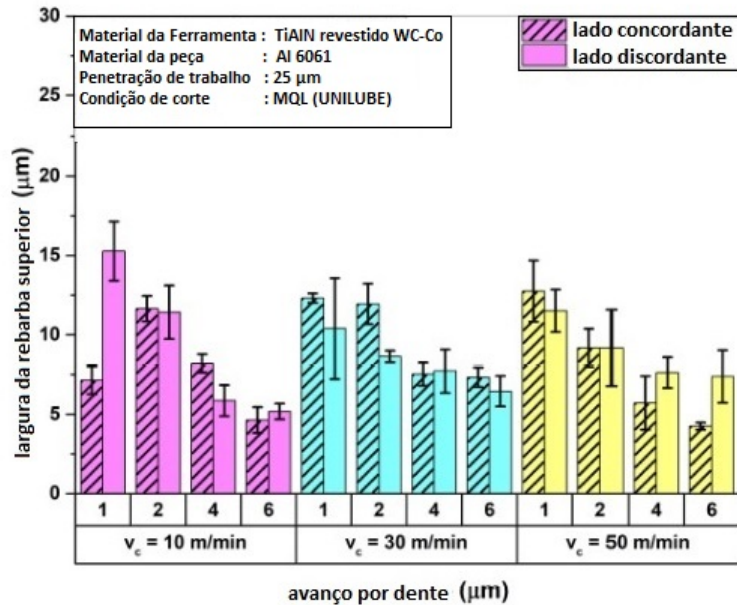


Figura 2.27: Variação de largura da rebarba superior com a velocidade de corte e avanço por dente (adaptado, Kumar, Deb e Paul, 2018).

Nahata, Kota e Ozdoganlar (2020) estudaram o efeito da microestrutura e de defeitos na sub-superfície do alumínio durante o corte ortogonal. Os autores usinaram a liga de alumínio 7075, com diferentes valores de velocidade de avanço, a ferramenta foi obtida especificamente para o trabalho com as seguintes especificações: material diamante monocristalino, com ângulo de saída podendo ser variado entre 0° e 25° e ângulo de folga fixo em 5°, o ângulo do raio de ponta foi medido pelos autores que obtiveram o valor aproximado de 150 nm. Para obtenção de corpos de prova com diferentes granulometrias, os autores fizeram tratamento térmico de recozimento em alumínio de alta pureza (99,999%), a 400°C por 30 min, as amostras foram então polidas e atacadas com ácido clorídrico para que a microestrutura pudesse ser observada e medida.

Para verificar a influência dos parâmetros de corte, os autores variaram a profundidade de corte em 10 µm, 20 µm e 40 µm, o ângulo de saída em 0°, 10° e 25° e a velocidade de corte em 10 mm/s e 50 mm/s. Para minimizar a alta adesão, do material da peça na ferramenta, verificada em ensaios preliminares, os autores utilizaram fluido de corte, Ecoline, que foi aplicado na superfície das amostras antes de cada teste. Como um dos parâmetros avaliados, a força de corte foi obtida utilizando um dinamômetro Kistler 9256C1, com taxa de aquisição de 5 Hz. Outra variável medida foi a rugosidade (Ra), esta foi medida com um perfilometro Zygo NewView 7300, no centro de cada grão.

Durante o estudo da força os autores notaram que há uma variação antes de ocorrer a troca de grão, que poderia ser atribuída ao campo de tensões que é formado na frente da ferramenta. Além disso, os autores mencionam que não é possível afirmar se os valores de força medidos são somente devido ao grão atual, ou se sofrem influência do grão usinado anteriormente. Para evitar esses efeitos, os autores selecionaram apenas uma região no centro do grão e calcularam

a força média, para representar a força para cada orientação cristalográfica (grãos diferentes). Sabendo as diferentes forças, pode-se estimar a energia específica do processo, através do volume de material removido. A Figura 2.28 contém os gráficos de energia específica e atrito em função dos diferentes grãos usinados.

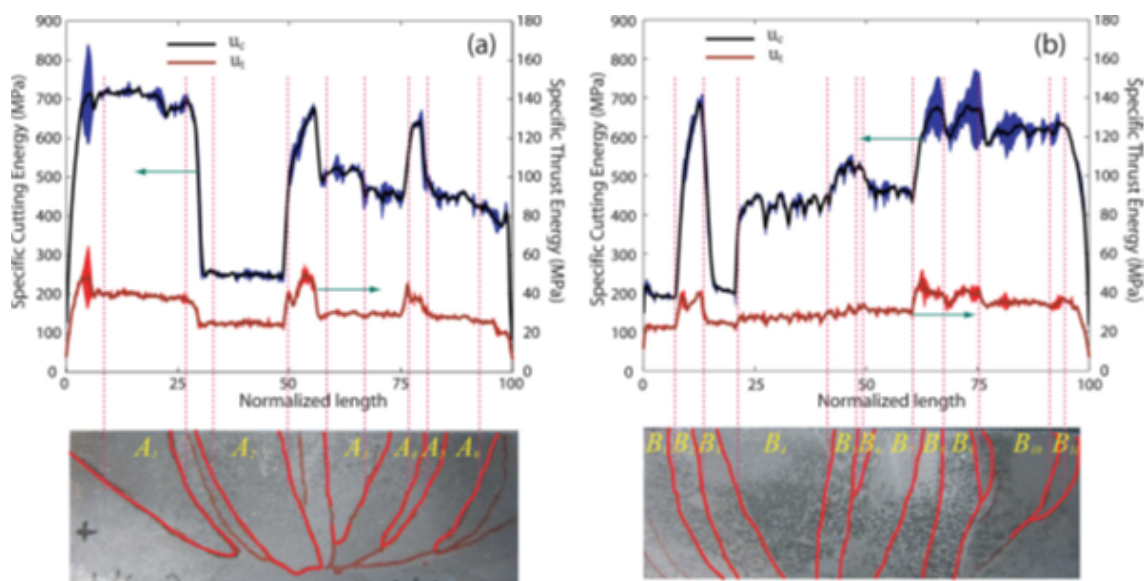


Figura 2.28: Variação da energia específica: (a) Peça 1 e (b) Peça 2, com ângulo de ataque de 0° , velocidade de corte de 10 mm/s e espessura de corte de $40 \mu\text{m}$ (Nahata, Kota e Ozdoganlar, 2020).

Os autores comentam ainda que, apesar das energias específicas variarem com as combinações de parâmetros de corte, a variação na energia específica para uma mesma combinação pode chegar a 360%, o que eles atribuem aos diferentes comportamentos dos cristais devido às variações nos planos de escorregamento. Em relação ao ângulo de saída, os autores verificaram que aumentando o ângulo de saída a energia específica é reduzida, conforme esperado pela literatura. A variação de energia chega a aproximadamente 250% quando comparados os ângulos 0° e 25° .

Em relação às velocidades de corte estudadas, os autores obtiveram que sua influência é menos significativa. A variação na energia específica foi de apenas 8,6% entre o maior e o menor valor, sendo diretamente proporcional. A espessura de corte, apresentou variação pequena, porém mais significativa que a velocidade. Sendo para $10 \mu\text{m}$ (menor valor) 17% maior que para $40 \mu\text{m}$, o que foi associado ao efeito escala.

Diferentemente da velocidade e da profundidade de corte, a rugosidade (R_a) mostrou sofrer grande influência da orientação cristalográfica. A maior diferença entre grãos consecutivos foi de 831% sendo que os grãos denominados B2 e B3 obtiveram valores de rugosidade (R_a) 265 nm e 32 nm, respectivamente.

Quando analisaram o efeito de defeitos na subsuperfície, com o intuito de simular passes prévios de usinagem, os autores verificaram uma redução de aproximadamente 31% nas energias para as superfícies deformadas. Os autores atribuíram essa redução ao fato de que o passe anterior de usinagem (superfície com defeitos) reduziria a anisotropia deformando a superfície e a

subsuperfície do material.

Outro estudo que avaliou o microfresamento de alumínio foi o de Kiswanto, Zariatin e Ko (2014), o foco dos autores foi avaliar os efeitos da velocidade de corte, velocidade de avanço e, do tempo de usinagem na rugosidade da superfície e na formação de rebarbas de uma liga de alumínio 1100. Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidades de corte de 35000, 70000 e, 90000 rpm; tempo de usinagem de 15, 30 e, 45 minutos; velocidade de avanço de 0,05, 0,5 e, 1 mm/s. A ferramenta foi uma microfresa metal duro, revestida com Mega-T, com duas arestas de corte e que possuía 20 μm de diâmetro. A profundidade de corte definida para o experimento foi de 10 μm . Ressalta-se que antes do processo de microfresamento, os autores submeteram as peças a um faceamento.

Como variável de saída foi dado foco à formação e ao tamanho das rebarbas, foram observadas rebarba superior, rebarba de entrada, rebarba lateral, rebarba inferior e rebarba de saída, todas formadas na superfície dos microcanais. Os autores pontuam ainda que rebarbas superiores, formadas no topo da superfície da peça, são as mais afetadas pelos parâmetros de corte. As menores velocidades de corte, combinadas com os menores avanços por dente resultaram nas menores rebarbas, como pode ser observado na Figura 2.29.

Outro fator importante é que há uma diferença nas rebarbas para o corte concordante e discordante. É importante ressaltar que no fresamento concordante a direção de corte é paralela a direção de avanço, enquanto no fresamento discordante o sentido de corte é oposto ao sentido do avanço. Durante o processo de corte, as rebarbas são formadas, principalmente, no lado do fresamento concordante (Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).

Kiswanto, Zariatin e Ko (2014) ainda verificaram a influência do tempo de usinagem que está diretamente relacionado ao desgaste da ferramenta. As rebarbas foram medidas, com tempo de processo de 45 min e, os maiores valores obtidos no fresamento concordante, foram para a velocidade de corte de 95.000 rpm, velocidade de avanço de 0,5 mm/s, com rebarbas medindo 76,93 μm de largura e 122,4 μm de comprimento. Já para o fresamento discordante, as maiores rebarbas foram de 194,4 μm de largura e, 207,5 μm de comprimento, nas mesmas condições de corte. As rebarbas foram medidas como mostra a Figura 2.30.

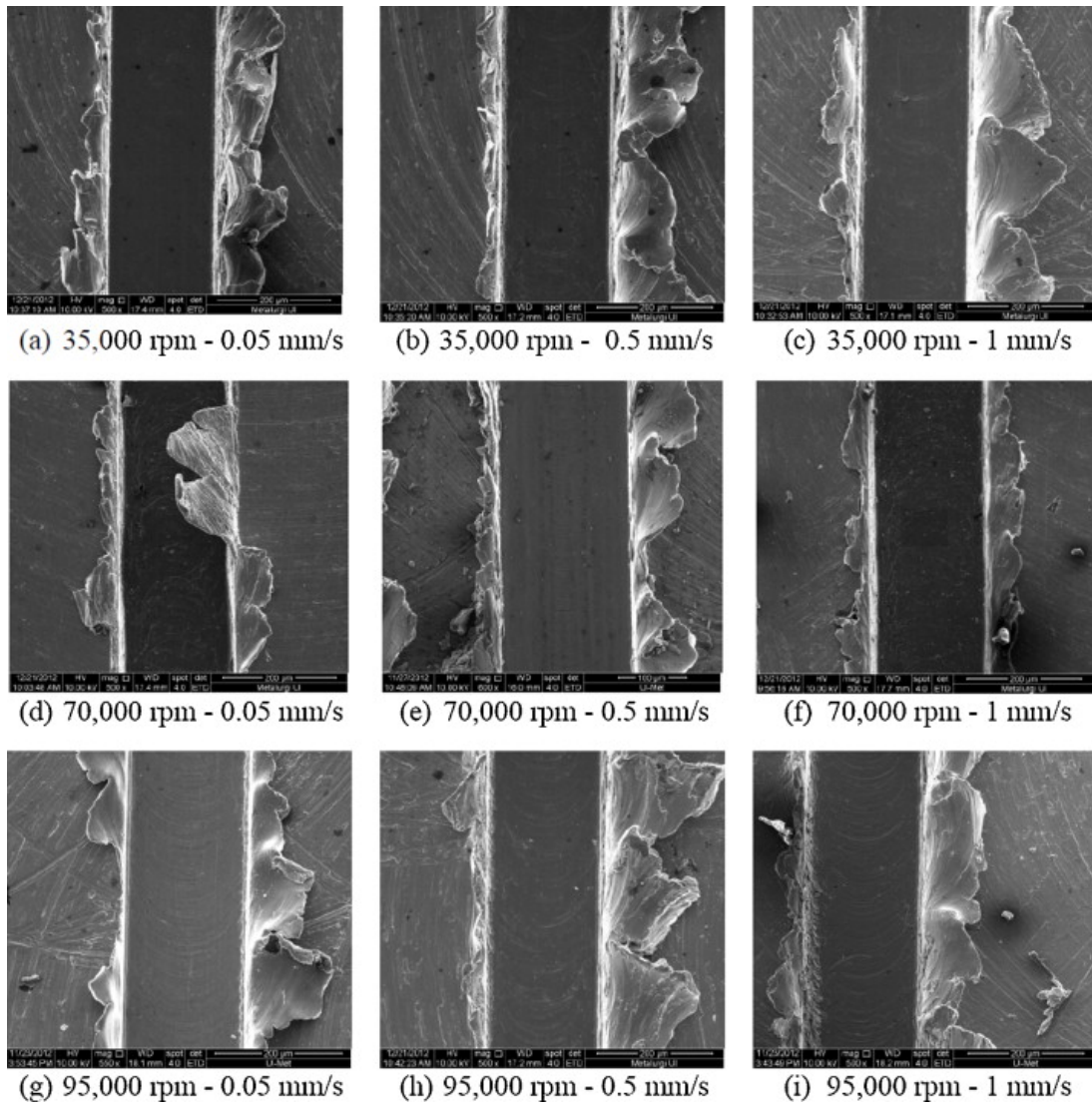


Figura 2.29: Tamanho das rebarbas, após 45 minutos de processo, para cada parâmetro de corte (Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).

