

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**Investigação da influência da velocidade de
corte na qualidade superficial de microcanais de
Al6101**

Por

Felipe Alves Sforcini

Brasília, dezembro de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Investigação da influência da velocidade de corte na qualidade superficial de microcanais de Al6101

Por

Felipe Alves Sforcini

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico

Banca Examinadora

Profa. Déborah De Oliveira, Dra., UnB
Orientadora

Profa. Aline Gonçalves dos Santos, Dra., UFCAT
Examinadora externa

Prof. Maksym Ziberov, Dr., UnB
Examinador interno

Brasília, dezembro de 2023

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha mãe, Rejane Alves, que desde minha infância me cobra pra que eu seja o melhor aluno da classe, me ensinando o valor dos estudos.

A meu pai, Evandro Sforcini, que nunca negou esforços para investir em meus estudos, me possibilitando ser aprovado na Universidade de Brasília.

À minha namorada, Letícia Gontijo, que me apoiou nos momentos mais difíceis e delicados da minha graduação.

A meu falecido avô, Benedito Alves, que quase não saía de casa, mas dizia que seria presença garantida na minha formatura.

À minha orientadora, professora Dra. Déborah de Oliveira, pela paciência, ensinamentos e toda confiança depositada em mim.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à Universidade de Brasília por proporcionar um ambiente acadêmico excepcional, à Faculdade de Tecnologia e Departamento de Engenharia Mecânica pelo suporte contínuo. Agradeço também pela concessão de recursos e pelo suporte necessário, elementos cruciais para a realização de experimentos laboratoriais e para o êxito deste trabalho.

Agradeço, finalmente, ao CNPq processo 402730/2023-2.

Resumo

Este estudo contribui não apenas para o avanço da microusinagem, mas também ressalta sua importância no cenário atual, onde a demanda por dispositivos e componentes de alta precisão é crescente em setores como eletrônica, biomedicina e tecnologias emergentes. A microusinagem, técnica que envolve processos de usinagem em escalas diminutas, desempenha um papel importante na produção de componentes de alta precisão. O efeito escala é um fenômeno inerente na microusinagem, no qual as propriedades e o comportamento dos materiais podem variar significativamente em escalas microscópicas. Este efeito se relaciona à qualidade da superfície das peças usinadas e pode afetar a rugosidade, a precisão dimensional e outros parâmetros importantes. A compreensão dessas mudanças é de caráter fundamental, a fim de garantir a funcionalidade e a confiabilidade dos produtos microfabricados. No contexto deste trabalho de engenharia mecânica, foi investigada a influência da velocidade de corte nas características superficiais de microcanais usinados em uma peça de alumínio. Ao realizar ensaios de microfresamento em três valores de rotação distintos (2000, 4000 e 6000 rpm), e suas réplicas, e examinar os resultados por meio de microscopia, buscando entender qualitativamente o impacto das variações de velocidade nos canais. Outros parâmetros de corte se mantiveram fixos, sendo o avanço por dente (f_z) de $10 \mu m$, profundidade de corte (a_p) de $100 \mu m$, penetração de trabalho (a_e) de $400 \mu m$ e o número de dentes da fresa (z_n) igual a 2. Quanto aos resultados específicos, a altura das rebarbas do lado concordante variou de $173 \mu m$ a $230,98 \mu m$, enquanto do lado discordante variou de $68,18 \mu m$ a $105,58 \mu m$. Notavelmente, a réplica de ensaio do canal submetido à rotação de 4000 rpm apresentou os melhores resultados para rugosidade (R_a , R_q e R_t), com valores de $0,232 \mu m$, $0,292 \mu m$ e $2,174 \mu m$, respectivamente. Esses dados destacam a importância da otimização da velocidade de corte para alcançar os melhores resultados na microusinagem de canais em peças de alumínio. Para os canais submetidos à rotação de 4000 rpm verificou-se as melhores condições de rugosidade e altura de rebarba.

Palavras-chaves: Microfresamento, rugosidade, rebarbas, qualidade superficial, alumínio 6101.

Abstract

This study contributes not only to the advancement of micromachining but also underscores its significance in the current landscape, where the demand for high-precision devices and components is growing in sectors such as electronics, biomedicine, and emerging technologies. Micromachining, a technique involving machining processes on minute scales, plays a crucial role in the production of high-precision components. The scale effect is an inherent phenomenon in micromachining, wherein the properties and behavior of materials can vary significantly on microscopic scales. This effect is related to the surface quality of machined parts and can affect roughness, dimensional accuracy, and other critical parameters. Understanding these changes is fundamentally important to ensure the functionality and reliability of microfabricated products. In the context of this mechanical engineering work, the influence of cutting speed on the surface characteristics of microchannels machined on an aluminum workpiece was investigated. By conducting micro-milling tests at three different rotation speeds (2000, 4000, and 6000 rpm) and their replicas, and examining the results through microscopy, the aim was to qualitatively understand the impact of speed variations on the channels. Other cutting parameters remained constant, with a feed per tooth (f_z) of $10 \mu m$, depth of cut (a_p) of $100 \mu m$, working engagement (a_e) of $400 \mu m$, and the number of milling teeth (z_n) equal to 2. Regarding specific results, the height of burrs on the concordant side varied from $173 \mu m$ to $230.98 \mu m$, while on the discordant side, it ranged from $68.18 \mu m$ to $105.58 \mu m$. Notably, the test replica of the channel subjected to a rotation of 4000 rpm showed the best results for roughness (R_a , R_q , and R_t), with values of $0.232 \mu m$, $0.292 \mu m$, and $2.174 \mu m$, respectively. These data highlight the importance of optimizing cutting speed to achieve the best results in the micromachining of channels in aluminum workpieces. For the channels subjected to a rotation of 4000 rpm, the best conditions for roughness and burr height were observed.

Key-words: Micromilling, roughness, burrs, surface quality, aluminum 6101.

Lista de Figuras

Figura 1 – (a) Microsensor de inclinação (BILLAT et al., 2002). (b) Enzima-partícula microusinada. A partícula possui $50 \mu m$ de diâmetro médio (MURAKAMI et al., 2000).	1
Figura 2 – Microfresa de metal duro com dois canais (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).	2
Figura 3 – Microcanal com $400 \mu m$ de largura obtido por microfresamento (de Oliveira et al., 2021).	2
Figura 4 – Micropino com $4,5 \mu m$ de diâmetro (MASUZAWA, 2000).	5
Figura 5 – Fotografias obtidas por lentes de ultra precisão de nanochips produzidos por microusinagem (DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006).	5
Figura 6 – Sensores acelerômetros fabricados por microusinagem (a) Visão de topo; (b) Visão inferior do componente (MUKHIYA et al., 2022).	6
Figura 7 – Relação entre tecnologias e objetos em produção. Adaptado de (MASUZAWA, 2000).	7
Figura 8 – Ferramenta de corte para microfresamento (ZIBEROV et al., 2016).	8
Figura 9 – (a) Microfresa em formato V (b) Imagem ampliada da microfresa em formato V (c) Microfresa em formato T (d) Imagem ampliada da microfresa em formato T (FILIZ et al., 2008).	9
Figura 10 – Paredes finas fabricadas por microfresamento a partir de diferentes a_e . (a) $a_e = 50 \mu m$; (b) $a_e = 100 \mu m$; (c) $a_e = 150 \mu m$; (d) $a_e = 250 \mu m$; (e) $a_e = 350 \mu m$; (f) $a_e = 500 \mu m$ (WANG et al., 2019).	10
Figura 11 – Principais aspectos a se considerar nos estudos de microfresamento. Adaptado de (CÂMARA et al., 2012).	11
Figura 12 – Formação de cavaco, efeito de <i>plowing</i> e deslizamento de microusinagem em corte ortogonal. Adaptado de (DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006).	12
Figura 13 – Principais forças de corte em (a) microfresamento e em (b) fresamento convencional, onde F_p representa a força passiva, F_c representa a força de corte. Adaptado de (BALÁZS et al., 2021).	13

Figura 14 – Tipos de rebarbas provenientes do microfresamento. Adaptado de (KOU YI WAN; LIU, 2015).	14
Figura 15 – Rebarba de topo proveniente de uma superfície após microfresamento ($v_c = 90 \text{ m/min}$, $a_p = 100 \text{ }\mu\text{m}$ e (à esquerda) $f_z = 2 \text{ }\mu\text{m}$, (à direita) $f_z = 6 \text{ }\mu\text{m}$). Adaptado de (BALÁZS et al., 2021).	14
Figura 16 – Imagens de rebarbas em microusinagem: (a) rebarba primária; (b) rebarba em formato de agulha; (c) rebarba tipo pena; (d) rebarba menor (CHERN et al., 2007).	15
Figura 17 – Processo de formação da rebarba primária. Adaptado de (CHERN et al., 2007).	16
Figura 18 – Imagens da variação da formação de rebarbas em relação a um plano onde (a) 135° e (b) 180° (MIN et al., 2006).	17
Figura 19 – Imagens mostrando dois tipos de rebarbas: (a) rebarbas desfavoráveis formadas por condições não recomendadas de corte; (b) rebarbas menores formadas em condições ótimas de corte (MUHAMMAD et al., 2021).	17
Figura 20 – Superfície gerada por (a) ponta esférica e (b) ponta plana. Adaptado de (BISSACCO; HANSEN; De Chiffre, 2006).	19
Figura 21 – Superfícies obtidas por microusinagem com diferentes profundidades de corte. Adaptado de (DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006).	20
Figura 22 – Valores da rugosidade R_a para diferentes tipos de metal utilizando microfresas de 0,6 mm e 0,9 mm de diâmetro. Adaptado de (JING et al., 2016).	21
Figura 23 – Gráfico R_a vs. diâmetro da ferramenta para microfresamento da peça de liga de Alumínio 6160. Adaptado de (JING et al., 2016).	22
Figura 24 – (a) Corte da peça utilizando a estratégia de microfresamento discordante e (b) Corte da peça utilizando a estratégia de microfresamento concordante (KISWANTO; ZARIATIN; KO, 2014).	23
Figura 25 – Início e fim de cortes de microcanais. (a) Microcanal com $a_e = 0,0635 \text{ mm}$ e (b) Microcanal com $a_e = 0,254 \text{ mm}$ (Adaptado de Araujo, Mougo e Campos (2013)).	24
Figura 26 – Centro de usinagem vertical VEGA XH7132	26
Figura 27 – Microferramenta MS2MSD0040 (MITSUBISHI, 2023).	27
Figura 28 – Dimensões da microferramenta MS2MSD0040 (Adaptado de MITSUBISHI (2023)).	27
Figura 29 – Fixação da peça por meio de morsa e grampos deslizantes. Tubos de fluido de corte posicionados. Ferramenta em processo do ensaio de microfresamento.	28
Figura 30 – Esquema da geometria e dimensões dos canais microfresados em uma liga de alumínio 6101.	29