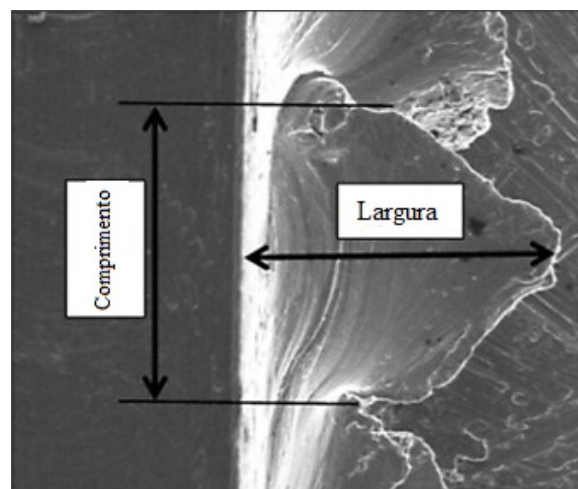


Figura 2.30: Comprimento e largura das rebarbas (adaptado de Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).

Percebe-se ainda que o comportamento do tamanho médio das rebarbas é desigual ao longo do microcanal e, tende a crescer no decorrer do processo, o que pode estar associado à variação no desgaste da microferramenta, já que as rebarbas de entrada tiveram aumento proporcional ao tempo de usinagem, como se observa na Figura 2.31. Entretanto, em alguns pontos do canal, houve uma dissipação das rebarbas. Esse comportamento se explica pelo desprendimento da aresta postiça de corte (APC) (Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).

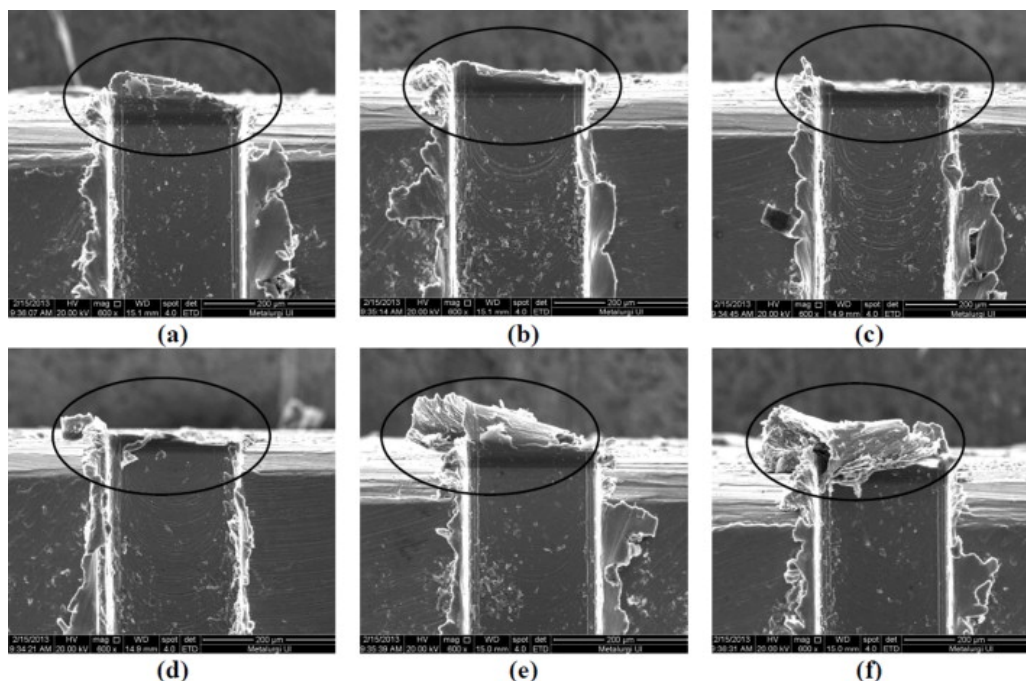


Figura 2.31: Rebarbas de entrada, com tempo de usinagem de, aproximadamente, (a) 36 s, (b) 72 s, (c) 108 s, (d) 144 s, (e) 180 s e, (f) 216 s (Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).

Para as rebarbas inferiores, os autores constataram que elas podem acontecer tanto do lado concordante quanto do lado discordante do fresamento. A condição da ferramenta de corte influencia na formação desse tipo de rebarba. Ferramentas de corte novas e afiadas produziram canais praticamente sem rebarbas, Figura 2.32 (a). Em contrapartida, nos canais produzidos com ferramentas desgastadas, pelo tempo de uso, observou-se a presença de rebarbas no fundo dos canais, Figura 2.32 (b). A tendência é que as rebarbas inferiores se tornem maiores que as superiores, à medida que a ferramenta de corte se desgasta, Figura 2.32 (b). Isso ocorre pois quando o desgaste da ferramenta aumenta, o processo passa a ser dominado pela fricção (Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).

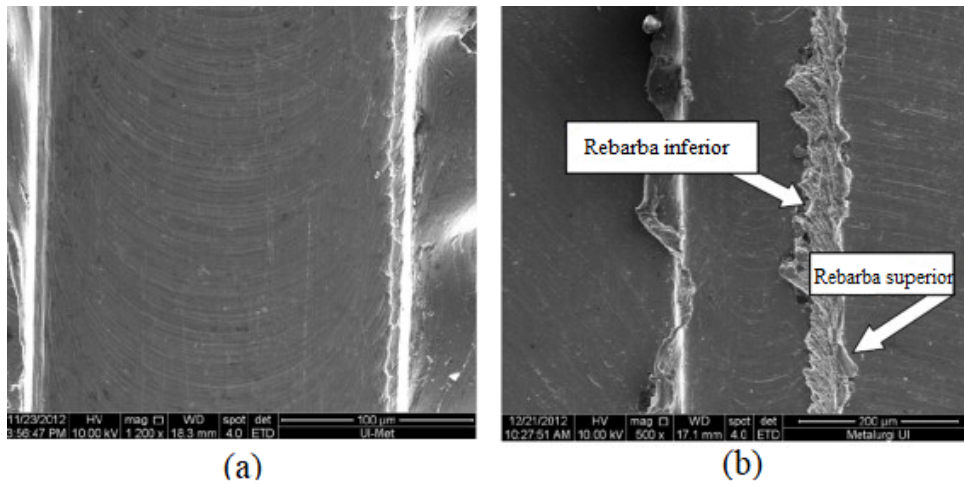


Figura 2.32: Formação de rebarbas, com velocidade de corte de 90.000 rpm e velocidade de avanço de 0,5 mm/s, com a condição de ferramenta (a) nova e afiada; (b) ferramentas desgastadas, onde as rebarbas inferiores são maiores que as rebarbas superiores (adaptado de Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).

Segundo os autores, o tempo de usinagem, conseqüentemente o desgaste, é o parâmetro que tem mais influência na formação de rebarbas durante o processo de microfresamento. A Figura 2.33 mostra um comparativo do tempo de usinagem e da condição da ferramenta de corte, onde é possível observar que o desgaste da ferramenta aumenta com o tempo de usinagem e, provoca uma ampliação das dimensões das rebarbas, Figura 2.33 (b). O aumento no tempo de usinagem pode provocar fraturas na ferramenta de corte, o que pode influenciar ainda mais no crescimento das rebarbas, Figura 2.33 (c) (Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).

Tempo	15 minutos	30 minutos	45 minutos
Peça de trabalho			
Ferramenta			
Rugosidade da superfície	35 μm	152 μm	275 μm
	(a)	(b)	(c)

Figura 2.33: Condição do microcanal usinado com velocidade de corte de 70000 rpm, velocidade de avanço de 1 mm/s e, condição da ferramenta (a) após 15 minutos; (b) após 30 minutos; (c) após 45 minutos (adaptado de Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014).

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O material empregado nesse estudo é a liga de alumínio 6101 T6, que é um material bastante empregado na indústria elétrica, em usos de cabos de transmissão e distribuição de energia elétrica. Para o alumínio 6101 destacam-se a alta ductilidade, boa condutividade elétrica, boa resistência a corrosão e resistência mecânica mediana. A composição química do material pode ser observada na Tabela 3.1. No trabalho de Malcher et al. (2020), os autores determinaram as propriedades mecânicas do alumínio 6101, que estão citadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.1: Composição química da liga de alumínio 6101.

Elemento	Teor (%)
Mg	0,35 - 0,80
Fe	0,50
Cu	0,10
Mn	0,03
Al	97,61 - 98,46
Cr	0,03
Zn	0,10
Si	0,30 - 0,70
Outros	0,13

Fonte: Império dos Metais, 2022

Tabela 3.2: Parâmetros elásticos para a liga de alumínio 6101.

Descrição	Símbolo	Valor	
		Tração	
Módulo de Yong	E [MPa]	65,554	
Coefficiente de Poisson	ν	0,3	
Limite de escoamento inicial	σ_{y0}	96,13	
Alongamento percentual máximo	A [%]	35,60	

Fonte: Malcher et al., 2020.

3.2 MÁQUINA FERRAMENTA E FERRAMENTA DE CORTE

Para a realização dos ensaios utilizou-se o centro de usinagem vertical, modelo VEGA XH7132, pertencente ao Laboratório de Usinagem da Universidade de Brasília, representado na Figura 3.1.



Figura 3.1: Centro de usinagem vertical VEGA XH7132.

As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios possuem diâmetros de $400\ \mu\text{m}$, erro máximo de 5% de redução, comprimento de corte de $800\ \mu\text{m}$ e, duas arestas de corte com raio de $1 \pm 0,1\ \mu\text{m}$. Trata-se do modelo MS2MSD0040 da Mitsubishi. São microfresas de metal duro, com revestimento de (Al, Ti)N (MITSUBISHI MATERIALS, 2016). A Figura 3.2 trás uma representação da ferramenta de corte, cuja medidas estão em mm.

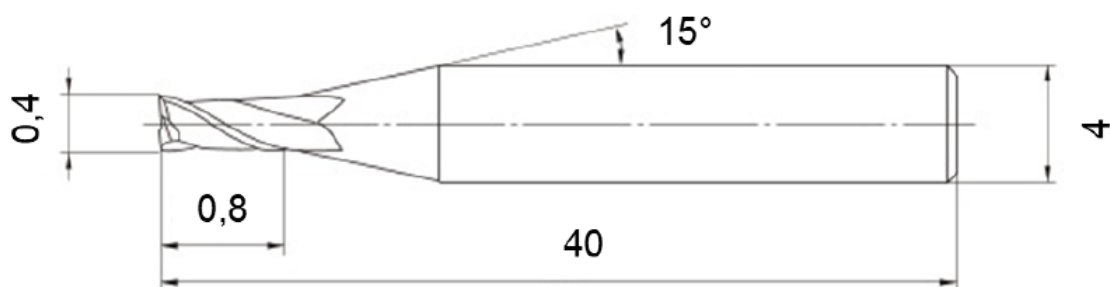


Figura 3.2: Microferramenta MS2MSD0040 (adaptado de, MITSUBISHI, 2018).

3.3 MICROFRESAMENTO DA AMOSTRA

Para o microfresamento da liga Al 6101, selecionou-se parâmetros de corte tomando como base as limitações apresentadas pela máquina ferramenta disponível. Todos os parâmetros foram mantidos constantes, com exceção do avanço por dente (f_z). A tabela 3.3 apresenta os parâmetros selecionados.

Tabela 3.3: Parâmetros de corte empregados no microfresamento do alumínio 6061.

Parâmetro de corte	Valor adotado
Rotação	6.000 rpm
Velocidade de corte (v_c)	7,5 m/min
Avanço por dente (f_z)	5, 10, 15 e 20 μm
Profundidade de corte (a_p)	60 μm
Penetração de trabalho (a_e)	400 μm
Número de dentes	2

Para a execução do microfresamento, submeteu-se a amostra, de dimensões 90 mm x 6,35 mm x 25 mm, à um processo de preparação da superfície, com aplicação do fluido de corte BIO100e, por meio de uma fresa maior de aço rápido, sem revestimento, com 4 arestas de corte e 10 mm de diâmetro, com a finalidade de garantir o paralelismo e a planicidade da amostra, a fim de diminuir possíveis erros que poderiam influenciar durante o microfresamento. Os parâmetros de corte empregados na preparação da superfície estão expressos na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros de corte empregados na preparação da superfície da liga de alumínio 6061.

Parâmetro de corte	Valor adotado
Rotação	2.000 rpm
Velocidade de corte (v_c)	125,6 m/min
Avanço por dente (f_z)	0,006 mm/dente
Velocidade de avanço (v_f)	240 mm/min

A operação de microfresamento se deu com a aplicação de um fluido solúvel sintético biodegradável BIO100e, do fabricante BQL. Trata-se de um óleo sintético, que apresenta ótima durabilidade, alto poder lubrificante e corrosivo e, não produz manchas no alumínio (BQL, 2021). Para cada valor de avanço por dente, foram executados um ensaio e uma réplica, totalizando 8 microcanais, com espaçamento de 1 mm entre os centros, cada um com comprimento de 6,35 mm, como pode ser observado na Figura 3.3, cuja dimensões estão em mm. Os parâmetros de corte, por canal, estão expressos na tabela 3.5.

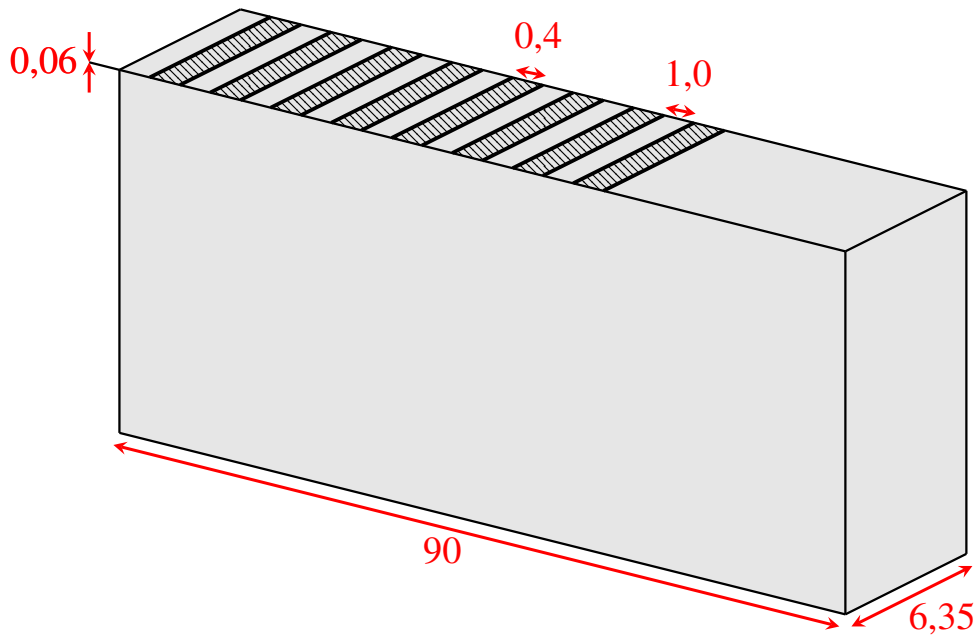


Figura 3.3: Esquema da geometria e dimensões dos canais microfresados em uma liga de Al6101.

Tabela 3.5: Parâmetros de corte por canal.

Parâmetro	f_z (μm)	V_f (mm/min)	V_c (m/min)	Rotação (rpm)	a_e (μm)	a_p (μm)
Canal 1	5	60	7,5	6.000	400	60
Canal 2						
Canal 3	10	120				
Canal 4						
Canal 5	15	180				
Canal 6						
Canal 7	20	240				
Canal 8						

3.4 VÁRIÁVEIS DE SAÍDA

As variáveis de saída foram obtidas através do microscópio confocal a laser LEXT OLS4100 da Olympus (Figura 3.4), disponível no laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Universidade de Brasília. Através do uso do microscópio foi possível analisar as seguintes variáveis:

- i) Rugosidade superficial;
- ii) Altura das rebarbas;
- iii) Qualidade da superfície;



Figura 3.4: Microscópio Olympus LEXT OLS4100.

3.4.1 Rugosidade Superficial

Análogo ao trabalho de Silva (2021), para a análise da rugosidade superficial foram realizadas três medições nos canais microfresados, em pontos distintos, assim foi possível obter a média e o desvio padrão. As medições da rugosidade seguiram a norma ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008), a qual determina o parâmetro R_a , comprimento de amostragem $n = 5$, *cut-off* $\lambda = 0,8$ mm e, a utilização do filtro de Gauss. Os resultados foram apresentados com um intervalo de confiança de 95,45%. É importante salientar que, todas as medições de rugosidade foram realizadas na direção do avanço, como mostra a Figura 3.5. Para as medições optou-se por utilizar a lente com aumento de 20x, segundos as recomendações de foco e favorecendo o enquadramento do canal.

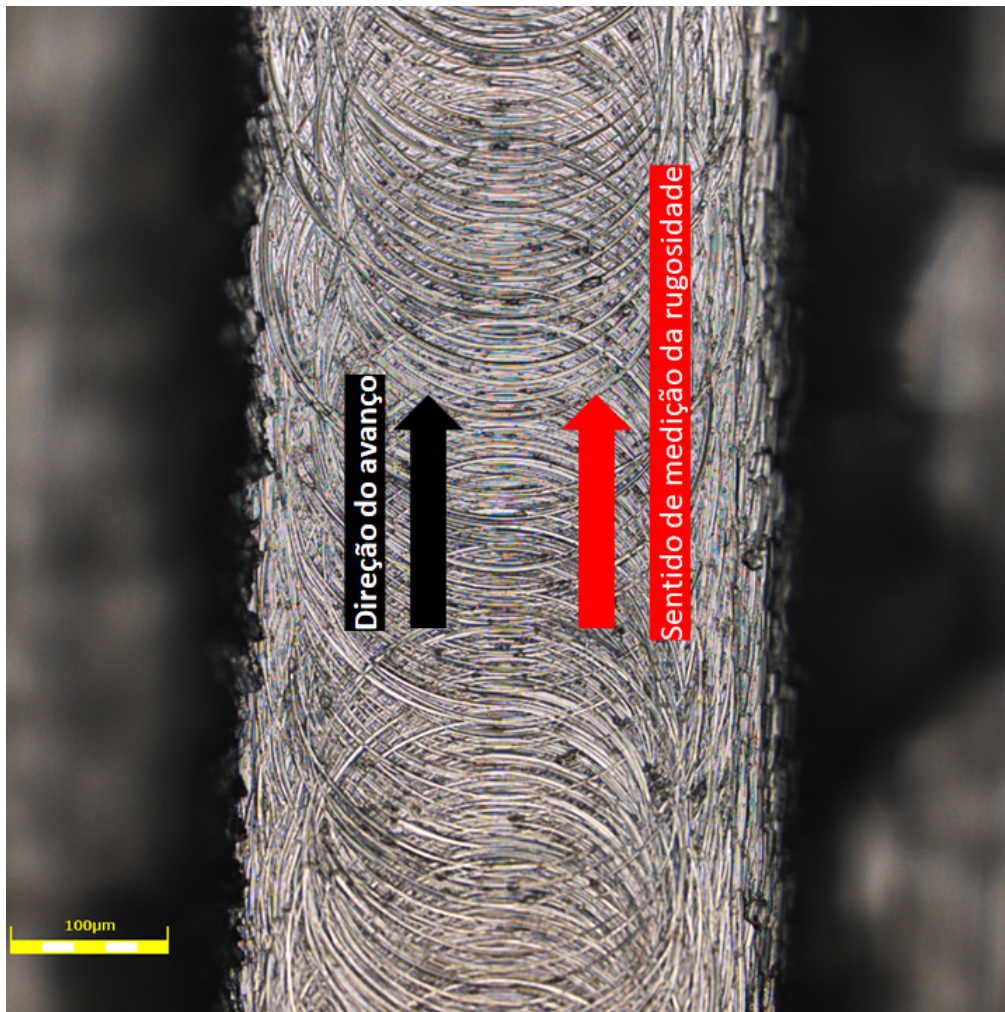


Figura 3.5: Direção de medição da rugosidade.

3.4.2 Altura das Rebarbas

As medições das alturas das rebarbas foram realizadas conforme a metodologia proposta por Silva (2021). Através das imagens obtidas pelo microscópio posicionou-se, nas imagens, linhas verticais de referências, de forma a coincidir com a superfície da amostra, essas linhas não sofreram nenhuma alteração. A partir disso, traçou-se uma linha de medição nas extremidades das rebarbas concordantes e discordantes e, então, utilizou-se o software do microscópio para fazer a leitura da distância entre essas linhas, essa distância corresponde a altura das rebarbas. A linha vertical de referência também foi posicionada no fundo do microcanal, afim de determinar a profundidade do canal a partir da leitura do software. Em cada microcanal realizou-se três medições, uma localizada mais no começo do canal, outra no meio e, a última no final do canal, para que então fosse possível determinar a média e o desvio padrão das alturas correspondentes. Essa metodologia pode ser visualizada na Figura 3.6.

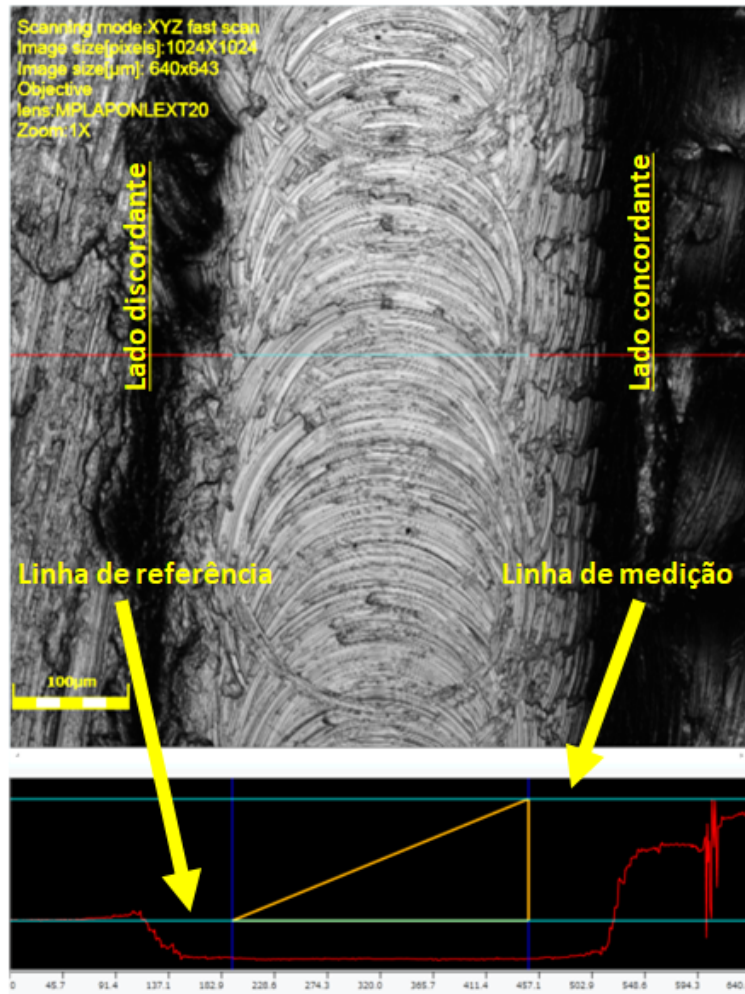


Figura 3.6: Medição da altura das rebarbas.

3.4.3 Qualidade da Superfície

A análise da qualidade da superfície da peça deu-se de maneira qualitativa, ou seja, através de imagens obtidas no microscópio. Analisou-se se existe a presença de vazios e, de material aderido no fundo do canal, o que pode prejudicar o acabamento final da peça. Também observou-se se existe a presença de efeito *ploughing* no fundo do canal.

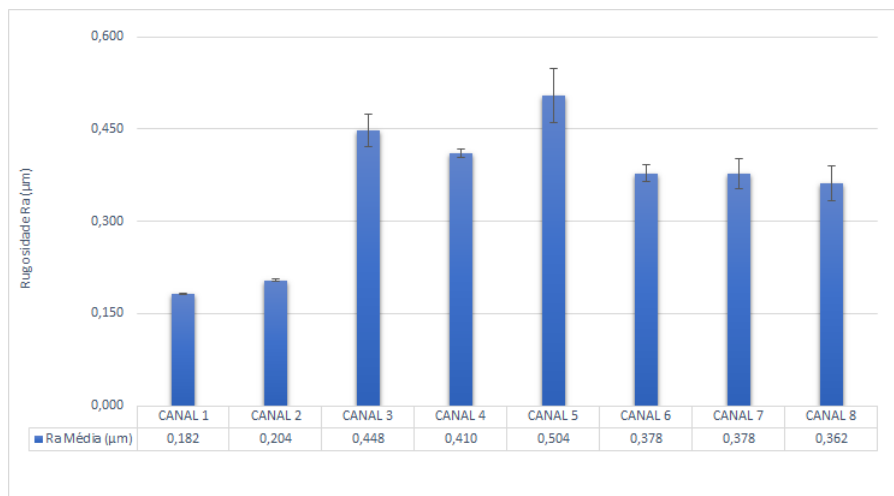
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 QUALIDADE SUPERFICIAL

4.1.1 Rugosidade superficial e imagens dos canais microusinados

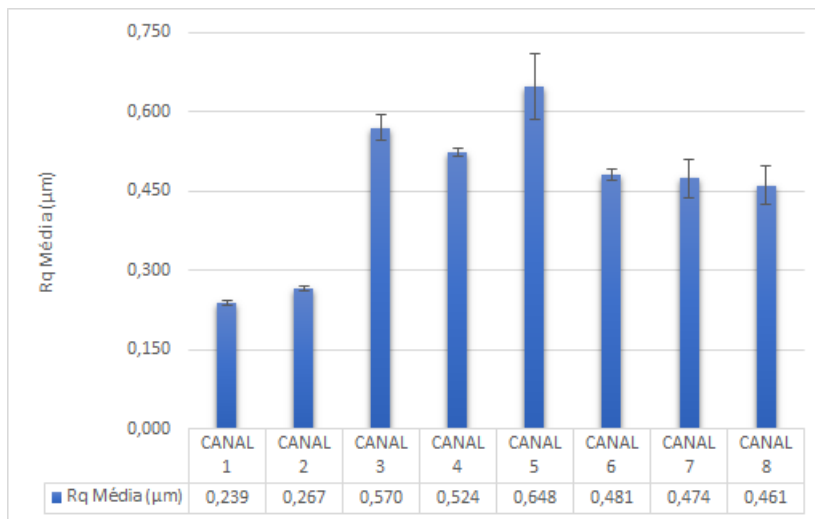
Para cada microcanal usinado, foram calculados as médias e os desvios padrões dos valores obtidos para as rugosidades, que por sua vez, foram medidas na direção do avanço, no centro do canal, como mostrado na Figura 3.5, da seção 3.4. Os gráficos com os valores das rugosidades Ra, Rt e, Rq, estão apresentados na Figura 4.1, eles foram traçados com o objetivo de facilitar a leitura e interpretação dos dados obtidos nos ensaios.

A partir da interpretação gráfica da Figura 4.1 é possível observar que para o principal parâmetro de rugosidade (Ra), o canal 5, cujo avanço por dente é de 15 μm , apresentou a maior rugosidade superficial. O que é confirmado pelos gráficos de rugosidades Rq e Rt. É importante ressaltar que, devido aos altos valores encontrados para a rugosidade Rt, no canal 5, o desvio padrão (barra de erro) para este canal foi de 40,49 μm , o que levou omiti-lo do gráfico para que sua visualização e interpretação não fossem prejudicadas. Já os canais que apresentaram a menor rugosidade foram os canais 1 e 2, que são o ensaio e a réplica do avanço por dente de 5 μm .

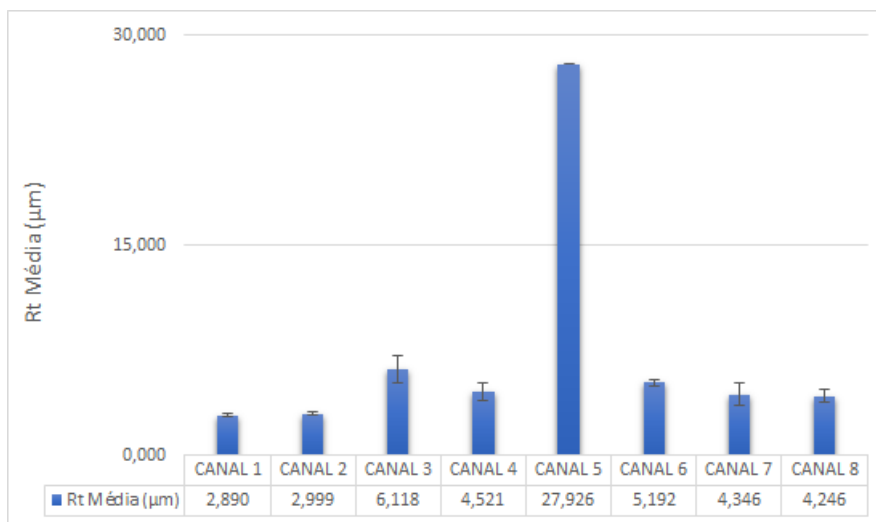


(a) Rugosidade Ra

Figura 4.1: Valores das rugosidades para o ensaio de microfresamento de uma liga Al 6101 T6.