Figura 31 – (a) Peça logo após o tratamento de superfície. (b) Peça após o processo de microfresamento.	30
Figura 32 – Microscópio utilizado no experimento para levantamento das variáveis de saída (SILVA, 2021).	31
Figura 33 – Processo de avaliação da rugosidade de um microcanal.	32
Figura 34 – Relatório gerado pelo <i>software LEXT</i> com valores de rugosidade do microcanal avaliado.	33
Figura 35 – Análise gráfica que indica o uso de parâmetros de rugosidade da ISO 4287 para as pesquisas de 2016 (azul) e 1999 (vermelho), indicando a porcentagem do número total de respostas que utilizam cada parâmetro (TODHUNTER et al., 2017).	33
Figura 36 – Medição da rebarba (ARAÚJO, 2022).	34
Figura 37 – Variações de relevo da peça usinada.	35
Figura 38 – Valores médios da rugosidade R_a para o ensaio de microfresamento de uma liga Al 6101.	36
Figura 39 – Valores médios da rugosidade R_q para o ensaio de microfresamento de uma liga Al 6101.	37
Figura 40 – Valores médios da rugosidade R_t para o ensaio de microfresamento de uma liga Al 6101.	37
Figura 41 – Presença do efeito <i>plowing</i> observado no fundo do canal 3.	38
Figura 42 – Presença do efeito <i>plowing</i> observado no fundo do canal 4.	39
Figura 43 – Comportamento do parâmetro de rugosidade R_a da liga de alumínio 6061 de acordo com a variação da velocidade de rotação e do avanço por dente. Adaptado de Jing et al. (2016).	40
Figura 44 – Ponta da microfresa com APC (Adaptado de Oliaei e Karpát (2017)).	41
Figura 45 – Presença de materiais aderidos ao fundo dos canais microusinados em uma liga de alumínio Al 6101.	41
Figura 46 – Fundo dos canais 1 (esquerda) e 2 (direita) microusinados em uma liga Al 6101. Gerados por uma velocidade de rotação de 2000 rpm.	42
Figura 47 – Fundo dos canais 3 (esquerda) e 4 (direita) microusinados em uma liga Al 6101. Gerados por uma velocidade de rotação de 4000 rpm.	43
Figura 48 – Fundo dos canais 5 (esquerda) e 6 (direita) microusinados em uma liga Al 6101. Gerados por uma velocidade de rotação de 6000 rpm.	43
Figura 49 – Ponta quebrada e desgaste de flanco em uma microfresa (Adaptado de Ziberov (2018)).	44
Figura 50 – (a) Desgastes da ponta e do flanco da aresta principal da microferramenta utilizada no ensaio. (b) Desgastes da ponta e do flanco da segunda aresta principal de corte microferramenta utilizada no ensaio.	44
Figura 51 – Valores médios do desgaste em função do diâmetro da ferramenta.	45
Figura 52 – Rebarbas curvadas sobre o canal microusinado	46

Figura 53 – Altura das rebarbas concordantes e discordantes para o microfresamento de uma liga de alumínio 6101. 47

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de corte para ensaio da peça de liga de alumínio 6351 T6.	24
Tabela 2 – Composição química da liga de alumínio ABNT/ASTM 6101.	25
Tabela 3 – Parâmetros elásticos para a liga de alumínio 6101.	25
Tabela 4 – Parâmetros de corte empregados na preparação da superfície da liga de alumínio 6101	27
Tabela 5 – Parâmetros de corte empregados no microfresamento do alumínio 6061	29
Tabela 6 – Valores de rotação para cada par (ensaio e réplica) de canais.	29
Tabela 7 – Valores de desvio padrão do desgaste em função do diâmetro para cada canal usinado.	45
Tabela 8 – Valores desvio padrão para a altura das rebarbas no lado concordante e no lado discordante.	48

Lista de abreviaturas e siglas

<i>CFC</i>	Cúbica de Face Centrada
<i>MEV</i>	Microscópio Eletrônico de Varredura
<i>MLQ</i>	Mínima Quantidade de Lubrificação

Lista de símbolos

α	Ângulo de saída
a_e	Penetração de trabalho
a_p	Profundidade de corte
f	Avanço
f_z	Avanço por dente
h	Espessura de corte
h_m	Espessura mínima de corte
n	Rotação
r_e	Raio da aresta de corte
VB_s	Desgaste de flanco
v_c	Velocidade de corte
ν	Coefficiente de Poisson
F_c	Força de corte
F_p	Força passiva

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação do trabalho	2
1.2	Justificativa	3
1.3	Objetivos	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Microusinagem	4
2.2	Microfresamento	7
2.3	Efeito escala	11
2.4	Formação de rebarbas	13
2.5	Qualidade superficial em microusinagem	17
2.6	Microfresamento em Alumínio	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Caracterização do Material	25
3.2	Máquina-ferramenta e ferramenta de corte	26
3.3	Microfresamento da amostra	27
3.4	Variáveis de saída	30
3.4.1	Medição da rugosidade superficial	31
3.4.2	Medição de altura das rebarbas	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	Rugosidade superficial e imagens dos canais microusinados	36
4.2	Altura das rebarbas	47
5	CONCLUSÕES	49
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS	51

1 Introdução

Mudanças nas demandas da sociedade aceleraram o avanço do uso de micropeças em vários campos, como na indústria automotiva e biotecnologia (MASUZAWA, 2000). Um exemplo é o caso do microssensor de inclinação, ilustrado na Figura 1(a), que se tornou requisito para muitos sistemas de segurança de veículos. Devido às características de baixo consumo de energia e baixo custo, está sendo utilizado além da indústria automobilística, como em periféricos de computador, alarmes de carro e monitoramento de assentos (BILLAT et al., 2002). Outro exemplo é a enzima-partícula metálica com quimioluminescência microfabricada, representada na Figura 1(b).

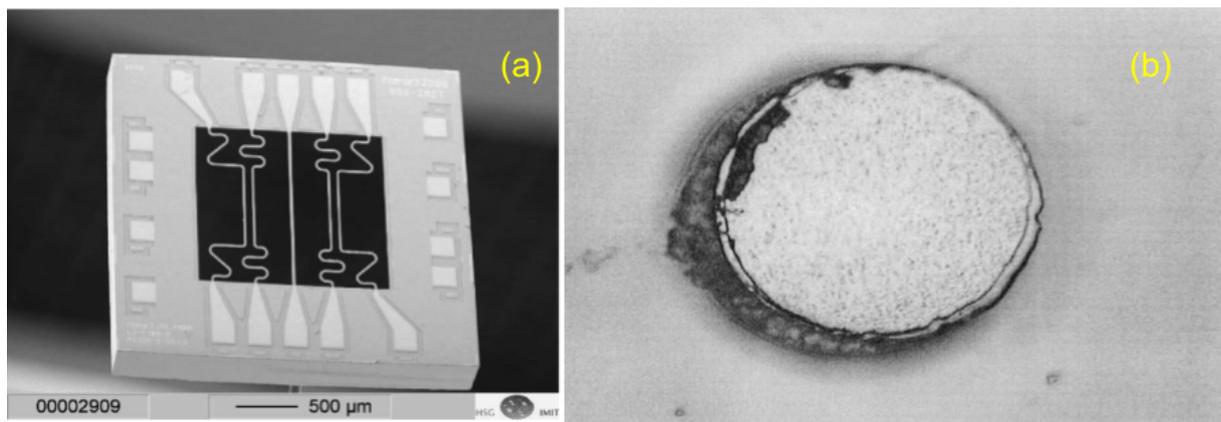


Figura 1 – (a) Microssensor de inclinação (BILLAT et al., 2002). (b) Enzima-partícula microusinada. A partícula possui 50 μm de diâmetro médio (MURAKAMI et al., 2000).

A miniaturização de peças mecânicas é vista como um pré-requisito para o futuro desenvolvimento tecnológico de uma vasta gama de produtos. As menores dimensões oferecidas por componentes em miniatura são relacionadas com uma boa transferência de calor e baixo consumo de energia (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006). Colpani et al. (2019) destacam que na indústria de usinagem, 20% do tempo de inatividade é atribuído a falha de ferramentas. Portanto, ao selecionar uma microferramenta, como da Figura 2, vários aspectos devem ser considerados, como: forças de corte, evolução do raio da aresta de corte e qualidade superficial desejada no processo.

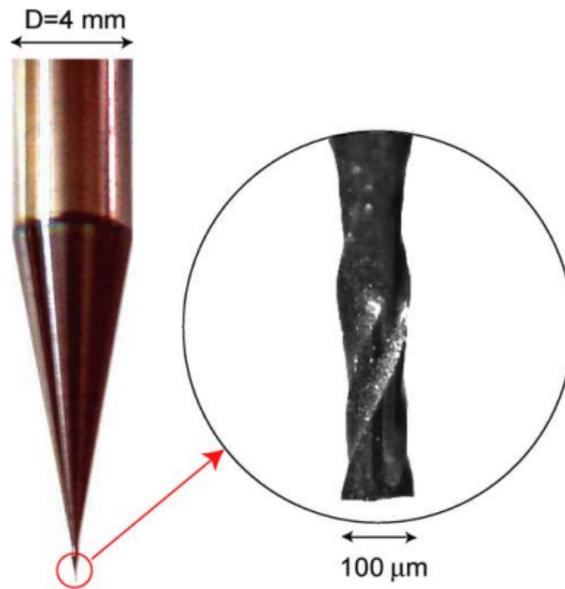


Figura 2 – Microfresa de metal duro com dois canais (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Um dos desafios da microusinagem é a análise e controle da formação de rebarbas durante o processo, que pode ser observado na Figura 3. Esse desafio é particularmente evidente quando a espessura de corte se aproxima do raio da aresta de corte e do tamanho do grão da microestrutura da peça usinada, fenômeno conhecido como efeito escala. Visto isso, percebe-se que a energia de corte específica e a formação de cavacos possuem comportamentos distintos da usinagem convencional (de Oliveira et al., 2021).

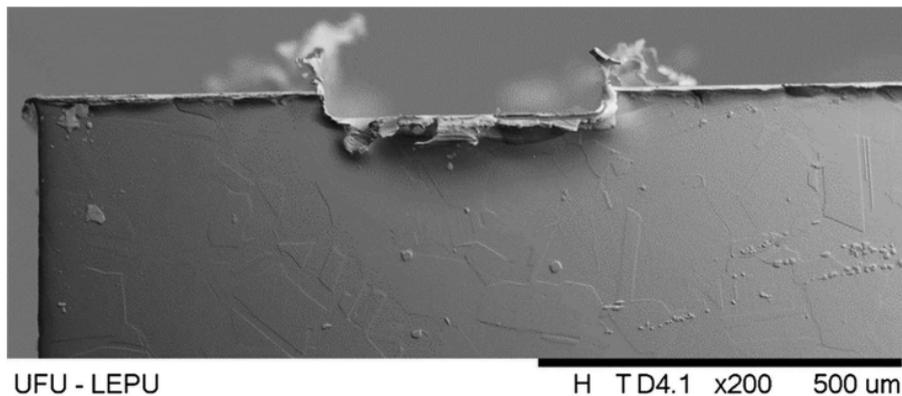


Figura 3 – Microcanal com 400 μm de largura obtido por microfresamento (de Oliveira et al., 2021).

1.1 Motivação do trabalho

A versatilidade do uso do alumínio nos processos de microusinagem é a principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho. Mesmo com grande potencial, ainda é pouco estudado por pesquisadores nas aplicações em microfresamento. Essas ligas podem

ser utilizadas em componentes biomecânicos, eletromecânicos e eletrônicos, campos de vastas demandas.

1.2 Justificativa

A liga de alumínio 6101 foi escolhida por ser amplamente utilizada em diversos campos da indústria. Optou-se por utilizar esta liga para observar seu comportamento durante processos de microfresamento, pois é um material com grande potencial de usabilidade e ainda com poucos estudos encontrados na literatura. É desejado que esse trabalho contribua para a força da evidência científica nessa área de estudo, podendo ser usado como base para outros experimentos e até na utilização em setores industriais.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade superficial de microcanais em uma liga de alumínio 6101, através da variação da velocidade de corte. Os objetivos específicos podem ser elencados como:

- (i) Avaliar a rugosidade superficial dos microcanais, considerando a velocidade de corte empregada em cada um
- (ii) Avaliar as alturas de rebarba produzidas em cada microcanal

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Microusinagem

A alta demanda e necessidade por produtos de meso ($500 \mu m - 10 mm$) e microescala ($1 - 500 \mu m$) com funcionalidades específicas e variadas, vêm acelerando rapidamente nos campos aeronáutico, óptico, nuclear, biomédico e de semicondutores. Tais produtos precisam de uma grande gama de disponibilidade de materiais, incluindo cerâmica, metais e polímeros, por exemplo. A microusinagem é considerada a chave garantidora da realização de micro e miniaturas de um produto (KUMAR et al., 2014).

Dornfeld, Min e Takeuchi (2006) afirmam que a microusinagem ainda utiliza de diversas características da usinagem convencional. Por outro lado, levantam algumas questões no que se refere ao tamanho ou escala. A situação em que se reduz a escala de usinagem não causa impacto nas características gerais do processo até certo limite. No entanto, ao empregar ferramentas de corte com dimensões inferiores a 1 mm, e considerando arestas de corte com geometria específica, os resultados obtidos no processo de microusinagem podem diferir significativamente dos observados na microusinagem convencional.

Visto isso, de acordo com Jain (2014), pode-se definir a microusinagem como um processo de fabricação de subtração em que há a remoção direta de material por uma microferramenta, possibilitando a obtenção de peças usinadas com formas e geometrias complexas. Entretanto, tal processo acarreta em alguns problemas, como desgaste e quebra da ferramenta, além de dimensões fora do que o projeto inicial especifica.