(b) Rugosidade Rq



(c) Rugosidade Rt

Continuação da Figura 4.1: Valores das rugosidades para o ensaio de microfresamento de uma liga Al 6101 T6.

É notório que, ao contrário do que era esperado na literatura, os canais 7 e 8, que possuem os maiores avanços por dente e o maior desgaste proveniente do maior comprimento usinado, não apresentaram as maiores rugosidades. A rugosidade apresentada no canal 5 pode ter sido influenciada pela forte presença do efeito *ploughing* encontrado no fundo do canal, como pode ser observado na Figura 4.2, indicado pelas setas amarelas.

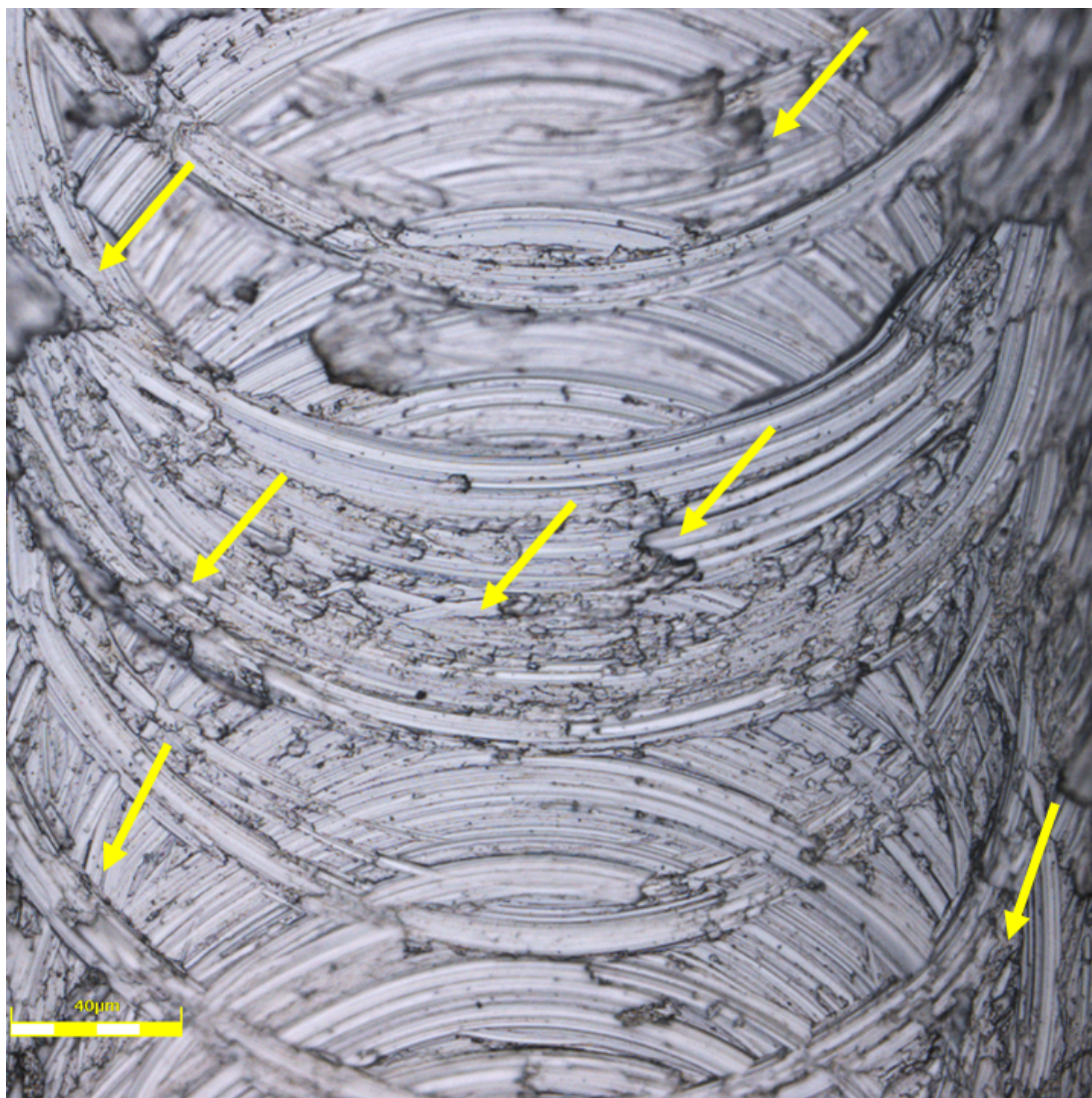


Figura 4.2: Presença do efeito ploughing observada no fundo do canal 5.

Em relação a uma possível correlação do desgaste à qualidade do canal, o autor Ziberov (2018) mostrou que a microferramenta pode apresentar uma quebra em sua ponta e um desgaste de flanco (Figura 4.3) que, segundo o autor, parece ser o tipo de desgaste dominante em processos de microfresamento. Observou-se também que a microferramenta apresentou o mecanismo attrition, que é um mecanismo de desgaste conhecido como "aderência e arrastamento" (Machado et al., 2009). Esse mecanismo ocorre sob condições de baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material, na superfície de saída da ferramenta, se torna irregular, o que pode ter ocorrido nos ensaios aqui apresentados. Somado a isto, nessas condições, pode surgir o aparecimento da aresta postíça de corte (APC) (Machado et al., 2009).

Ziberov, 2018 comenta ainda que em seu trabalho, para a condição de corte a seco, notou-se um arredondamento da aresta principal de corte e a presença de material aderido a aresta, o que pode ser considerado uma APC (Figura 4.4). Entretanto, o desgaste está concentrado na ponta da ferramenta, o que aumenta o seu arredondamento. Ao avaliar as superfícies do microcanal

o autor observou que, apenas os primeiros canais possuem marcas de avanço mais uniformes, enquanto os outros canais apresentam marcas de avanço, deixadas pela ferramenta, mais visíveis e profundos, devido a presença de APC na ferramenta (Ziberov, 2018).

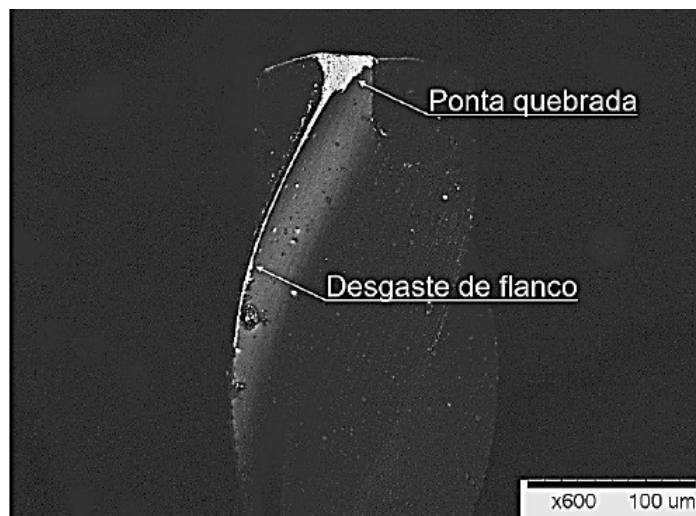


Figura 4.3: Desgaste de flanco e ponta quebrada, em uma microfresa revestida de DLC (adaptado de Ziberov, 2018).

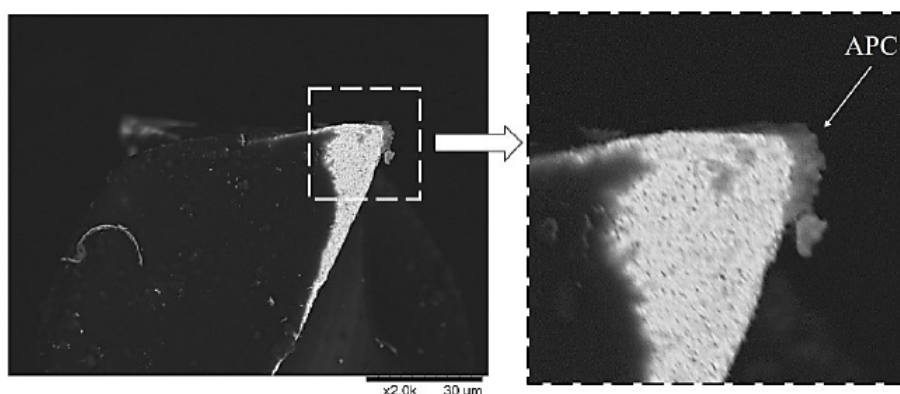


Figura 4.4: Presença de aresta postiça de corte em uma microfresa revestida de DLC, na superfície principal de folga, durante a microusinagem (adaptado de Ziberov, 2018).

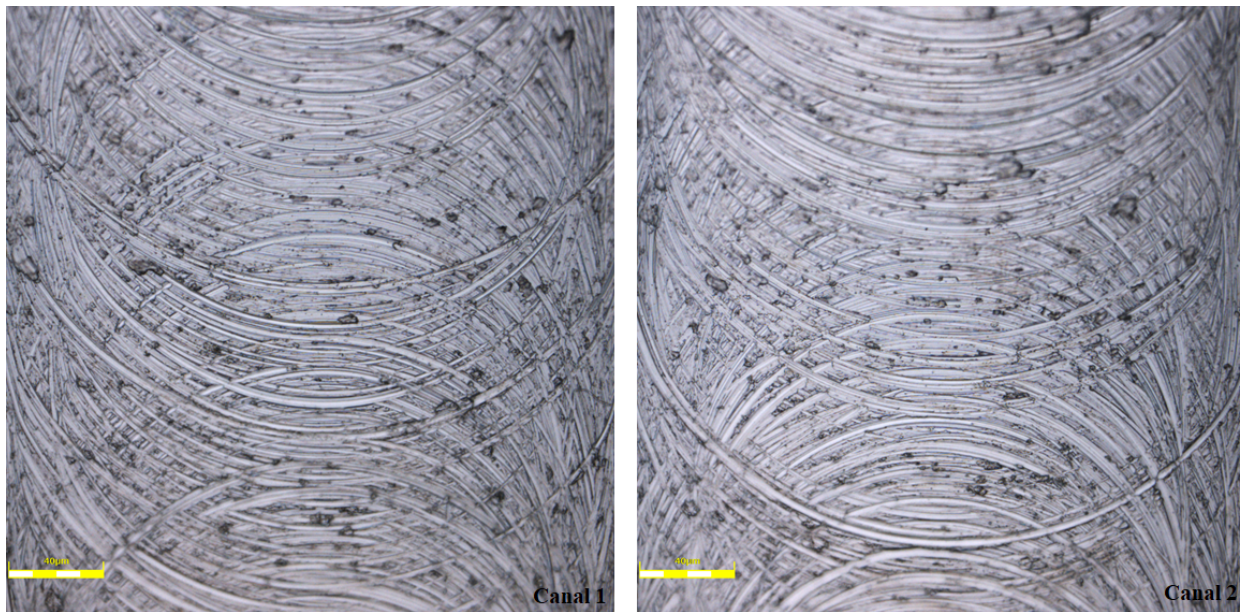
Observando as imagens microscópicas obtidas para os microcanais usinados (Figura 4.5) é possível notar o comportamento relatado por Ziberov (2018). Ao observar o fundos dos canais 1 e 2, nota-se que as marcas deixadas pela ferramentas são uniformes, o que é explicado pela condição da ferramenta de corte que, no começo do processo, era uma ferramenta de corte nova. O comportamento começa a mudar quando observa-se os fundos dos canais 3 e 4, onde as marcas começam a se tornarem mais fortes e mais profundas, supõem-se então que o desgaste da ferramenta começa no canal 3. É no canal 5 que é possível identificar as marcas mais fortes e profundas. Baseando-se no trabalho de Ziberov (2018) acredita-se que, para um avanço por dente de $15 \mu\text{m}$ e uma velocidade de corte de $7,5 \text{ m/min}$, a ferramenta tenha apresentado um arredondamento de aresta, além da presença de aresta postiça de corte. Nos canais 6, 7 e 8, as marcas da ferramenta voltam a ficar mais uniformes, apesar de serem mais evidentes do que as apresentadas

nos canais 1 e 2. Isso pode ser explicado pelo aumento do raio de ponta.

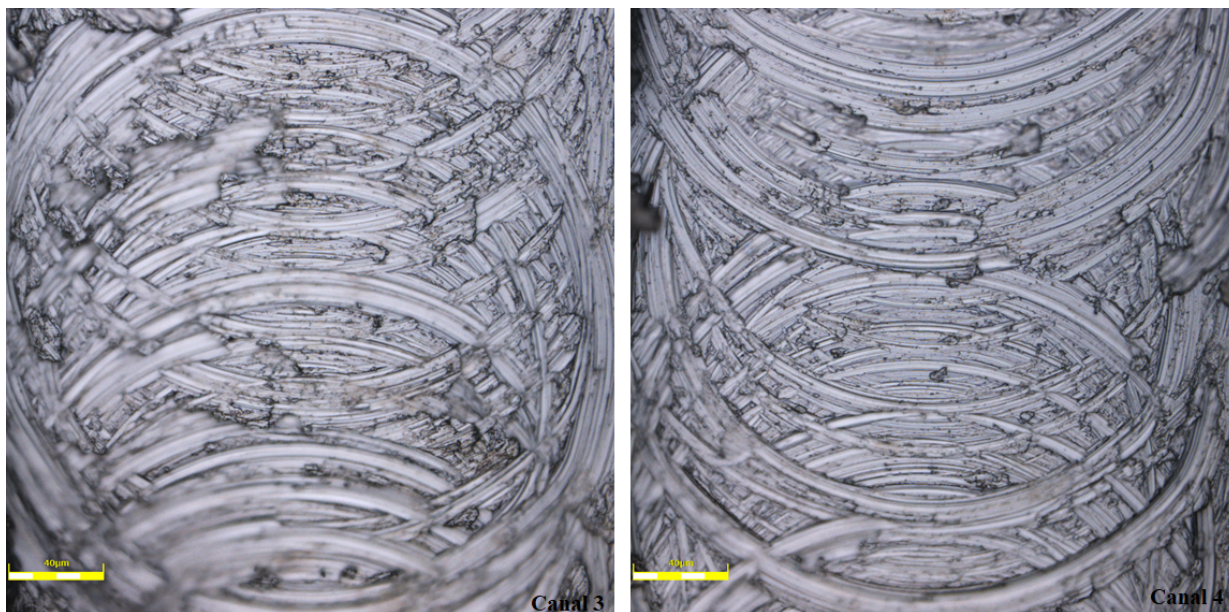
Segundo Machado et al. (2009) a rugosidade teórica de uma superfície pode ser calculada pela equação (4.1):

$$R_a = \frac{f_z^2}{18 \cdot \sqrt{3R}} \quad (4.1)$$

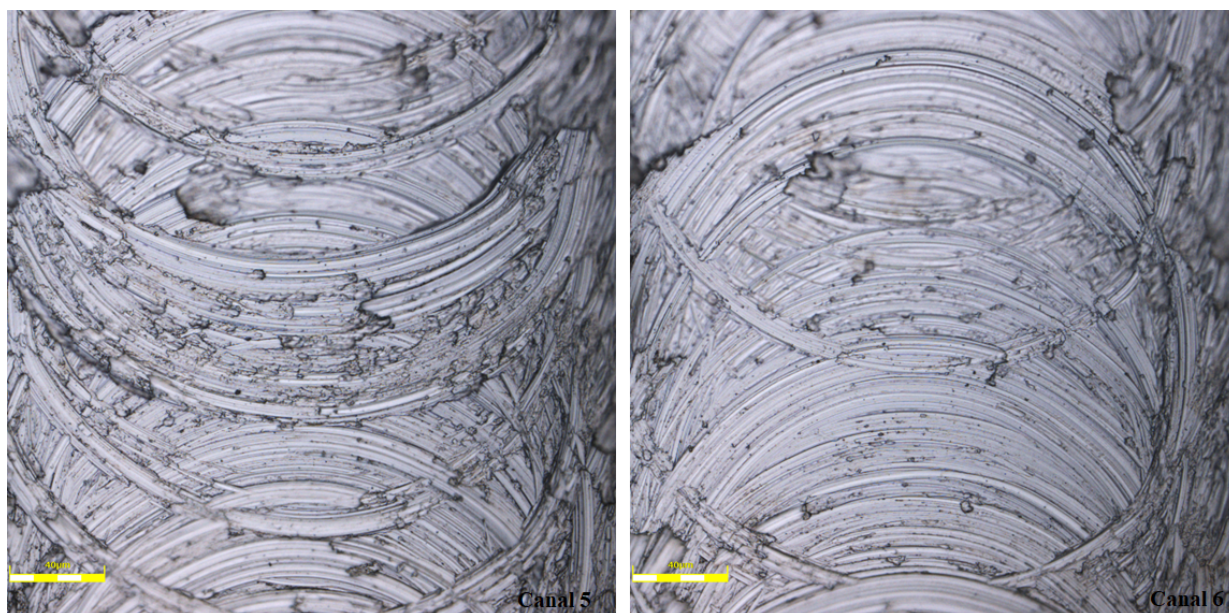
onde, R é o raio de ponta e f_z é o avanço por dente. Como a rugosidade R_a e o raio de ponta são inversamente proporcionais, um maior aumento do desgaste do raio resultará em uma menor rugosidade superficial. Ou seja, um maior aumento do avanço por dente gera maior desgaste do raio de ponta e, conseqüentemente, menores rugosidades.



(a) Fundo dos canais 1 e 2.

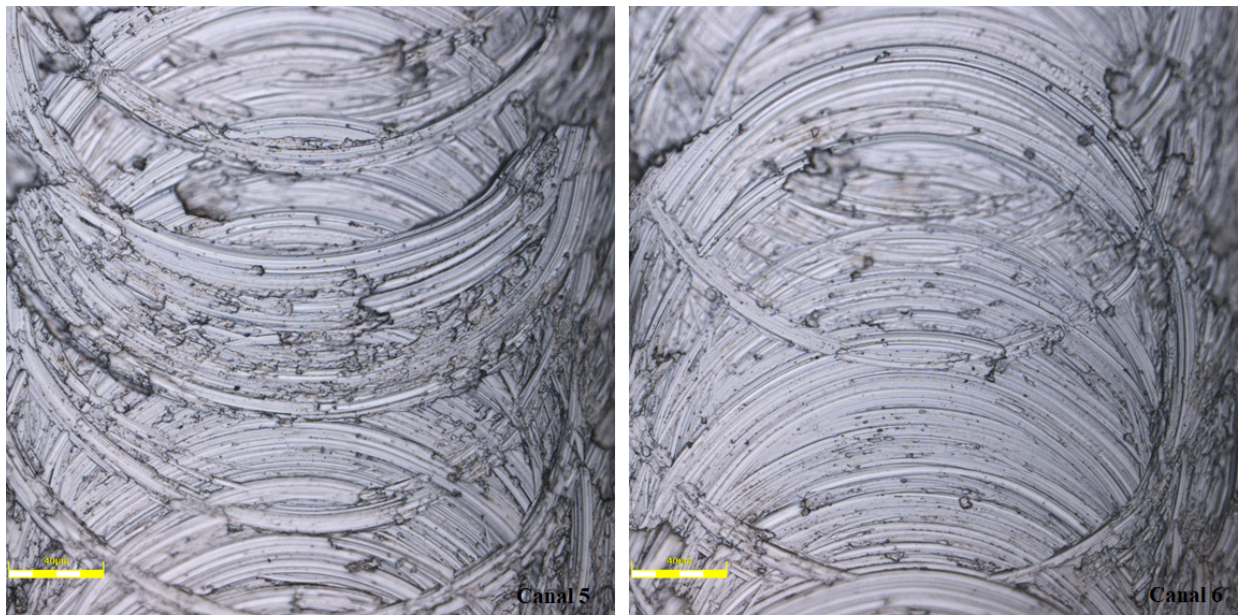


(b) Fundo dos canais 3 e 4.



(c) Fundo dos canais 5 e 6.

Figura 4.5: Fundo dos canais microssinados em uma liga de alumínio AL6101 T6.



(d) Fundo dos canais 7 e 8.

Continuação da Figura 4.5: Fundo dos canais microusinados em uma liga de alumínio AL6101 T6.

Uma característica típica de superfícies microusinadas por ferramentas com a presença de aresta postiça de corte é a presença de materiais aderidos ao fundo do canal, que podem se soltar da ferramenta de corte (Ziberov, 2018). Nesse sentido, é possível observar materiais aderidos ao fundo dos canais microusinados, indicados pelas setas presentes na Figura 4.6.

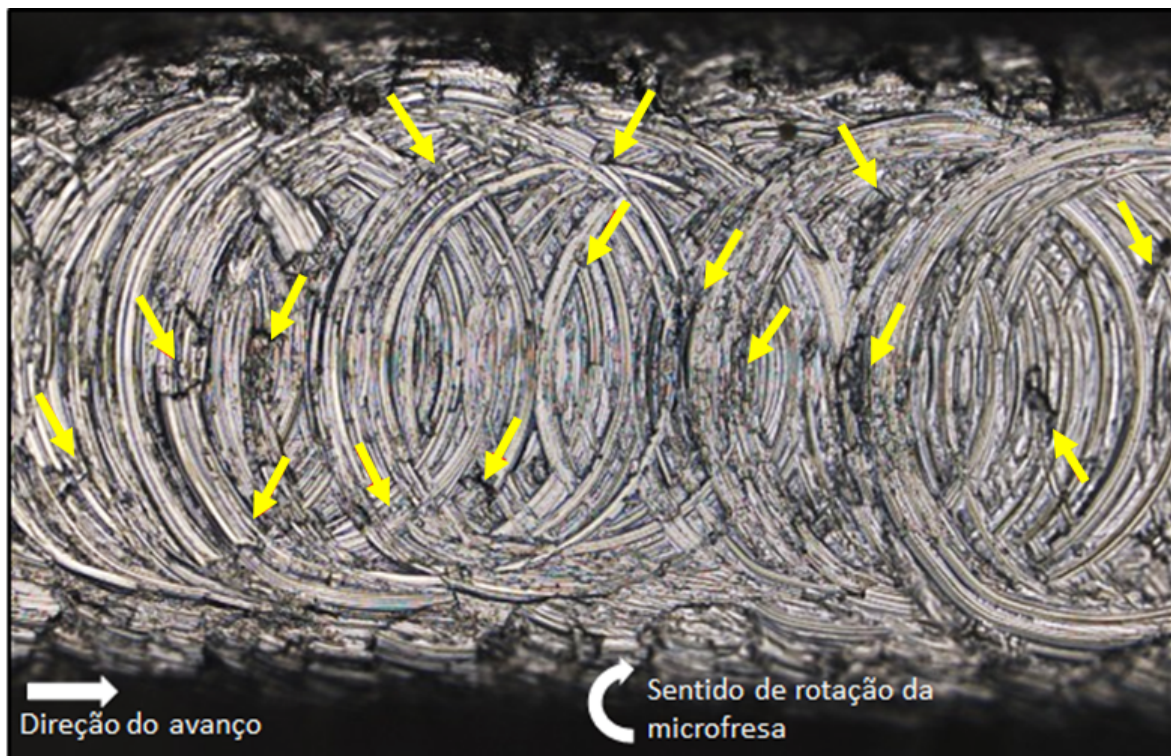


Figura 4.6: Presença de materiais aderidos ao fundo dos canais microusinados em uma liga de alumínio Al 6101 T6.

Outro comportamento observado por Ziberov (2018) é a variação do diâmetro da microferramenta. É possível observar que, com o aumento do desgaste da ferramenta, a marca do diâmetro, deixada na superfície diminui (Figura 4.7). Nesse sentido, analisou-se se ocorreu variação do diâmetro no microfresamento da liga de alumínio 6101 e, o comportamento relatado pelo autor foi identificado nas marcas da ferramenta deixadas nos canais, como mostra a Figura 4.8. Ou seja, ocorreu um desgaste da ferramenta ao longo do microfresamento dos canais.

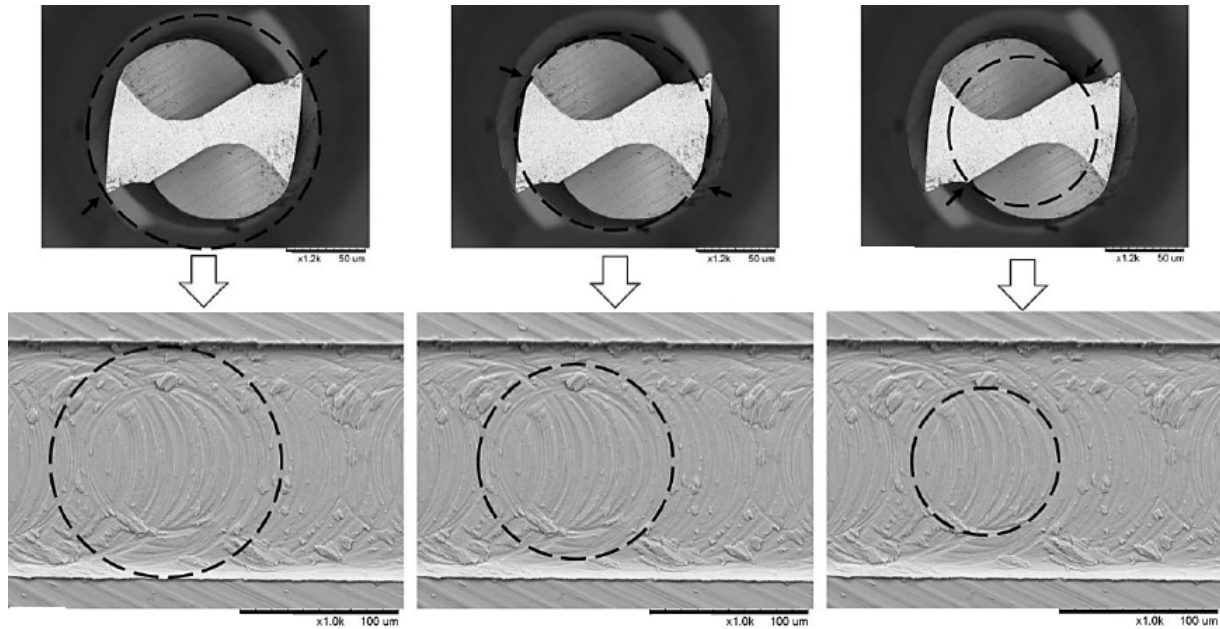


Figura 4.7: Marcações circulares da microfresa (adaptado de Ziberov, 2018).

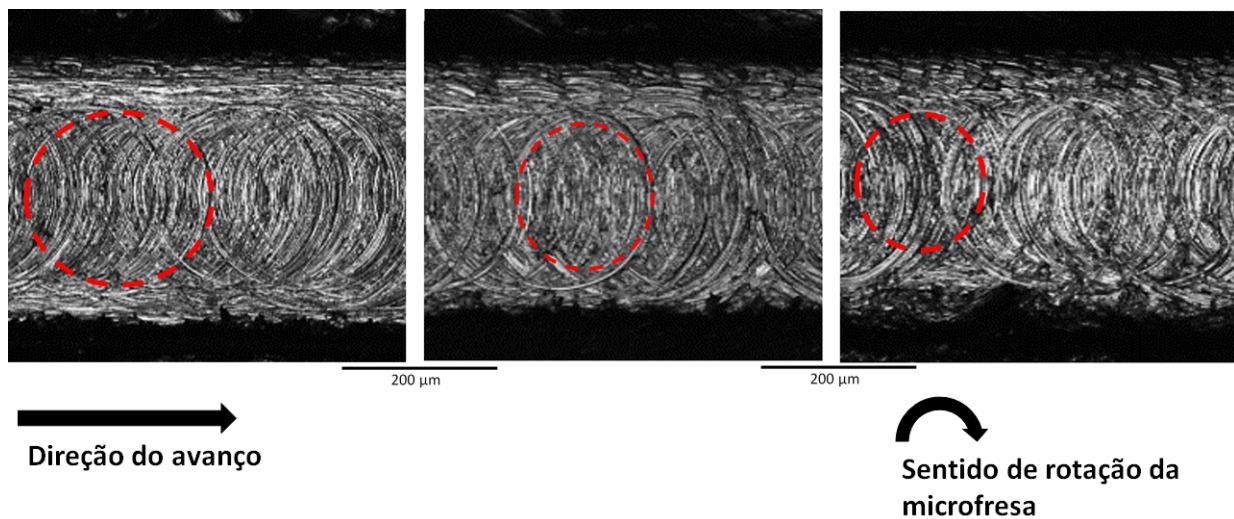


Figura 4.8: Marcações circulares da microfresa no microfresamento da liga de alumínio 6101.