No que se refere a áreas estéticas, por exemplo na odontologia, faz-se necessário o uso de micropinos, observado na Figura 4, em certos procedimentos, obtidos através da microusinagem. Contudo, requer-se um estudo objetivo da geometria da ferramenta de corte e de toda a geometria do processo, para assim se compreender o melhor método de atuação.

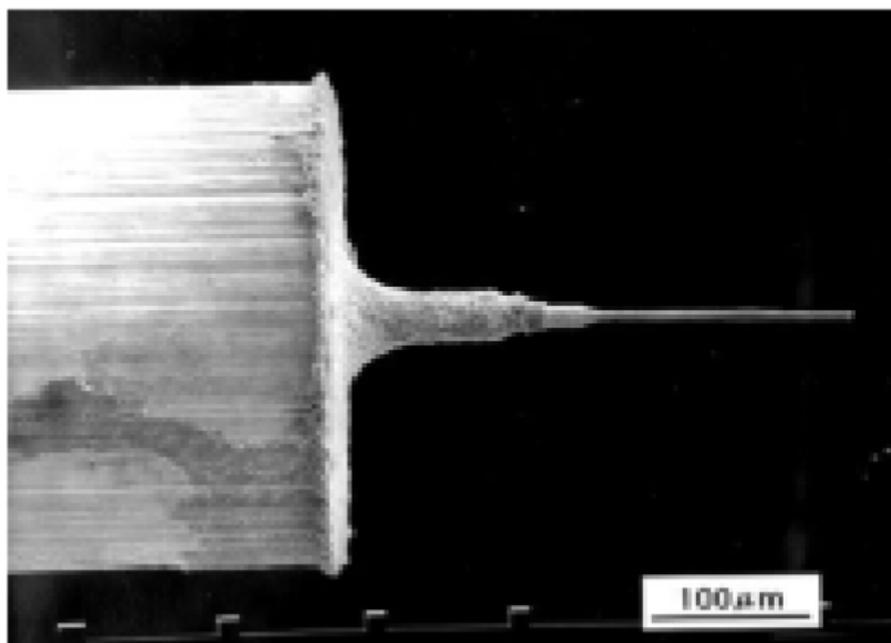


Figura 4 – Micropino com $4,5 \mu m$ de diâmetro (MASUZAWA, 2000).

Logo, é importante destacar a investigação e estudo de ferramentas de ultraprecisão, entre elas os materiais ópticos, grupo no qual se encontra as lentes responsáveis pela melhor observação dos processos de microusinagem. Devido a alta demanda por microchips e nanochips pela vasta indústria de eletrônicos, observa-se na Figura 5 a imagem de um nanochip com profundidade de corte de $5 nm$ (à esquerda) e outro nanochip com profundidade de corte de $57 nm$ (DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006).

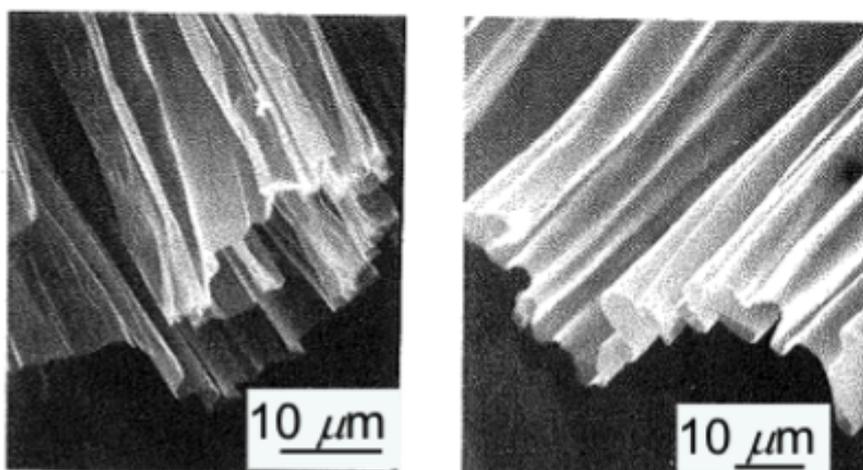


Figura 5 – Fotografias obtidas por lentes de ultra precisão de nanochips produzidos por microusinagem (DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006).

Áreas como eletrônica de consumo, sistema de navegação pessoal, sismometria para exploração de petróleo, medição, previsão de terremotos, hidro-acústica, exigem um componente chamado acelerômetro como peça fundamental do sistema. Devido à minia-

turização dos dispositivos utilizados nas áreas citadas, o acelerômetro também seguiu a tendência, na Figura 6 encontra-se um exemplo desse componente produzido por microusinagem (MUKHIYA et al., 2022).

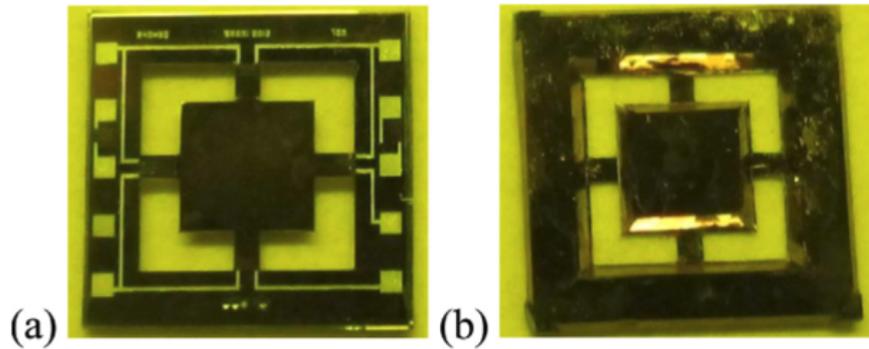


Figura 6 – Sensores acelerômetros fabricados por microusinagem (a) Visão de topo; (b) Visão inferior do componente (MUKHIYA et al., 2022).

Masuzawa (2000) definem uma relação entre o processo de produção e os campos da tecnologia de produção em microusinagem, ilustrada na Figura 7. O fluxo físico da produção é simples, conforme mostrado pelas setas com linha sólida. O material é processado em componentes e os componentes são montados em um produto. A imagem do produto é dada pelo *design* e introduzida no fluxo físico por meio de controle e medição, que estão diretamente relacionados com o processo, componentes e conjunto.

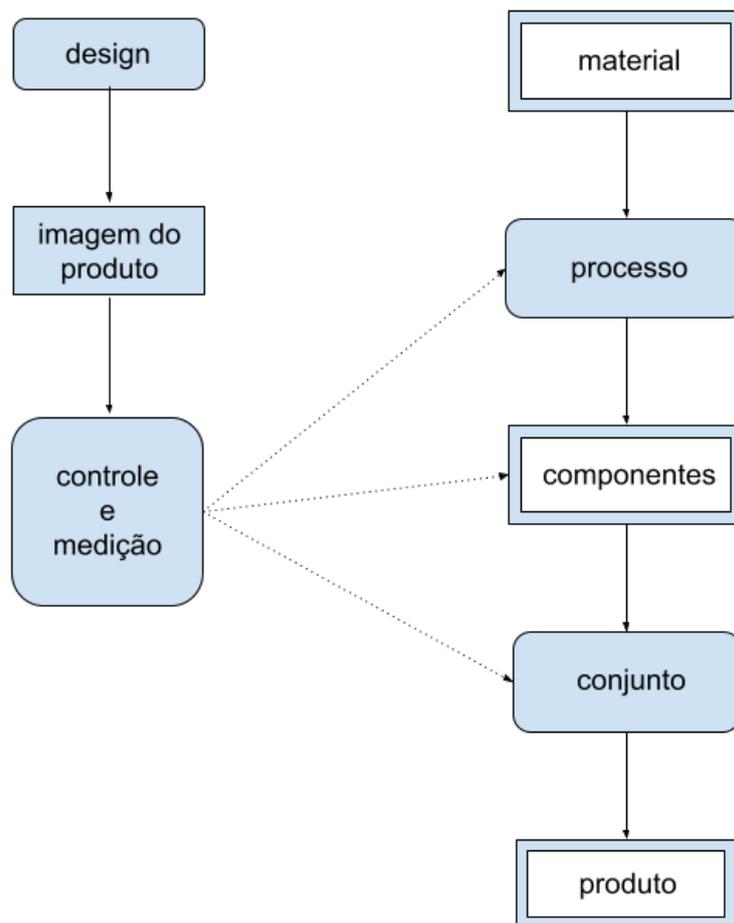


Figura 7 – Relação entre tecnologias e objetos em produção. Adaptado de (MASUZAWA, 2000).

Após definido o fluxo de relação entre as tecnologias de microusinagem, é desejável para o produto miniaturizado solicitado que o erro dimensional do produto seja também seja reduzido. Portanto, deseja-se maior precisão do equipamento de microusinagem, embora muitas vezes não seja possível reduzir o erro dimensional proporcionalmente ao tamanho do produto (MASUZAWA, 2000).

2.2 Microfresamento

A técnica de microfresamento tem demonstrado êxito em várias esferas ao longo das últimas décadas, a saber: medicina, biomedicina, eletrônica, setores militares e aeroespaciais. Isso se deve à capacidade de obtenção aliada à necessidade de peças com características de pequena escala com acuracidade, o que é proporcionado pelo uso do micro-corte, resultando em maior segurança e otimização (ABENI; LANCINI; ATTANASIO, 2019).

Abeni, Lancini e Attanasio (2019) também apontam que o microfresamento é afetado por diversos fatores, logo implementa-se um controle planejado destes aspectos

a fim de assegurar um produto de qualidade desejável além de eficiência econômica. Os autores mencionam: desgaste da ferramenta, formação de rebarbas e mecanismo de corte.

As ferramentas de microusinagem também são comumente chamadas de "microferramentas", exemplificadas nas Figuras 8 e 9. A seleção do tamanho dessas microferramentas vai influenciar diretamente na precisão das características da peça, além do limite de seu tamanho. É possível observar que, devido à estrutura curta dessas ferramentas, existe uma maior rigidez estática e ainda uma menor expansão térmica comparada a seu tamanho. Ainda em relação ao tamanho reduzido, tal fato provoca uma frequência natural mais alta, o que aumenta a estabilidade dinâmica (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

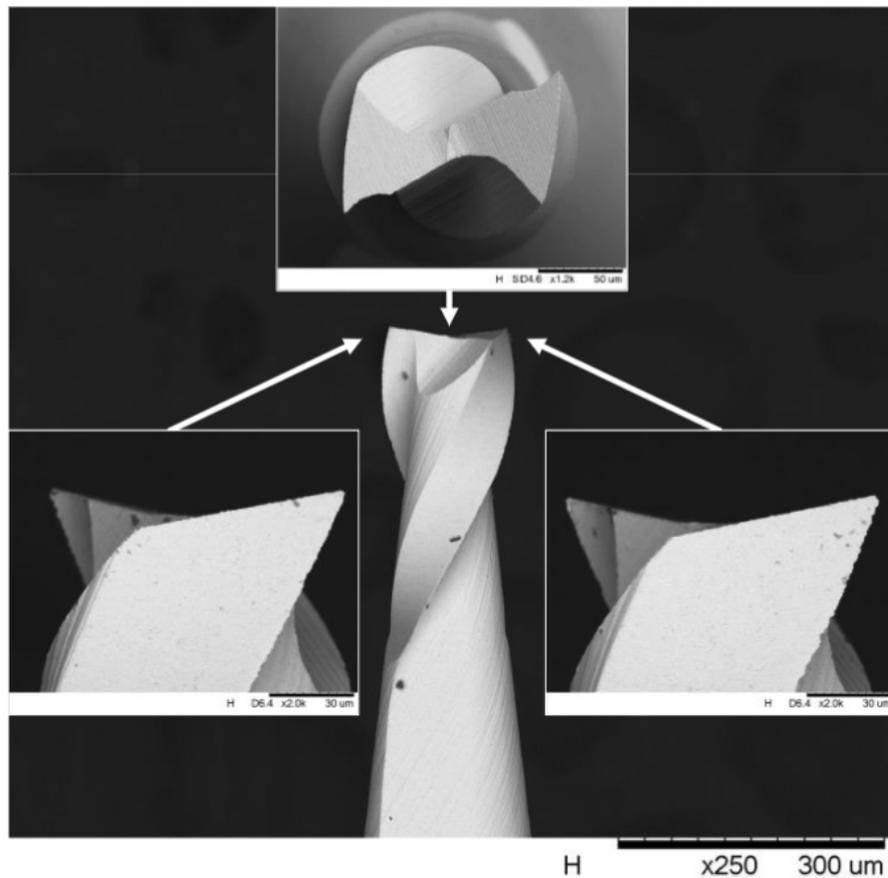


Figura 8 – Ferramenta de corte para microfresamento (ZIBEROV et al., 2016).