4.1.2 Altura das rebarbas

As rebarbas resultantes do processo de microfresamento da liga de alumínio 6101 foram divididas em concordante e discordante, de acordo com o lado de formação e, o sentido de avanço adotado. Os valores encontrados para as rebarbas concordantes e discordantes, respectivamente, estão representados na Figura 4.9. As rebarbas foram medidas conforme a metodologia proposta por Silva (2021), onde posicionou-se uma linha de referência condizente com a superfície da amostra e, uma linha de medição, como mostra a Figura 3.6, da seção 3.4.

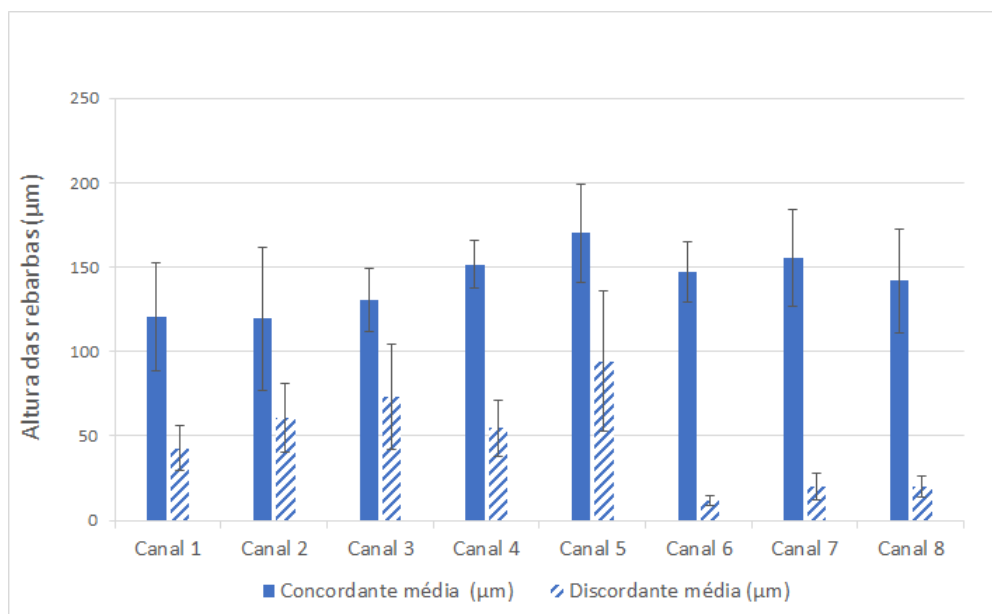


Figura 4.9: Altura das rebarbas concordantes e discordantes para o microfresamento de uma liga de alumínio 6101.

É possível observar que, para o lado concordante do microfresamento o tamanho médio das rebarbas variou de, aproximadamente, $119,59 \mu\text{m}$ a $170,11 \mu\text{m}$ e, para o lado discordante, o tamanho médio variou de $12,0 \mu\text{m}$ a $94,3 \mu\text{m}$. Sendo assim, as maiores rebarbas foram encontradas do lado concordante, resultado semelhante foi observado no trabalho de Kiswanto, Zariatin e Ko (2014) e no trabalho de Kumar, Deb e Paul (2018).

Os maiores valores, tanto para as rebarbas concordantes quanto para as rebarbas discordantes foram encontrados no canal 5, resultado análogo ao obtido para a rugosidade. Este comportamento pode estar relacionado ao desgaste da ferramenta de corte, segundo Kiswanto, Zariatin e Ko (2014) o desgaste da ferramenta têm forte influência nas alturas das rebarbas, isso porque ferramentas desgastadas produzem maiores rebarbas. A modificação da geometria da ferramenta de corte, causada pelo desgaste, observada na Figura 4.8 também influencia nesse resultado. Associado a isso, a ductilidade do material também tem forte influência nos altos valores observados. Ziberov et al. (2016), relata resultados semelhantes ao microssinar um material de alta ductilidade.

Vale ressaltar que, apesar da grande influencia do desgaste da ferramenta os últimos canais, com $f_z = 20 \mu\text{m}$, apresentou menores valores de rebarba. Oliveira (2019) relatou em seu estudo

de microfresamento de Inconel 718, utilizando as mesmas microfresas, que valores de avanço maiores resultavam em uma significativa redução das rebarbas. Assim, neste estudo, pode ter havido um efeito combinado há ao mesmo tempo um efeito de aumento das rebarbas devido ao desgasta e uma tendencia de redução devido ao avanço

Os menores valores de rebarbas concordantes, que são predominantes no processo, foram apresentados nos canais 1 e 2, que apresentam valores semelhantes, 120,4 μm e 119,6 μm , respectivamente. Acredita-se que, para esses canais, a microfresa não tenha sofrido desgaste, o que explica os menores valores. Além disso, esses canais apresentam os menores avanços por dente, o que também influencia no resultado. Zhang, Yuan e Wang (2017) encontraram resultados semelhantes para os microcanais de uma liga de alumínio 6061-T6.

Os valores encontrados para as rebarbas variam ao longo do canal, segundo Kiswanto, Zariatin e Ko (2014) isso se dá devido ao avanço do desgaste da ferramenta. A partir das imagens microscópicas obtidas é possível observar que a formação de rebarbas apresenta algumas interrupções (Figura 4.10), isso acontece devido a presença de aresta postiça de corte (APC) (Kiswanto, Zariatin e Ko, 2014, Kumar, Deb e Paul; 2018).

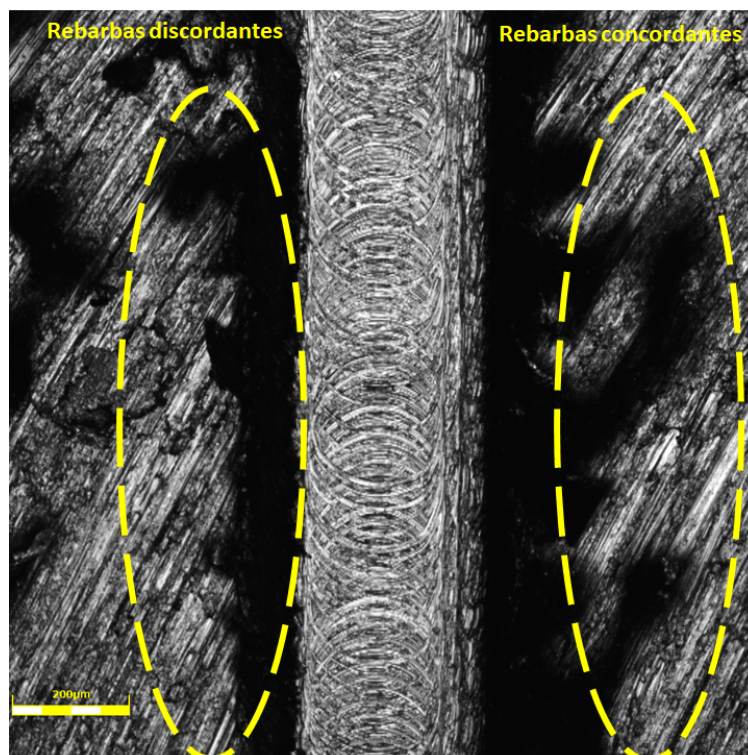


Figura 4.10: Rebarbas descontínuas observadas no canal 6 do microfresamento de uma liga de alumínio 6101 T6.

A partir dos resultados obtidos é difícil distinguir o tipo de rebarba formada no processo, uma vez que as elevadas alturas prejudicam a visualização delas no microscópio óptico. Devido a forte presença do efeito ploughing, abordada na seção 4.1.1, acredita-se que o tipo predominante são rebarbas primárias, que são formadas quando a ferramenta não é capaz de gerar cavacos e, predomina o atrito. A presença de rebarbas concordantes curvadas, indicadas com círculo vermelho

na Figura 4.11, também indica a formação de rebarbas primárias. Em relação a localização das rebarbas, predomina-se as rebarbas de topo concordante e discordante, sendo essas as que mais sofrem influência dos parâmetros de corte (Lee e Dornfeld, 2002).

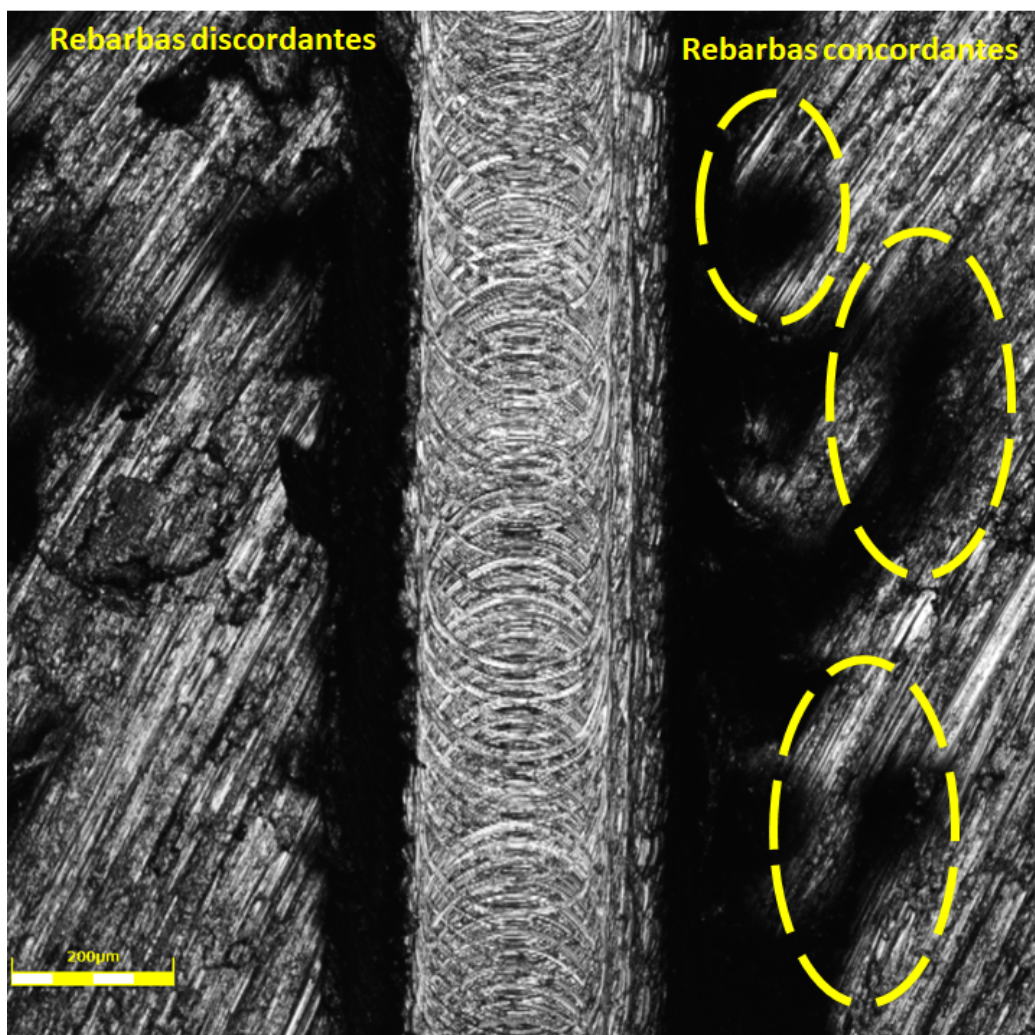


Figura 4.11: Rebarbas curvadas, observadas no canal 4 do microfresamento da liga de alumínio 6101.

5 CONCLUSÕES

A partir da revisão bibliográfica e dos resultados experimentais do microfresamento da liga Al 6101, pode-se concluir que:

i. No que diz respeito a rugosidade:

- Os maiores valores de rugosidade Ra, Rt e Rq foram observados no canal 5, cujo avanço por dente foi de 15 μm , com velocidade de corte de 7,5 m/min, sendo os valores das rugosidades respectivamente de 0,504 μm , 0,648 μm e 27,926 μm ;
- Os maiores valores observados não estão associados ao maior avanço por dente. Porém, podem ser explicados pela forte presença do efeito ploughing e um possível desgaste da ferramenta de corte;
- Os menores valores de rugosidade Ra, Rt e Rq foram observados nos canais 1 e 2, cujo avanços são de 5 μm combinados com uma velocidade de corte de 7,5 m/min, sendo os valores das rugosidades respectivamente de 0,182 μm e 0,204 μm para Ra, 2,890 μm e 2,999 μm para Rt e 0,239 μm e 0,267 μm para Rq. Por se tratar dos primeiros canais do experimento, a condição de ferramenta de corte nova colabora para o bom resultado;
- Como resultado do microfresamento, observou-se materiais aderidos ao fundo dos canais. O que pode indicar a presença da aresta postiça de corte (APC) na ferramenta;
- Observou-se também, através das marcas deixadas pela ferramenta de corte, que houve uma redução de seu diâmetro, o que indica um desgaste da ferramenta de corte;

ii. No que diz respeito as alturas das rebarbas:

- Os maiores valores observados para as rebarbas, tanto concordante quanto discordante, foram de 170,1 μm e 94,3 μm , respectivamente e, foram observadas no canal 5, com avanço por dente de 15 μm ;
- O lado discordante apresentou as maiores rebarbas do processo, como era esperado na literatura;
- As maiores rebarbas apresentadas no canal 5, podem ser explicadas pelo desgaste da ferramenta de corte, uma vez que, ferramentas de corte desgastadas produzem maiores rebarbas;
- A modificação da geometria da ferramenta de corte também ajuda a explicar os altos valores encontrados. Além disso, as ligas de alumínio, de maneira geral, são materiais que apresentam alta ductilidade, o que influencia na formação de grandes rebarbas;
- Os maiores valores de avanço por dente, $f_z = 20 \mu\text{m}$, apresentaram as menores rebarbas uma vez que, maiores avanços por dente resultam em uma considerável redução de

rebarbas. Então, acredita-se que, neste estudo, ocorreu um efeito combinado entre o aumento de rebarbas devido ao desgaste e, uma tendência de redução devido ao avanço;

- As rebarbas predominantes no processo são rebarbas de topo, do tipo primárias;

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A fim de aprofundar os estudos e complementar os resultados aqui apresentados, sugere-se, como trabalho futuro:

- i. Realizar a análise da ferramenta de corte para constatar se de fato ocorreu desgaste;
- ii. Adaptar a máquina ferramenta para que seja possível refazer o ensaio utilizando parâmetros de corte mais elevados;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. Fundamentos e Aplicações do Alumínio. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2005. 68 p.

ABNT NBR ISO 4288. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas., 2008. 10 p.

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. Precision Engineering, Elsevier, v. 33, n. 4, p. 402–407, 2009.

ASLANTAS, K. et al. Cutting performance of nano-crystalline diamond (ncd) coating in micro-milling of ti6al4v alloy. Precision Engineering, Elsevier, v. 45, p. 55–66, 2016.

AVILA, M. C. et al. Deburring of cross-drilled hole intersections by mechanized cutting. 2004.

BAYESTEH, A.; KO, J.; JUN, M. B.-G. Micro Flat End Milling Simulation Model With Instantaneous Plowing Area Prediction. Journal of Micro and Nano-Manufacturing, v. 4, n. 2, 03 2016. ISSN 2166-0468. 021004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.4032757>>.

BERESTOVSKYI, D.; HUNG, W.; LOMELI, P. Surface finish of ball-end milled microchannels. Journal of Micro and Nano-Manufacturing, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 2, n. 4, 2014.

BIERMANN, D.; STEINER, M.; KREBS, E. Investigation of different hard coatings for micromilling of austenitic stainless steel. Procedia Cirp, Elsevier, v. 7, p. 246–251, 2013.

BISSACCO, G.; HANSEN, H. N.; CHIFFRE, L. D. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, v. 167, n. 2-3, p. 201–207, 2005.

BQL. BIO100E - Óleo Solúvel Biodegradável. 2021. Url<https://biolub.com.br/oleos-soluveis-sinteticos/bio-100e>.

BRADASCHIA, C. Fundação de ligas não ferrosas: apostila complementar. [S.l.]: ABM, 1987.

CAMPOS, F. d. O. Estudo das Forças de Corte no Microfresamento da Liga de Alumínio 6351-T6. Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

CARDOSO, P.; DAVIM, J. P. Micro milling of metallic materials-a brief overview. Transactions of FAMENA, Fakultet strojarstva i brodogradnje, v. 36, n. 2, p. 79–85, 2012.

CHAE, J.; PARK, S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 46, n. 3, p. 313–332, 2006. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505001306>>.

CHENG, K.; HUO, D. Micro-cutting - Fundamentals and Applications. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

CHERN, G.-L. et al. Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-edm. Precision Engineering, Elsevier, v. 31, n. 2, p. 122–129, 2007.

CÂMARA, M. et al. State of the art on micromilling of materials, a review. Journal of Materials Science & Technology, Elsevier, v. 28, n. 8, p. 673–685, 2012.

- DAVIS, J. R. et al. Aluminum and aluminum alloys. [S.l.]: ASM international, 1993.
- ENVEA. Micro-Sensors Cairsens. Bidart: Disponível em: <https://www.envea.global/design/medias/ENVEA_Cairsens_Air-quality-microsensors_EN.pdf>, 2008.
- FEITOSA, J. P. Caracterização da liga 6101 refinada com a adição de diferentes teores de cobre e solidificadas em molde unidirecional horizontal e em molde "U". Universidade Federal do Pará, 2007.
- FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. [S.l.]: Editora Blucher, 2018.
- FILIZ, S. et al. An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Elsevier, v. 47, n. 7-8, p. 1088–1100, 2007.
- FLEISCHER, J. et al. Design and manufacturing of micro milling tools. Microsystem Technologies, Springer, v. 14, n. 9, p. 1771–1775, 2008.
- GOMES, C. O. C. Processo de fabricação de tarugos pelo método hottop de ligas de alumínio da série 6xxx e as não conformidades desse processamento. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2013.
- GOMES, M. C. Estudo experimental do microfresamento do aço aisi 316l. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.
- HIRSCH, J.; SKROTZKI, B.; GOTTSTEIN, G. Aluminium alloys: the physical and mechanical properties. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. v. 1.
- HUO, D.; CHENG, K. Overview of micro cutting. In: Micro-cutting: fundamentals and applications. [S.l.]: Wiley, 2013. p. 10–14.
- Império dos Metais. Alumínio 6101. 2022.
https://www.imperiosmetais.com.br/pdf/download_ficha_tecnica/aluminio/6101.pdf. Acesso em: 12 fevereiro 2022.
- ISO 3685. Tool-life testing with single-point turning tools. International Organization for Standardization., 1993. 48 p.
- ISO 8688-1. Tool life testing in milling - Part 1: Face milling. International Organization for Standardization., 1989. 27 p.
- ISO 8688-2. Tool life testing in milling - Part 2: End milling. International Organization for Standardization., 1989. 26 p.
- JAIN, V. K. Editorial by VK Jain, IIT Kanpur (India) for the special issue on Micromanufacturing. [S.l.]: Springer, 2015.
- KIM, J.-D.; KIM, D. S. Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision machining. Journal of materials processing technology, Elsevier, v. 49, n. 3-4, p. 387–398, 1995.
- KISWANTO, G.; ZARIATIN, D.; KO, T. The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of aluminum alloy 1100 in micro-milling operation. Journal of Manufacturing Processes, v. 16, n. 4, p. 435–450, 2014. ISSN 1526-6125. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612514000450>>.
- KOU, Z. et al. Burr controlling in micro milling with supporting material method. Procedia Manufacturing, Elsevier, v. 1, p. 501–511, 2015.

- KUMAR, A. S.; DEB, S.; PAUL, S. A study on micro-milling of aluminium 6061 and copper with respect to cutting forces, surface roughness and burr formation. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. International Manufacturing Science and Engineering Conference. [S.l.], 2018. v. 51388, p. V004T03A014.
- LEE, K.; DORNFELD, D. An experimental study on burr formation in micro-milling aluminium and copper. Transactions of NAMRI/SM, v. 30, n. 46, p. 1–8, 2002.
- LI, K.-M.; CHOU, S.-Y. Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling. Journal of materials processing technology, Elsevier, v. 210, n. 15, p. 2163–2170, 2010.
- LIU, K.; MELKOTE, S. N. Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process. International Journal of Mechanical Sciences, v. 49, n. 5, p. 650–660, 2007. ISSN 0020-7403. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740306002116>>.
- LIU, X. et al. Cutting mechanisms and their influence on dynamic forces, vibrations and stability in micro-endmilling. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. [S.l.: s.n.], 2004. v. 47136, p. 583–592.
- MACHADO, A. et al. Teoria da usinagem dos materiais vol. Edgard Blücher, S. Paulo, Brasil, 371p, 2009.
- MAIA, A. M. P. et al. Efeito dos ciclos de solubilização e envelhecimento no comportamento da liga de alumínio 6101. 2012.
- MALCHER, L. et al. Experimental program and numerical assessment for determination of stress triaxiality and j3 effects on aa6101-t4. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, v. 106, p. 102476, 2020. ISSN 0167-8442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016784421930549X>>.
- MALEKIAN, M.; PARK, S. S.; JUN, M. B. Tool wear monitoring of micro-milling operations. Journal of Materials Processing Technology, v. 209, n. 10, p. 4903–4914, 2009. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013609000296>>.
- MASUZAWA, T. State of the art of micromachining. CIRP Annals, v. 49, n. 2, p. 473–488, 2000. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607634519>>.
- MASUZAWA, T.; TÖNSHOFF, H. Three-dimensional micromachining by machine tools. CIRP Annals, v. 46, n. 2, p. 621–628, 1997. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607608828>>.
- MITSUBISHI. Mitsubishi Carbide. 2018. Ur-
<<https://www.mitsubishicarbide.com/mmus/catalog/pdf/lj/lj403a.pdf>>.
- MITSUBISHI MATERIALS. Torneado/Fresado/Soluciones em Herramental. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.mitsubishicarbide.com/mmus/catalog/pdf/lj/lj403a.pdf>>.
- NAHATA, S.; KOTA, N.; OZDOGANLAR, O. B. Micromachining of coarse-grained aluminum including crystallographic effects. Journal of Manufacturing Processes, Elsevier, v. 57, p. 600–613, 2020.
- NG, C. K. et al. Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-t6. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 46, n. 9, p. 929–936, 2006. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505002130>>.
- OLIVEIRA, D. d. Efeito escala e integridade superficial no microfresamento da liga de níquel inconel 718. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

- SANTOS, A. G. d. Microfresamento de aço inoxidável duplex uns s32205 com ferramentas de metal duro revestidas com nitreto de titânio. Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- SANTOS, A. G. d. et al. Avaliação da qualidade de microcanais fabricados por microfresamento no aço inoxidável duplex UNS 32205. Anais do 8º Congresso Nacional de Engenharia de Fabricação, 2015.
- SHIZUKA, H. et al. Study on surface roughness in micro end milling of mold material. In: TRANS TECH PUBL. Advanced Materials Research. [S.l.], 2011. v. 325, p. 594–599.
- SILVA, G. d. P. Influência das rebarbas e métodos de rebarbação na medição de desgaste em microcanais de inconel 718. Universidade de Brasília, 2021.
- SILVA, N. F. A. d. et al. Ligas de alumínio para o fabrico de rodas de bicicletas. 2010.
- STOETERAU, R. Fundamentos dos processos de usinagem. São Paulo: USP, 2003.
- SUN, W. et al. Organs-on-chips and its applications. Chinese Journal of Analytical Chemistry, v. 44, n. 4, p. 533–541, 2016. ISSN 1872-2040. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872204016609209>>.
- TANSEL, I. et al. Tool wear estimation in micro-machining.: Part i: tool usage–cutting force relationship. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Elsevier, v. 40, n. 4, p. 599–608, 2000.
- TENG, X. et al. An experimental study on tool wear behaviour in micro milling of nano mg/ti metal matrix composites. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer, v. 96, n. 5, p. 2127–2140, 2018.
- TOLFREE, D.; JACKSON, M. J. Commercializing micro-nanotechnology products. [S.l.]: CRC Press, 2007.
- TORRE, J. Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão. São Paulo: Hemus, 2004.
- VENKATESH, V. et al. Review on the machining characteristics and research prospects of conventional microscale machining operations. Materials and Manufacturing Processes, Taylor Francis, v. 32, n. 3, p. 235–262, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1151045>>.
- VOGLER, M. P.; DEVOR, R. E.; KAPOOR, S. G. Microstructure-Level Force Prediction Model for Micro-milling of Multi-Phase Materials . Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 125, n. 2, p. 202–209, 04 2003. ISSN 1087-1357. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.1556402>>.
- YUAN, Z.; ZHOU, M.; DONG, S. Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining. Journal of Materials Processing Technology, v. 62, n. 4, p. 327–330, 1996. ISSN 0924-0136. 2nd International Conference on Production Engineering. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013696024296>>.
- ZHANG, Z.; YUAN, Z.; WANG, G. Formation and control technology of top burr in micro-milling. In: EDP SCIENCES. MATEC Web of Conferences. [S.l.], 2017. v. 108, p. 04003.
- ZHU, K.; WONG, Y. S.; HONG, G. S. Multi-category micro-milling tool wear monitoring with continuous hidden markov models. Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier, v. 23, n. 2, p. 547–560, 2009.
- ZIBEROV, M. Aplicação da microusinagem (miniaturização) nas artes plásticas—a obra de mykola syadristy. Manufatura em Foco, v. 5, n. 30, p. 22–23, 2017.
- ZIBEROV, M. Microfresamento da liga Ti-6Al-4V com microferramentas com diferentes revestimentos e aplicação de MQL. Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

ZIBEROV, M. et al. Wear of tialn and dlc coated microtools in micromilling of ti-6al-4v alloy. Journal of Manufacturing Processes, v. 56, p. 337–349, 2020. ISSN 1526-6125. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612520303042>>.

ZIBEROV, M. et al. Effect of cutting fluid on micromilling of ti-6al-4v titanium alloy. Procedia Manufacturing, Elsevier, v. 5, p. 332–347, 2016.

Apêndice A

Artigo publicado II Congresso Brasileiro interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS PARA A BAIXA USINABILIDADE DO INCONEL 718 COM FOCO NO PROCESSO DE FRESAMENTO

Luís Fillipe Lopes Torres¹, Gabriel de Paiva Silva¹, Geovanna Diniz Mendonça¹,
Déborah de Oliveira

¹Universidade de Brasília, Brasília, Brasil (luis.torres@aluno.unb.br)

Resumo: O Inconel 718 é um material amplamente usado devido às suas ótimas propriedades mecânicas. Porém, essas propriedades dificultam seu fresamento, elevando as forças de corte, vibrações e desgaste da ferramenta. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar as técnicas, parâmetros e ferramentas utilizadas para favorecer esse processo. A partir dos estudos analisados, foi possível observar tendências como: ferramentas de cerâmica, resfriamento criogênico e tratamento térmico das ferramentas.

Palavras-chave: Inconel 718; Fresamento; Ferramentas de cerâmica; Resfriamento criogênico; Tratamento térmico.

INTRODUÇÃO

As ligas termo resistentes e superligas são oriundas de desenvolvimento metalúrgicos em ligas já existentes, na maioria das vezes, com o objetivo de se obter melhores propriedades mecânicas. Essas ligas possuem elevados valores de resistência mecânica, usualmente maiores do que a maioria das ligas, e que se mantêm mesmo em altas temperaturas. Como características comuns dessas ligas, pode-se citar a baixa condutividade térmica, elementos altamente reativos e grande porcentagem de carbonetos dispersos na microestrutura, conforme pode ser observado na Figura 1 (Machado et al., 2009).

Por isso, as ligas refratárias, com destaque para as ligas de níquel, em condições econômicas de corte, possuem baixa usinabilidade quando comparadas à maioria das ligas metálicas. Essa situação pode ser agravada com a adição de cromo, usualmente utilizado para aumentar a resistência à corrosão, como no caso do Inconel 718 (Machado et al., 2009).