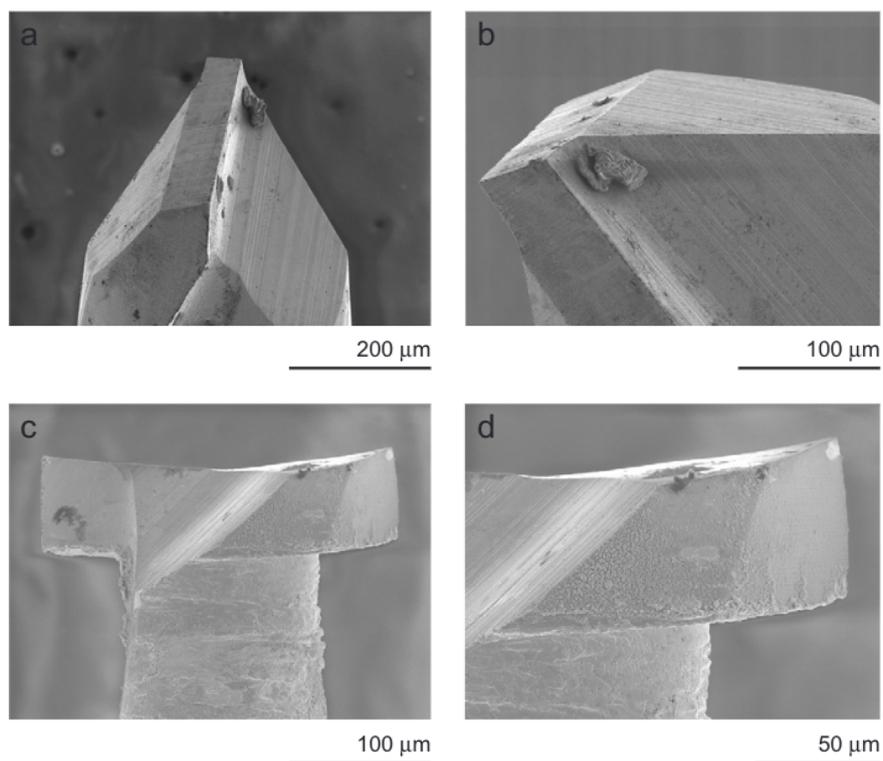


Figura 9 – (a) Microfresa em formato V (b) Imagem ampliada da microfresa em formato V (c) Microfresa em formato T (d) Imagem ampliada da microfresa em formato T (FILIZ et al., 2008).

Tal processo destaca-se de outros processos de microusinagem, como Laser, EDM e EBM, devido a certas vantagens, como flexibilidade e versatilidade. Entre as várias aplicações, é possível produzir paredes de peças extremamente finas como pode ser observado na Figura 10. Caracteriza-se ainda por tempos de preparação curtos, além da capacidade de trabalhar com diferentes materiais, realizando formas complexas nestes. Desta forma, essa técnica de fabricação vem sendo estudada por diversos pesquisadores, no intuito de aprimorar a compreensão dos fenômenos que a abarcam (ATTANASIO et al., 2013).

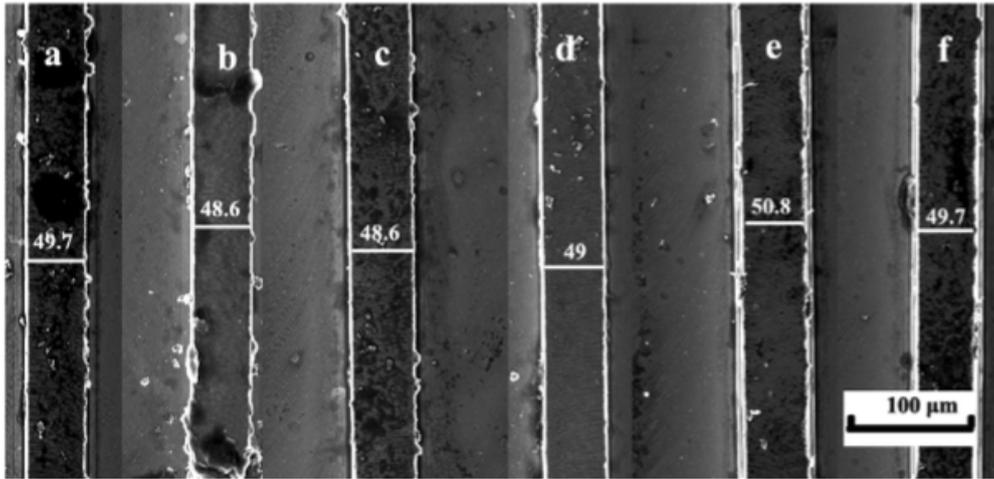


Figura 10 – Paredes finas fabricadas por microfresamento a partir de diferentes a_e . (a) $a_e = 50 \mu m$; (b) $a_e = 100 \mu m$; (c) $a_e = 150 \mu m$; (d) $a_e = 250 \mu m$; (e) $a_e = 350 \mu m$; (f) $a_e = 500 \mu m$ (WANG et al., 2019).

O microfresamento pode trazer alguns desafios no que se diz respeito a materiais resistentes ao corte, como é o caso do Inconel 718. Esse material possui uma boa estabilidade química, além de alta dureza e forte resistência à deformação. Conseqüentemente, o corte à baixa velocidade não se mostra efetivo no microfresamento do material, então faz-se necessário o trabalho a velocidades de corte maiores o que conseqüentemente leva a temperaturas altas (WANG et al., 2017).

Logo, um planejamento minucioso, somado ao estudo de alguns aspectos principais e a relação entre tais é de extrema importância. É possível observar na Figura 11 um esquema contendo propriedades a serem consideradas. De acordo com Câmara et al. (2012), no estudo de um ensaio do microfresamento, existem três principais pilares: material da peça, ferramenta, máquina ferramenta. Para o material, alguns fatores levados em questão são: dureza, tamanho do grão, defeitos, impureza. O material da ferramenta, seu tratamento térmico e revestimento são variáveis importantes. Para a máquina ferramenta, deve-se considerar velocidade de rotação, rigidez, estabilidade térmica, compensação do erro, por exemplo.

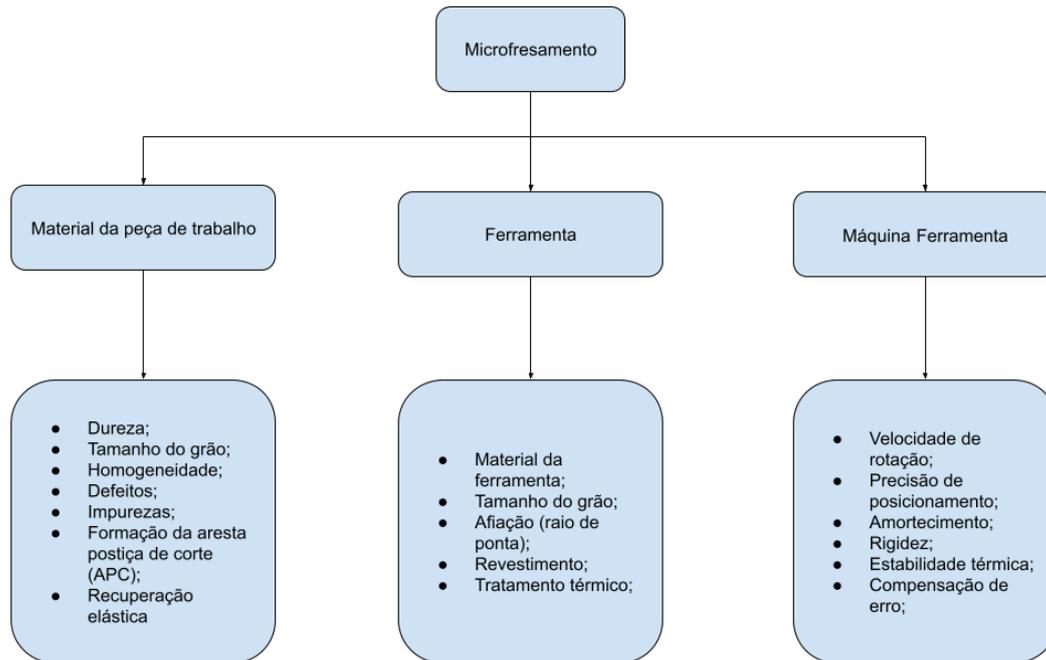


Figura 11 – Principais aspectos a se considerar nos estudos de microfresamento. Adaptado de (CÂMARA et al., 2012).

2.3 Efeito escala

Ao se elencar os principais pontos a serem considerados na microusinagem, destaca-se o efeito escala como um dos mais relevantes. Define-se tal fenômeno como um aumento elevado da tensão de fluxo de cisalhamento, que se dá devido à espessura de corte ser bastante reduzida. Assim, durante a deformação plástica, características como defeitos cristalinos, limites de grão e impurezas condicionam o processo de deslizamento de forma distinta da usinagem convencional. Neste caso, o raio da aresta da ferramenta (r_e) torna-se relevante ao se comparar com a espessura do cavaco formado. O que é associado à diminuição do ângulo de ataque efetivo da ferramenta de corte. Logo, observa-se que o raio da aresta da ferramenta e a espessura de corte são diretamente proporcionais (CÂMARA et al., 2012).

Aramcharoen e Mativenga (2009) em seus estudos de microfresamento afirmam que, para determinação do efeito escala, deve haver a medição da força de corte específica. Tal força deve ser calculada considerando também a espessura mínima de corte e o raio da aresta de corte. Uma vez que, uma peça que é microusinada com um ângulo de ataque negativo, produz uma componente de força de indentação. Esse fenômeno resulta em uma pressão sobre a face da ferramenta, ocasionando o efeito de *plowing*, assim observado na Figura 12. Esse fato ocorre devido à recuperação elástica do material.

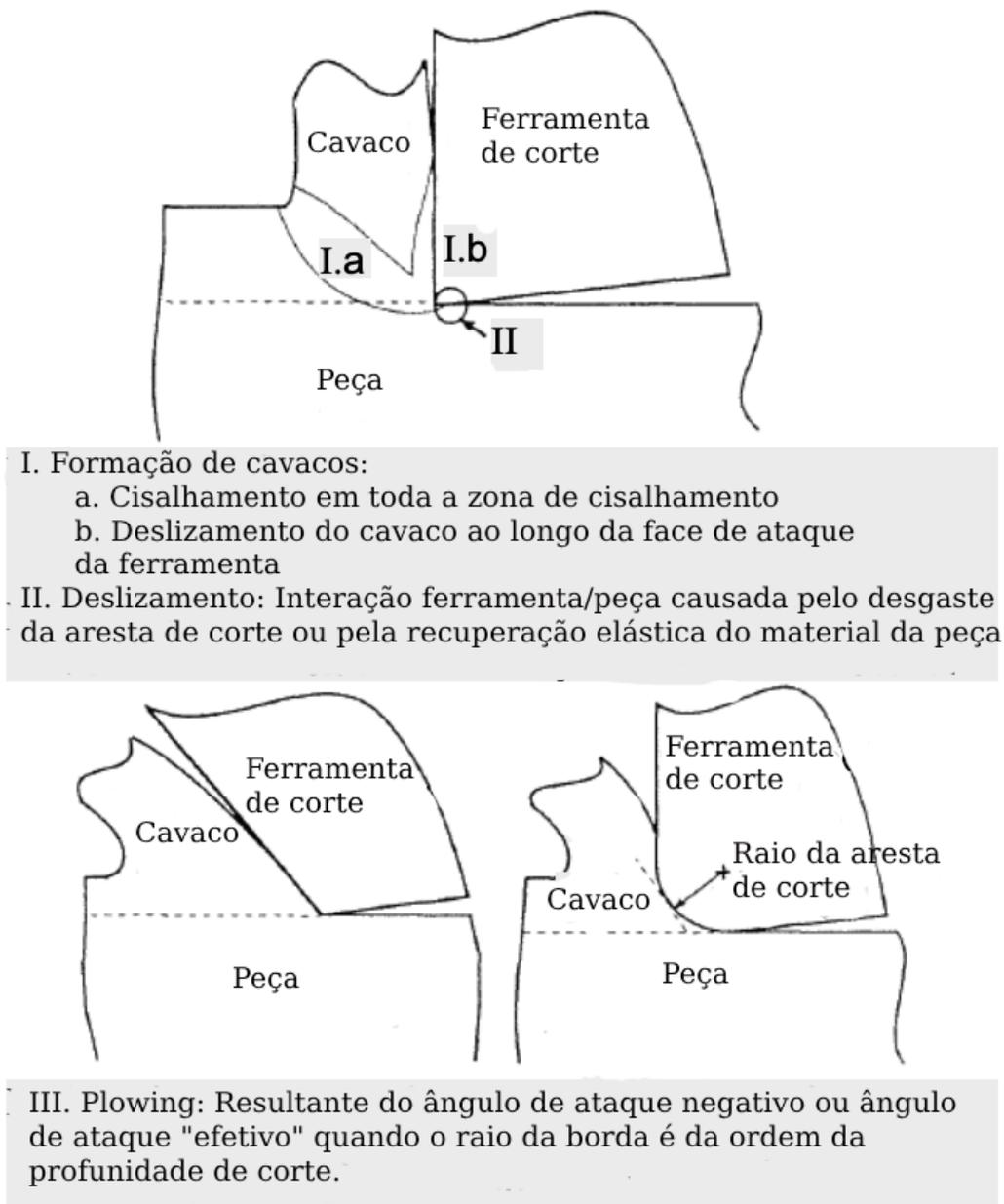


Figura 12 – Formação de cavaco, efeito de *plowing* e deslizamento de microusinagem em corte ortogonal. Adaptado de (DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006).

Para que se evite deformações plásticas ou possível quebra das microferramentas, geralmente, o raio da aresta das ferramentas costuma ter tamanho maior em relação à espessura de cavaco. Contudo, diferente da ação de corte com ponta afiada da usinagem convencional, na microusinagem tem-se que, o cisalhamento do cavaco ocorre ao longo da borda arredondada da microferramenta. Conseqüentemente, em situações onde a espessura de corte encontra-se abaixo da espessura crítica, ocorre o que é chamado de *plowing*, em que o material da peça tem uma deformação elástica. Isso ocorre, pois, devido a ponta arredondada da microferramenta, o corte possui um ângulo de inclinação negativo, afetando assim, a magnitude das forças de corte (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Ao se reduzir a escala em todos os aspectos do microfresamento, nota-se uma

diminuição considerável na magnitude das forças de corte solicitadas. Desta forma, existe uma diferença proporcional significativa entre a força de corte (F_c) e a força passiva (F_p). Na Figura 13 são comparadas essas forças entre o fresamento convencional e o microfresamento. Considerando o caso do microfresamento, a força passiva tem papel mais importante no que se refere ao processo de remoção de cavacos, tal fato está relacionado ao fenômeno de *plowing* (BALÁZS et al., 2021).

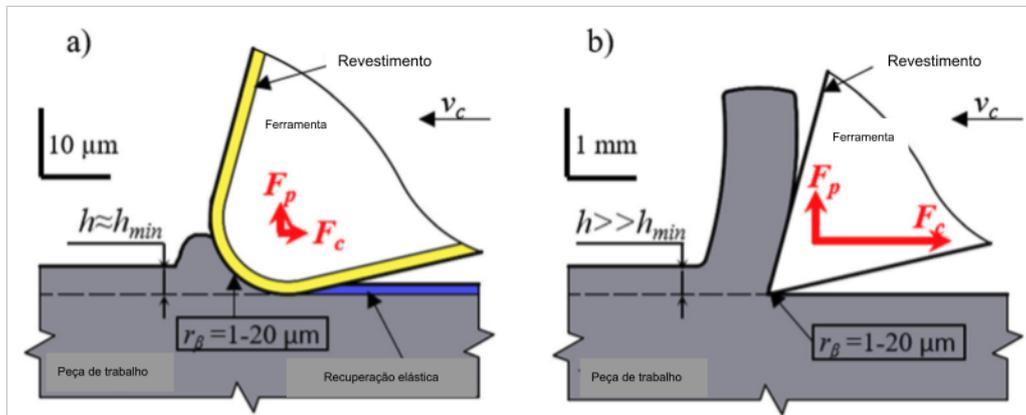


Figura 13 – Principais forças de corte em (a) microfresamento e em (b) fresamento convencional, onde F_p representa a força passiva, F_c representa a força de corte. Adaptado de (BALÁZS et al., 2021).

2.4 Formação de rebarbas

As rebarbas podem ter sua formação provocada por alguns fatores. Dentre eles: espessura de corte; velocidade de corte; técnicas e velocidades de avanço da ferramenta; tipo de material da peça e afiação da ferramenta de corte. Pode-se classificar as rebarbas como rebarbas de topo, rebarbas de entrada e rebarbadas de saída, ilustradas na Figura 14. Também deve se atentar à progressão do desgaste da ferramenta de corte, pois ao ser desgastada a ferramenta tem seu raio de aresta aumentado, acarretando na mudança da espessura do cavaco produzido e interferindo na formação das rebarbas (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

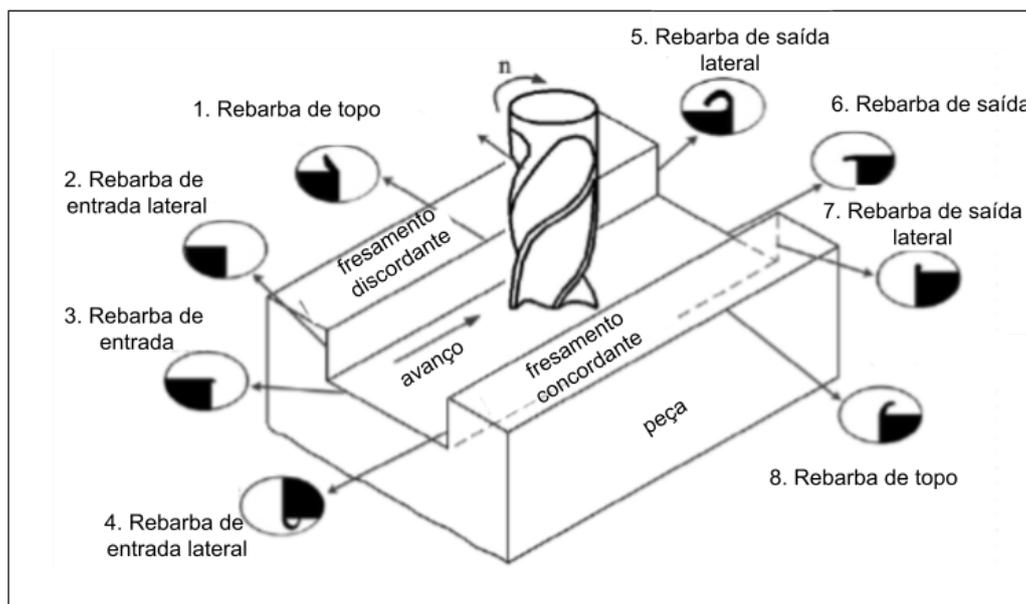


Figura 14 – Tipos de rebarbas provenientes do microfresamento. Adaptado de (KOU YI WAN; LIU, 2015).

Chae, Park e Freiheit (2006) em seus estudos, ressaltam que, na microusinagem, o pós-processamento exige um grau de dificuldade muito maior comparado à macrousinagem, logo é importante evitar a formação de rebarbas durante o processo, assim como na Figura 15, durante o processo. No processo de microfresamento, a cinemática da ferramenta, à medida que se afasta da peça, exerce uma influência considerável na formação de rebarbas, uma vez que essa formação está predominantemente relacionada à deformação plástica dos cavacos formados, em contraposição ao cisalhamento.

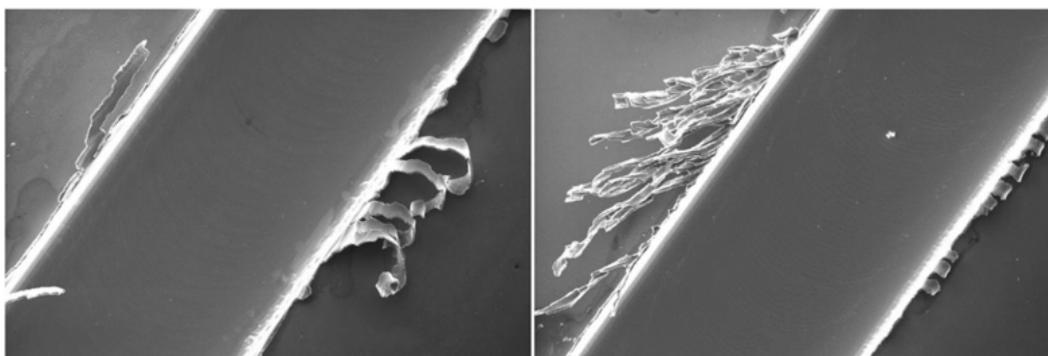


Figura 15 – Rebarba de topo proveniente de uma superfície após microfresamento ($v_c = 90 \text{ m/min}$, $a_p = 100 \text{ }\mu\text{m}$ e (à esquerda) $f_z = 2 \text{ }\mu\text{m}$, (à direita) $f_z = 6 \text{ }\mu\text{m}$). Adaptado de (BALÁZS et al., 2021).

As rebarbas de topo são mais comuns nos processos de microusinagem, logo, são as mais estudadas por pesquisadores da área. Chern et al. (2007) selecionaram o alumínio (Al 6061-T6) como material de trabalho com intuito de analisar a formação de rebarbas. Nessa pesquisa foram identificadas quatro principais tipos de rebarba durante o processo

de microusinagem: rebarba primária, rebarba em formato de agulha, rebarba tipo pena, rebarba menor. Os quatro tipos de rebarbas são ilustradas na Figura 16.

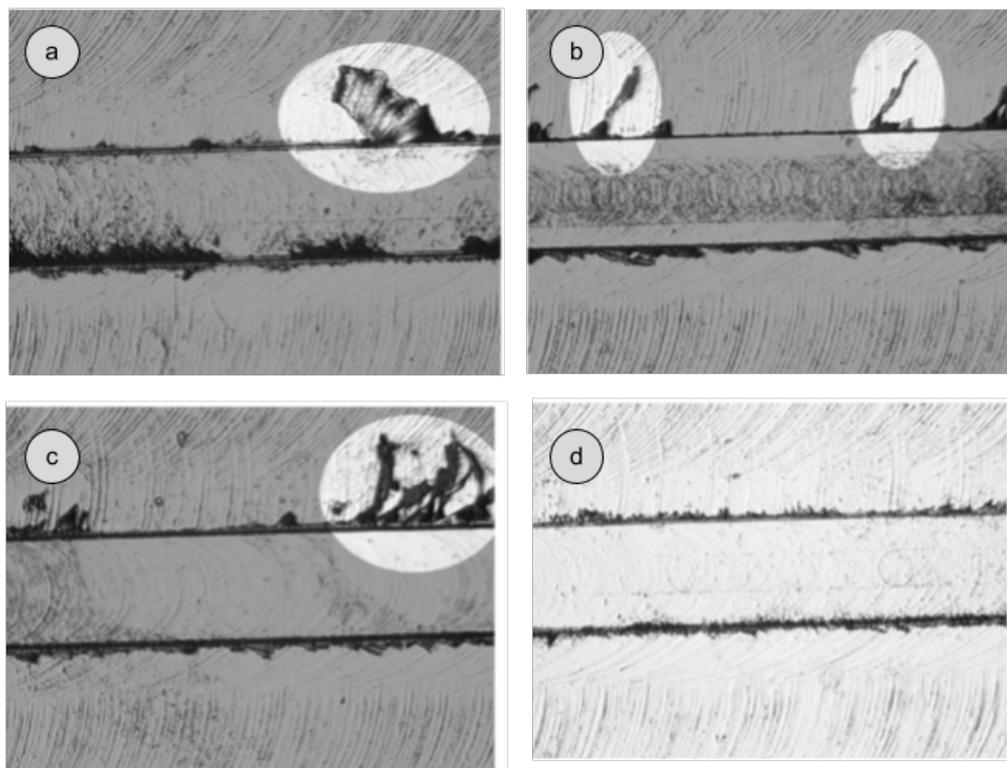


Figura 16 – Imagens de rebarbas em microusinagem: (a) rebarba primária; (b) rebarba em formato de agulha; (c) rebarba tipo pena; (d) rebarba menor (CHERN et al., 2007).