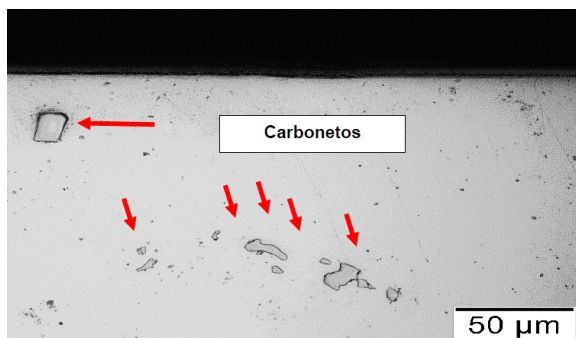


Figura 1. Carbonetos presentes na microestrutura do Inconel 718 (De Oliveira, 2017).

Pelo fato de possuir elevada resistência mecânica, elevada resistência a corrosão, boa resistência à fluência e a fadiga e capacidade de operar em altas temperaturas, o Inconel 718 é muito usado em diferentes indústrias (Sugahara et al., 2009). De acordo com Ezugwu et al. (1999), as ligas à base de níquel como o Inconel 718 são bastantes empregadas em aeronaves, veículos espaciais, motores de foguete e de turbina a gás, reatores nucleares, usinas a vapor, submarinos, entre outros, devido à capacidade de manter suas propriedades mecânicas em elevadas temperaturas.

Considerando as aplicações mencionadas e os ambientes em que peças de Inconel 718 operam, muitas vezes sujeitas a corrosão e/ou elevados esforços mecânicos, é necessário que o resultado da usinagem gere uma peça de elevada qualidade, minimizando defeitos que poderiam levar a falhas. Assim, pode-se sumarizar essas características desejáveis para as peças de Inconel 718, como sendo peças elevada qualidade superficial.

Segundo Machado et al. (2009), os processos de usinagem convencional envolvem deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e reações químicas interferem de diferentes formas na superfície usinada, fazendo com que o termo integridade superficial seja usado para descrever a qualidade da superfície em serviço e das camadas subsequentes.

No entanto, conforme mencionado, a obtenção de uma boa qualidade superficial em peças de Inconel 718, não é trivial. Ezugwu et al. (1999) sumariza as principais características que fazem com que as ligas de níquel tenham baixa usinabilidade:

Apêndice B

Artigo publicado no XXIV Colóquio de Usinagem, do Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LAUS).

INFLUÊNCIA DO AVANÇO NA QUALIDADE SUPERFICIAL DE CANAIS OBTIDOS POR MICROFRESAMENTO DA LIGA AL6101

Geovanna Diniz Mendonça, Universidade de Brasília (UnB), geovanna.diniz@aluno.unb.br
Gabriel de Paiva Silva, Universidade de Brasília (UnB)
Déborah de Oliveira, Universidade de Brasília (UnB)

Resumo. A microusinagem se destaca dos diferentes processos de usinagem por produzir peças com dimensões reduzidas. Ao se aplicar este tipo de processo, as teorias de usinagem macro convencionais não podem ser utilizadas, uma vez que a ferramenta de corte não será considerada perfeitamente afiada e haverá muita deformação plástica, dificuldade na formação do cavaco, sulcamento (ploughing) e formação de rebarbas com grandes dimensões. Estes efeitos podem ser agravados quando se usina materiais dúcteis, uma vez que são mais suscetíveis a essas deformações. No entanto, ligas de alumínio tem alta aplicabilidade em microcomponentes, por possuírem resistência a corrosão e baixa densidade, algumas ligas ainda possuem características elétricas desejáveis. Pode-se notar que, apesar da dificuldade associada, é importante que se estude o microfresamento dessas ligas, por isso, o objetivo deste trabalho é estudar o microfresamento da liga de alumínio AL6101. Para isso, será utilizada uma microfresa com 400 μm de diâmetro, revestida com $\text{Ti}(\text{Al},\text{N})$. O parâmetro de corte a ser estudado será o avanço, pois de acordo com a literatura é o parâmetro que mais influencia na qualidade superficial e nas rebarbas em microfresamento. Desta forma, foi selecionada através da literatura uma faixa de avanços em que se espera estar contida a espessura mínima de corte, além disso, o trabalho visa verificar um valor de avanço por dente ótimo para obtenção das menores rebarbas possíveis sem deteriorar a qualidade superficial do micro canal.

Palavras-chave: microfresamento, qualidade superficial, rebarbas, AL6101.

1. INTRODUÇÃO

A microusinagem é um processo de fabricação que se destaca com o aumento da demanda de peças com características em escala nano ou micro, por exemplo na fabricação de microcomponentes usados nas indústrias médica, química, automotiva, entre outros. Na literatura, ainda não existe uma única definição para microusinagem. Segundo Ziberov et al. (2016), a microusinagem mecânica é o processo de fabricação de dispositivos e componentes miniaturizados com tamanhos que podem divergir de dezenas de micrometros até vários milímetros. Para Câmara et al. (2012), este processo é definido com base nas dimensões da ferramenta de corte, que deve estar na faixa de 1 a 1000 micrometros de diâmetro. A microusinagem pode, ainda, ser definida pela espessura de corte, sendo esse um principais parâmetros para microusinagem (Venkatesh et al., 2017).

Ao contrário do que acontece na usinagem convencional em escala macroscópica, a aresta de corte da ferramenta em microusinagem é maior do que a espessura de corte (Chae, Park e Freiheit, 2006). Além disso, o tamanho do grão do material de trabalho e a espessura de corte possuem dimensões semelhantes ao raio de ponta da microferramenta, de modo que as abordagens frequentemente usadas na usinagem convencional não possam ser aplicadas em microusinagem. Essa redução da espessura de corte e do raio da ferramenta causam uma diferença nos principais mecanismos do processo macro e micro, o chamado efeito escala (Aramcharoen e Mativenga, 2009). Desse modo, enquanto a usinagem macro engloba o cisalhamento de vários grãos, a formação de cavacos em microusinagem se dá a partir do cisalhamento de poucos ou um grão de cada vez.

A Figura 1 representa um esquema do efeito da espessura mínima de corte no mecanismo de formação de cavacos em microusinagem. A espessura de corte (h) é a espessura de material que será removido da peça durante o processo de usinagem (Huo e Cheng, 2013). Caso essa espessura seja menor do que um valor mínimo (h_m), não há formação de cavaco, apenas deformação plástica. Isso se deve ao pequeno ângulo da superfície de folga. Quando a espessura h é aproximadamente igual à espessura mínima, ocorre cisalhamento do material e a deformação elástica continua ocorrendo. Finalmente, quando a espessura de corte é maior que a espessura mínima, a deformação elástica reduz drasticamente e a quantidade de material removido é equivalente à profundidade de corte (Chae, Park e Freiheit, 2006; Liu et al., 2004).

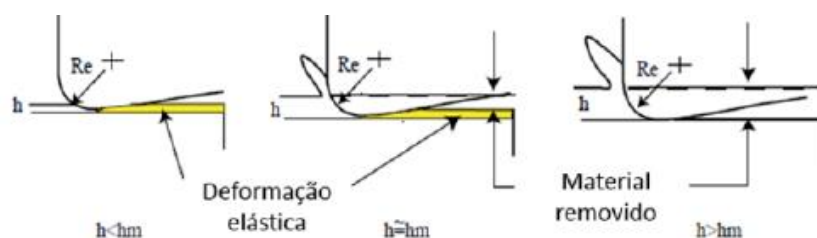


Figura 1: Espessura mínima de corte (Re = raio da ferramenta de corte, h = espessura não deformada do cavaco, h_m = espessura mínima do cavaco). Adaptado de Chae, Park e Freiheit, 2006.

Apêndice C

Artigo publicado no XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM) da ABCM.

FORMAÇÃO DE REBARBAS NO MICROFRESAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Geovanna Diniz Mendonça, geovannamendonca.d@gmail.com¹

Marcelo Lopes de Araújo, marcelo.lps.araujo@gmail.com¹

Deborah de Oliveira, oliveira.deborah@unb.br¹

¹Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, CEP 70910900.

Resumo: As ligas de alumínio possuem diversas aplicações industriais, principalmente devido à sua baixa densidade elevada resistência à corrosão. Estas ligas, no entanto, apesar de terem pouca resistência mecânica, podem ser desafiadores durante a usinagem devido às grandes deformações que podem ocorrer associadas a sua alta ductilidade. Este problema é agravado quando se consideram peças pequenas, com características micrométricas, como no caso da microusinagem. A microusinagem é um conjunto de processos de usinagem caracterizado por utilizar ferramentas de corte com dimensões inferiores a 1000 μm . Este processo tem ainda como característica a dificuldade na formação de cavacos, uma vez que as ferramentas de microusinagem não podem ser consideradas perfeitamente afiadas e seu grande raio de ponta faz com que a usinagem seja predominantemente negativa, o que resulta em muito ploughing e deformações plásticas sem remoção de material. Percebe-se então que a microusinagem de ligas de alumínio pode não ser trivial, uma vez que o principal fator que pode dificultar o microfresamento dessas ligas é sua alta ductilidade, que faz com que as peças apresentem maior tendência ao ploughing, bem como rebarbas de grandes dimensões, podendo inclusive possuir dimensões superiores à característica geométrica que foi usinada na peça. Além disso, devido aos tamanhos reduzidos, a microusinagem é um processo que não permite que a rebarbação seja feita de forma simples, como nos processos macro. Assim, considerando que a microusinagem, mais especificamente o processo de microfresamento, é relativamente recente, e que o microfresamento de ligas de alumínio pode ser dificultado pela presença de grandes rebarbas, este trabalho tem como objetivo fazer um levantamento bibliográfico sobre os resultados obtidos em microfresamento de ligas de alumínio com foco nas rebarbas e com a análise da literatura, espera-se identificar parâmetros de corte que favorecem a fabricação de peças com menores rebarbas. Por fim, espera-se poder compilar um conjunto de características de microfresamento, de forma a contribuir para a fabricação de micropeças de alumínio com redução nas rebarbas.

Palavras-chave: Microusinagem, Microfresamento, Alumínio, Rebarbas.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de microusinagem vem ganhando destaque devido à crescente necessidade de miniaturização de alguns componentes amplamente utilizados em diversas áreas, como: eletrônicas, biotecnológica, automotiva, médica, dentre outras (Ziberov, 2020; Cheng; Huo, 2013). A microusinagem é definida por Camara et. al. (2012), como um processo que emprega ferramentas de corte cujas dimensões variam de 1 μm a 1000 μm .

O processo micro se difere do processo de usinagem macro, devido ao chamado efeito escala, que acontece devido ao raio da aresta de corte da ferramenta ser semelhante, em tamanho, à espessura de corte. Esse efeito provoca um aumento não linear na energia específica de corte, em outras palavras, é o aumento da energia, por unidade de volume, de material removido, em função da redução da espessura de corte (Chae et. al., 2006). O efeito escala também é responsável pelo efeito *ploughing*, que é provocado pelo ângulo de saída negativo da ferramenta de corte, que causa a deformação do material nos arredores da aresta de corte. Esse efeito é responsável por provocar uma deformação plástica e/ou elástica do material (Bissaco et. al., 2005).

A formação de rebarbas nos processos de microusinagem são, proporcionalmente, muito maiores, se comparadas com as rebarbas do processo convencional. Apesar de dimensionalmente menores, elas podem afetar diretamente a qualidade superficial da peça usinada e, afetar o processo de montagem da peça. Além disso, o processo de remoção de rebarbas de dimensões micro, se torna muito mais complexo (Lekkala, 2011). Segundo Oliveira (2019), no microfresamento, as rebarbas podem ter dimensões maiores que a profundidade de corte do processo. Em ligas de alta ductilidade, como é o caso do alumínio, a formação de rebarbas pode se tornar ainda mais crítica. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre a formação de rebarbas no microfresamento de ligas de alumínio.

Apêndice D

Artigo aprovado e aguarda publicação no 30º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC), da Universidade Federal de Uberlândia.

DESAFIOS NO MICROFRESAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Geovanna Diniz Mendonça

Gabriel de Paiva Silva

Luis Fillipe Lopes Torres

Déborah de Oliveira

Universidade de Brasília (UnB)

Laboratório de Usinagem

geovanna.diniz@aluno.unb.br

RESUMO: O microfresamento é um dos principais processos de manufatura que têm permitido, nos últimos anos, a fabricação de microcomponentes em diversas áreas. Essas operações não podem ser analisadas com as mesmas teorias aplicadas no fresamento em escala macro, devido ao chamado efeito escala. O tamanho do raio da aresta de corte da ferramenta é comparável à espessura de corte, o que causa um intenso sulcamento e pode levar à formação de grandes rebarbas. Assim, o objetivo deste trabalho é investigar os efeitos de diferentes parâmetros de usinagem no microfresamento de ligas de alumínio, de acordo com uma revisão da literatura. Com base nos estudos realizados, foi possível observar que a qualidade superficial de peças microfresadas é altamente influenciada por parâmetros como profundidade de corte, velocidade de avanço e velocidade de corte. Além disso, observou-se que, embora as ligas de alumínio sejam conhecidas, em macro usinagem, por sua boa usinabilidade, as publicações sobre microfresamento desses materiais não são encontradas com frequência.

PALAVRAS-CHAVE: Microusinagem, Microfresamento, Alumínio, Qualidade Superficial.

CHALLENGES IN MICROMILLING OF ALUMINUM ALLOYS

ABSTRACT: Micromilling is one of the main manufacturing processes that have allowed, in recent years, the fabrication of microcomponents in several fields. These operations cannot be analyzed with the same theories applied in macro scale milling, because of the so-called size effect. The size of the cutting-edge radius of the tool is comparable to the chip thickness, which causes intense plowing and may lead to the formation of large burrs. The purpose of this work is to investigate the effects of different machining parameters in micromilling of aluminum alloys, according to a literature review. Based on the studies carried out, it was possible to notice that the surface quality of micromilled parts is highly influenced by parameters such as depth of cut, feed rate and cutting speed. Besides, it was observed that, although aluminum alloys are known for their good machinability in macro machining, publications about micromilling in these materials are not frequently found.

KEYWORDS: Micromachining, Micromilling, Aluminum, Surface Quality.