As rebarbas primárias são formadas quando, no processo de microusinagem, a microferramenta é incapaz de produzir cavaco, ocorrendo apenas o atrito. A Figura 17 ilustra o processo de formação da rebarba primária. Logo à frente do caminho percorrido pela microferramenta, o material é empurrado e sofre deformação plástica, o que nota-se na Figura 17(a). De forma conseguinte, próximo ao meio do material, ocorre uma fratura, observada na Figura 17(b). A Figura 17(c) contém um esquema que demonstra que a rebarba primária é curvada, atingindo um comprimento de aproximadamente a metade do diâmetro da microferramenta, assim vista na Figura 17(d) (CHERN et al., 2007).

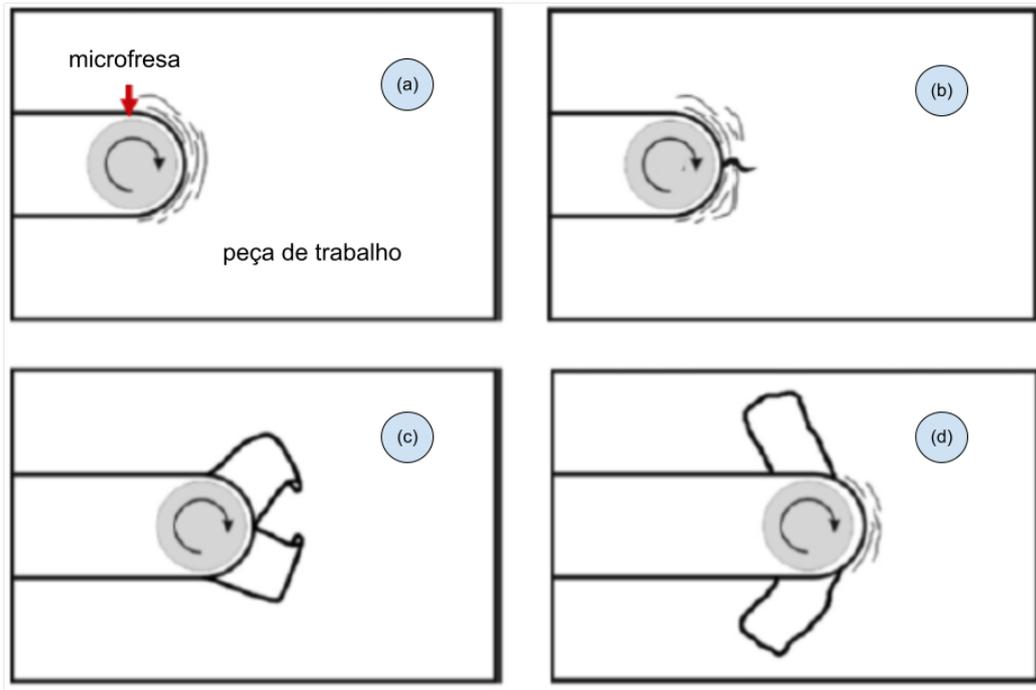


Figura 17 – Processo de formação da rebarba primária. Adaptado de (CHERN et al., 2007).

Devido à miniaturização nos processos de microusinagem, alguns materiais são compostos por cristais únicos. Min et al. (2006), em suas pesquisas, estudaram a influência da orientação da cristalografia na formação de rebarbas. Para isso, foram utilizadas três peças de cobre de alta condutividade de cristal único, isentas de oxigênio, nos experimentos. As peças foram atacadas quimicamente, em que o composto químico é composto por água, H_2O_2 e NH_4OH . Foram utilizados nos experimentos um centro de usinagem vertical, com refrigeração recirculante para estabilidade térmica e fuso de alta velocidade, atingindo rotação máxima de $n = 36000 \text{ rpm}$. Para eliminar resíduos e a necessidade de limpeza posterior, utilizou-se de um fluido de corte à base de álcool. Os parâmetros de corte foram: rotação variando entre $n = 9000 \text{ rpm}$ e $n = 36000 \text{ rpm}$; profundidade de corte $a_p = 10 \mu\text{m}$; avanço f variando entre $1 - 3 \mu\text{m}$.

Ao completar a realização dos experimentos, utilizaram de um perfilômetro com precisão de $\pm 0,2 \mu\text{m}$ para medição das alturas das rebarbas, além de um microscópio óptico, com intuito de se obter fotografias das rebarbas e ranhuras usinadas. Observa-se na Figura 18(a) um material com inclinação de 135° em relação ao plano de estudo, já a Figura 18(b) com inclinação de 180° ao mesmo plano. Foi possível visualizar nas bordas superiores das placas microusinadas claras diferenças no que se refere às rebarbas de entrada e saída, sugerindo que a orientação do cristal da peça tem grande influência no processo de formação de rebarbas. Ademais, o fresamento concordante ou discordante também têm forte influência.

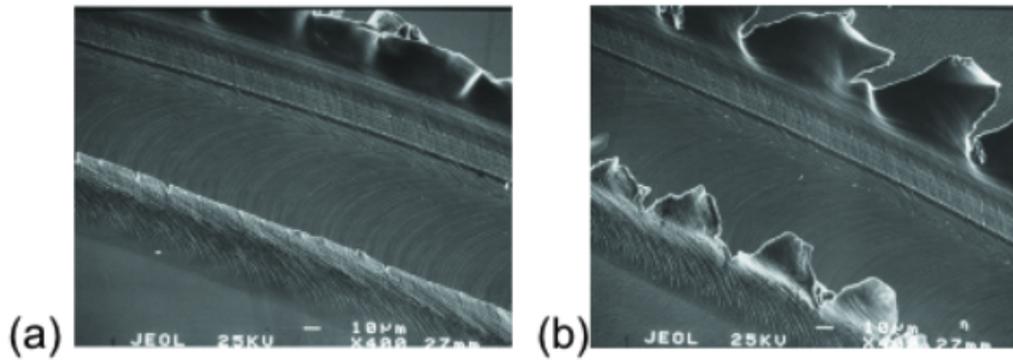


Figura 18 – Imagens da variação da formação de rebarbas em relação a um plano onde (a) 135° e (b) 180° (MIN et al., 2006).

Com intuito de avaliar a influência de alguns parâmetros na formação de rebarbas e superfície gerada, Muhammad et al. (2021), selecionaram quatro principais fatores em sua pesquisa. Os fatores são: três revestimentos diferentes de ferramenta (AlTiN, nAlCo e TiSiN); três níveis de taxa de avanço ($\mu\text{m}/\text{dente}$) com valores menores que o raio da aresta de corte; três níveis de velocidade de corte; três níveis de profundidade de corte. É exemplificado na Figura 19(a) um processo de formação de rebarbas em que os parâmetros escolhidos não atenderam a uma boa microusinagem. Portanto, na Figura 19(b) já é ilustrada uma microusinagem com parâmetros favoráveis à diminuição do tamanho das rebarbas.

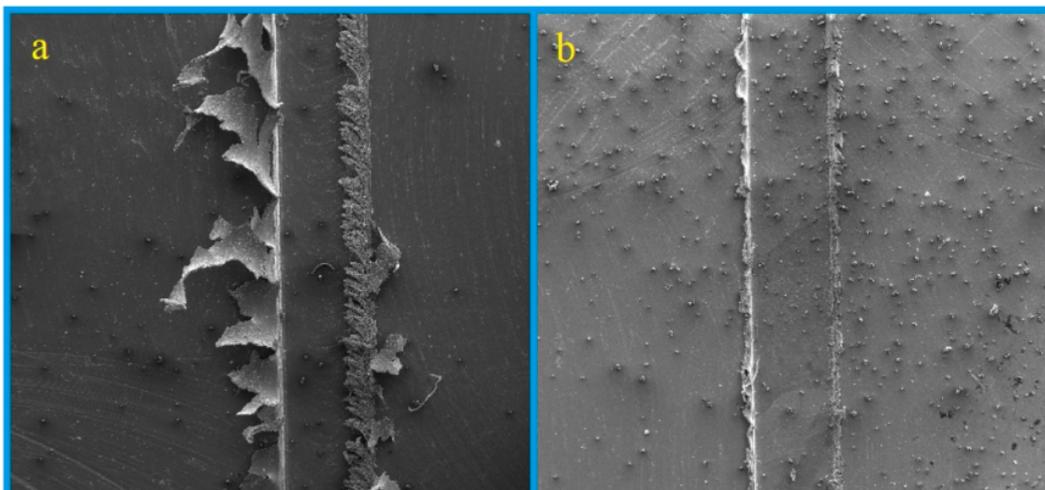


Figura 19 – Imagens mostrando dois tipos de rebarbas: (a) rebarbas desfavoráveis formadas por condições não recomendadas de corte; (b) rebarbas menores formadas em condições ótimas de corte (MUHAMMAD et al., 2021).

2.5 Qualidade superficial em microusinagem

Sun et al. (2017) atentam ao fato da miniaturização de peças acompanharem os avanços da ciência e tecnologia. Com isso, a microusinagem não é reduzida apenas

à alta precisão de usinagem, vale ressaltar também o baixo consumo de energia e alta eficiência. Haja vista os estudos publicados por diversos pesquisadores, as micropeças possuem algumas características desejáveis, tais quais: peso leve, natureza antioxidante, resistência e tenacidade altas. Contudo, a área de simulação, empregando o método de elementos finitos, é forte aliada no estudo dos mecanismos do microfresamento.

Os estudos de Colpani et al. (2019) analisaram a relação entre a força de corte, rugosidade superficial da peça e o raio da aresta da ferramenta. Com isso, ficou concluído que a Equação 2.1 indica a proporcionalidade entre tais itens de estudo.

$$R_{max} \approx \frac{f_z^2}{8 \cdot TR} \quad (2.1)$$

Onde,

- R_{max} é a rugosidade máxima;
- f_z é o avanço por dente;
- TR é o raio da aresta da ferramenta;

Chae, Park e Freiheit (2006), motivados pela microusinagem de alta velocidade, para reduzir o tempo na produção de formas 3D complexas, estudaram de forma metódica a força de corte em suas análises. Em seus experimentos, conseguiram relacionar a força na face de ataque e o desgaste da microferramenta. Os autores apontam que, com a redução das forças de corte, há uma melhoria na eficiência de remoção do material, o que exige uma espessura mínima de corte.

Observaram também que, uma profundidade de corte de 0,15 mm causa uma taxa de desgaste maior do que uma profundidade de corte 0,25 mm; que tem valor maior. Concluíram que, a velocidade de corte e a taxa de avanço são mais influentes no desgaste da ferramenta do que a profundidade axial de corte.

Bissacco, Hansen e De Chiffre (2006) analisaram superfícies geradas pelo microfresamento com duas microferramentas de pontas diferentes, uma de ponta esférica e outra de ponta plana. As superfícies geradas por ambas as ferramentas de corte são vistas na Figura 20. Para a ferramenta de ponta esférica, constatou-se que o diâmetro da ferramenta e o ângulo da superfície afetam a superfície gerada de forma mais significativa, diferente da ferramenta de ponta plana, em que o diâmetro da ferramenta se torna insignificante na observação da superfície gerada.

Os autores concluíram, portanto, que há dois principais aspectos responsáveis pela amplitude da rugosidade da superfície gerada. O primeiro aspecto é a geometria da ferramenta, pois está relacionada com o acúmulo de material deformado plasticamente nos sulcos da superfície da peça durante a microusinagem. Já o segundo aspecto está relacionado com o efeito de *plowing*, em que são formadas pequenas ondas na direção do avanço.

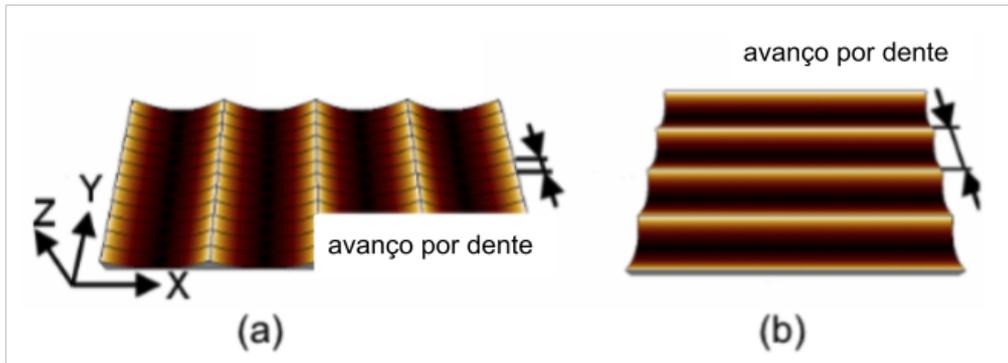


Figura 20 – Superfície gerada por (a) ponta esférica e (b) ponta plana. Adaptado de (BIS-SACCO; HANSEN; De Chiffre, 2006).

Quando em microescala, atenta-se que o tamanho do grão da peça microusinada é relativamente grande ao ser comparado com a espessura de corte. Na Figura 21 é possível observar uma mesma peça, submetida a diferentes profundidades de corte, a diferença entre as superfícies obtidas e suas microestruturas (KOMATSU et al., 2012). Com uma aresta de corte mais afiada, se tem um melhor acabamento de superfície, considerando que o tamanho do raio da aresta e os efeitos de *plowing* são diretamente proporcionais. Também é conhecido que, a microestrutura e dureza influenciam de forma significativa a rugosidade da superfície microusinada (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

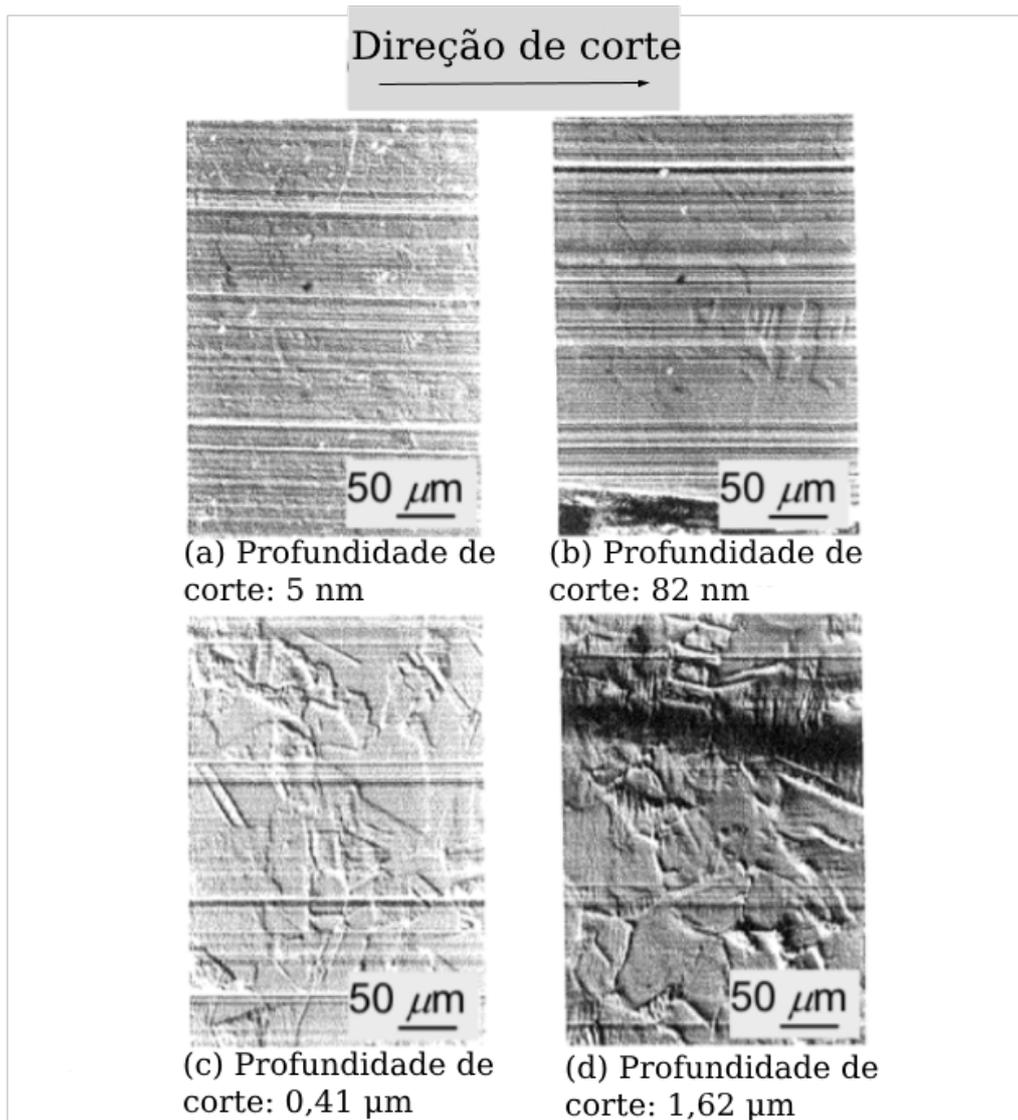


Figura 21 – Superfícies obtidas por microusinagem com diferentes profundidades de corte. Adaptado de (DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006).

O atrito entre a peça e a aresta de corte da ferramenta produzem uma alta temperatura no decorrer dos processos de microusinagem. Doravante ao aumento da temperatura, os valores da força de corte e a vibração da ferramenta também sobem, o que provoca acréscimo nos valores de rugosidade da superfície usinada. Até o limite de espessura mínima na geração de cavacos, é possível se obter um bom e controlado acabamento de superfície, entretanto, abaixo desse limite, há um aumento natural da rugosidade, que ocorre por conta da força de corte e efeito de *plowing* (MUHAMMAD et al., 2021).

O estudo experimental de Jing et al. (2016) abordou a rugosidade superficial no microfresamento de três metais (liga de alumínio 6160, latão e aço AISI 1040), explorando a influência de parâmetros como velocidade de corte, avanço por dente e propriedades do material. Foram empregados quatro valores de rotação para cada material, sendo eles: 10000, 12000, 14000 e 16000 *rpm*. Também variou-se o parâmetro de avanço por dente, utilizando-se de 0,5; 1, 2 e 3 $\mu\text{m}/\text{dente}$. Os resultados indicaram que a rugosidade é sensível

aos parâmetros de corte, especialmente à espessura mínima de corte, evidenciando que o aumento no avanço por dente, quando superior à espessura mínima de corte, resulta em aumento da rugosidade.

Além disso, a utilização de microfresas de diferentes diâmetros demonstrou impacto significativo na qualidade superficial, sendo a microfresa de 0,9 mm de diâmetro mais eficaz, quando comparada a uma de 0,6 mm, com melhor desempenho no latão, como se pode notar no gráfico da Figura 22. Os autores destacaram a velocidade de corte como o fator mais significativo na influência da rugosidade superficial, seguido pelo avanço por dente. Na representação gráfica apresentada na Figura 23, é evidente a variação nos valores da rugosidade R_a da peça de Alumínio 6160 durante o ensaio de microfresamento. Tal variação ocorreu ao empregar uma ferramenta de diâmetro de 0,9 mm, com uma velocidade de avanço de 45,24 m/min, seguida pelo uso de uma ferramenta de diâmetro de 0,6 mm, que apresentou uma velocidade de avanço de 30,16 m/min.

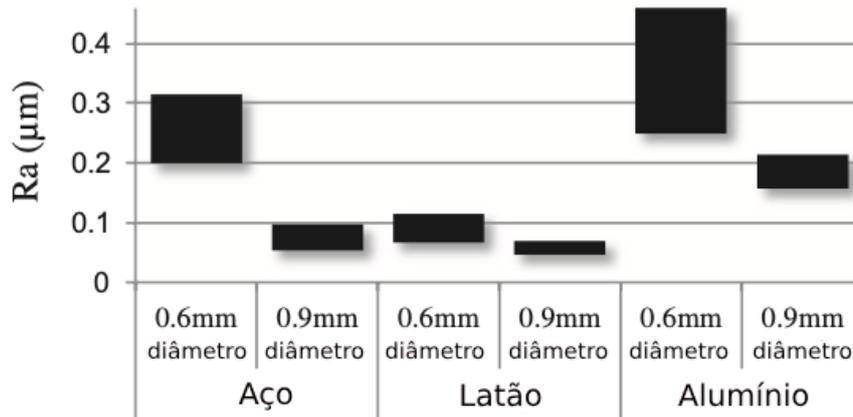


Figura 22 – Valores da rugosidade R_a para diferentes tipos de metal utilizando microfresas de 0,6 mm e 0,9 mm de diâmetro. Adaptado de (JING et al., 2016).

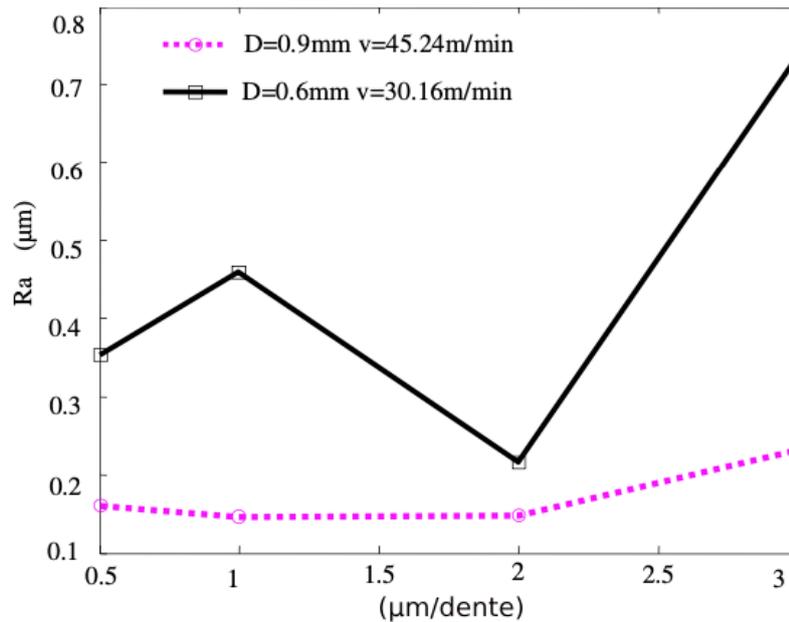


Figura 23 – Gráfico R_a vs. diâmetro da ferramenta para microfresamento da peça de liga de Alumínio 6160. Adaptado de (JING et al., 2016).

A avaliação da rugosidade de uma superfície é conduzida por meio de parâmetros de amplitude, parâmetros de espaço e parâmetros híbridos. Os parâmetros de amplitude envolvem as alturas dos picos, a profundidade dos vales ou ambos. Por outro lado, os parâmetros de espaço referem-se ao espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície, enquanto os parâmetros híbridos resultam da combinação dos dois primeiros. O R_a , como um parâmetro de processo, é amplamente utilizado como medida de altitude. Variações nos valores desse parâmetro refletem alterações no processo, especialmente no desgaste da ferramenta (MACHADO et al., 2009).

2.6 Microfresamento em Alumínio

O segundo metal mais abundante presente no planeta é o alumínio. Tem como características boa resistência à corrosão, altas condutibilidade térmica e elétrica, alto coeficiente de expansão linear e boa tenacidade. Sua cristalografia é do tipo CFC (Cúbica de Face Centrada). Quando há adição de elementos de liga, apresenta significativas melhoras na resistência mecânica e dureza. Possui temperatura de fusão de 660°C , densidade de 2700 kg/m^3 e módulo de elasticidade de $69 \times 10^3\text{ MPa}$. Devido a sua notável versatilidade, mesmo em aplicações sujeitas a intensas solicitações mecânicas, o alumínio é utilizado em vários campos da indústria, como na construção civil, soldagem e elétrica (MARTINS, 2002). Rodrigues et al. (2021) destacam a propriedade sustentável do alumínio, pois devido seu ciclo de vida estendido, pode ser reciclado

As ligas da série 6xxx contêm magnésio e silício como os principais elementos de

liga, que se combinam como siliceto de magnésio (Mg_2Si) após a solução sólida. As ligas desta série são tratáveis termicamente (KAUFMAN, 2000). Stojanovic, Bukvic e Epler (2018) apontam a possibilidade de previsão do comportamento de ligas de alumínio em sistemas técnicos reais, utilizando de ferramentas de simulação e pacotes de *software* apropriados. Com isso, pode-se detectar precocemente possíveis defeitos de produção, o que visa alcançar melhores resultados nos processos de fabricação de carros, por exemplo.

Kiswanto, Zariatin e Ko (2014) utilizaram a liga de alumínio 1100 em seus estudos, para descrever as características e o desempenho da rotação e das taxas de avanço, relacionando-as com a rugosidade da superfície e à formação de rebarbas. Para tal intuito, foi utilizada uma microfresadora miniaturizada. A microferramenta empregada para cortar a liga de alumínio foi uma fresa de topo plana com dois canais, fabricada em metal duro com revestimento Mega-T. Utilizou-se do método estatístico ANOVA para analisar as relações entre rotação, taxas de avanço e os tempos de usinagem.

Foram selecionados três parâmetros para taxa de avanço (0,05; 0,5 e 1 mm/s) para cada parâmetro de rotação selecionados (35000, 70000 e 95000 rpm). A peça do ensaio foi dividida em microcanais, com 12 mm de comprimento cada, profundidade de corte de 10 μm . Concluiu-se que a estratégia de microfresamento discordante, observado na Figura 24(a), produz rebarbas com dimensões menores quando comparado à estratégia de microfresamento concordante, assim visto na Figura 24(b).

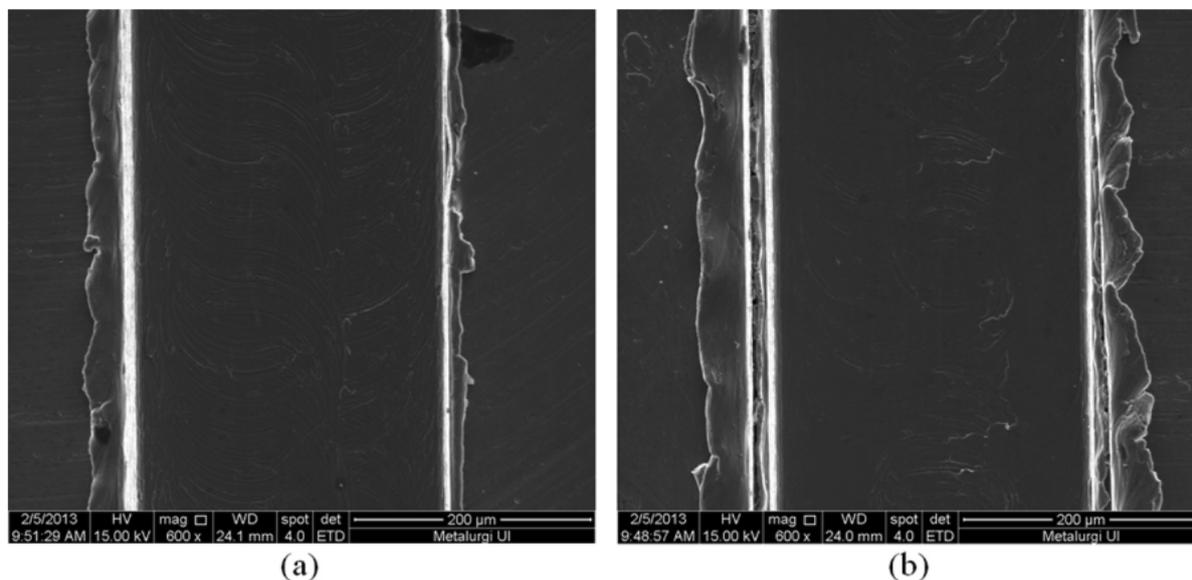


Figura 24 – (a) Corte da peça utilizando a estratégia de microfresamento discordante e (b) Corte da peça utilizando a estratégia de microfresamento concordante (KISWANTO; ZARIATIN; KO, 2014).

Araujo, Mougó e Campos (2013) estudaram a influência da espessura de corte no microfresamento de uma peça de liga de alumínio 6351 T6. Para isso, foi utilizado o centro de usinagem CNC Mini Mill/GX da fabricante Minitex Machinery Corporation

para produzir microcanais na peça, com os parâmetros situados na Tabela 1. Todos os parâmetros foram mantidos constantes, com exceção da penetração de trabalho. Através da microscopia eletrônica de varredura foi possível observar, com detalhamento, as imagens dos microcanais obtidos. Puderam concluir que é possível obter melhores qualidades superficiais para valores de penetração de trabalho inferiores ao diâmetro da ferramenta. Isso se dá porque, como observado na Figura 25(a), quando empregada uma penetração de trabalho com 25% do tamanho do diâmetro da microferramenta, há menos formação de rebarbas comparado à Figura 25(b), onde se utilizou uma penetração de trabalho com 100% do tamanho do diâmetro da microferramenta.

Tabela 1 – Parâmetros de corte para ensaio da peça de liga de alumínio 6351 T6.

Parâmetro de corte	Valor adotado
Velocidade de corte (v_c)	23,93 m/min - sentido horário
Avanço por dente (f_z)	2 μm
Profundidade de corte (a_p)	50 μm
Penetração de trabalho (a_e)	0,0318; 0,0635; 0,1270 e 0,2540 mm

Fonte: (ARAUJO; MOUGO; CAMPOS, 2013).

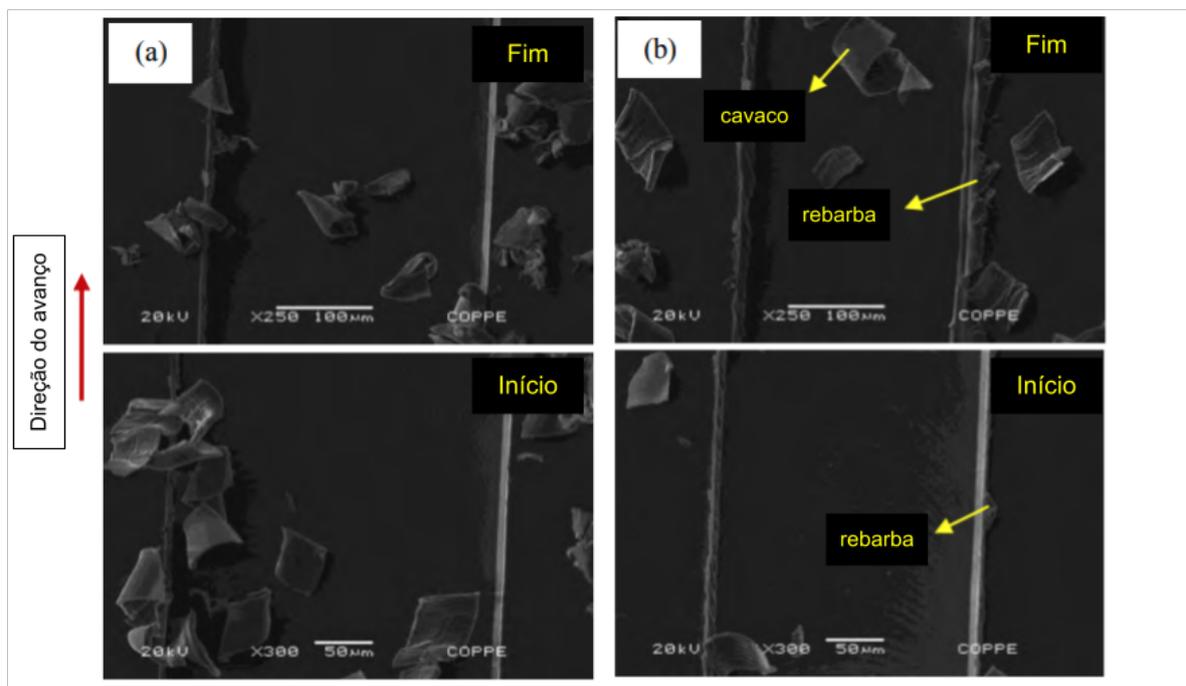


Figura 25 – Início e fim de cortes de microcanais. (a) Microcanal com $a_e = 0,0635$ mm e (b) Microcanal com $a_e = 0,254$ mm (Adaptado de Araujo, Mougo e Campos (2013)).

3 Materiais e Métodos

3.1 Caracterização do Material

O material utilizado neste estudo é a liga de alumínio 6101 T6. É um material com alta condutividade elétrica, boa resistência à corrosão e moderada resistência ao desgaste mecânico. Devido a essas propriedades, é amplamente utilizado na indústria elétrica para cabos de transmissão de energia, fabricação de barramentos elétricos, distribuição de energia, etc. A composição química do material é dada na Tabela 2. Segundo o trabalho de Malcher et al. (2020), são citadas as propriedades mecânicas do alumínio 6101 na Tabela 3.

Tabela 2 – Composição química da liga de alumínio ABNT/ASTM 6101.

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

Fonte: Império dos Metais (2022)

Tabela 3 – Parâmetros elásticos para a liga da alumínio 6101.

Descrição	Símbolo	Valor Tração
Módulo de Young	E [MPa]	65,554
Coefficiente de Poisson	ν	0,3
Limite de escoamento inicial	σ_{y0} [MPa]	96,13
Alongamento percentual máximo	A [%]	35,6

Fonte: Malcher et al. (2020)

3.2 Máquina-ferramenta e ferramenta de corte

O centro de usinagem vertical do modelo VEGA XH7132, pertencente ao Laboratório de Usinagem da Universidade de Brasília, foi utilizado para a realização dos ensaios. Ele é representado na Figura 26. A mesa de trabalho possui dimensões de 920x320 mm, sua faixa de rotação do eixo varia de 60 a 6000 *rpm*, a velocidade de avanço pode variar de 2,5 a 3000 *mm/min*, motor principal com potência de 3,7 kW e suporta ferramentas de até 8 kg. Mais informações técnicas estão disponíveis no Anexo A.



Figura 26 – Centro de usinagem vertical VEGA XH7132

As ferramentas de corte utilizadas no ensaio são do modelo MS2MSD0040 da fabricante Mitsubishi. São constituídas por diâmetro de 400 μm , comprimento de corte de 800 μm , erro máximo de 5% de redução, além de duas arestas de corte com raio de $1 \pm 0,1 \mu\text{m}$, de acordo com o catálogo da fabricante. A ferramenta de corte pode ser visualizada na Figura 27. Suas dimensões, todas em *mm*, estão representadas na Figura 28.



Figura 27 – Microferramenta MS2MSD0040 (MITSUBISHI, 2023).

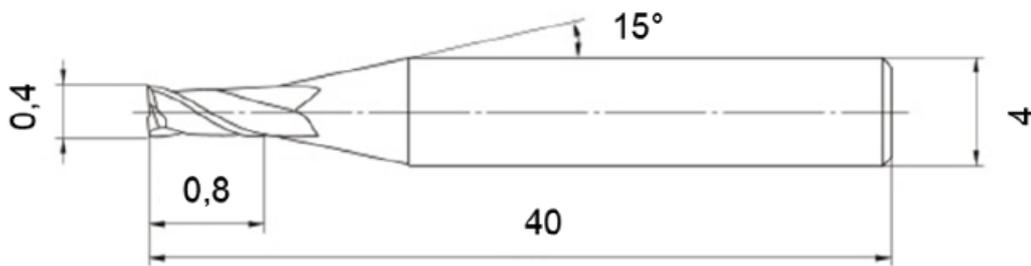


Figura 28 – Dimensões da microferramenta MS2MSD0040 (Adaptado de MITSUBISHI (2023)).

3.3 Microfresamento da amostra

Para o microfresamento da liga Al 6101, os parâmetros de corte foram escolhidos considerando outros trabalhos realizados com peça de mesmo material, para efeito de comparação.

Para realizar o microfresamento, uma amostra de $90\text{ mm} \times 6,35\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ foi submetida a um processo de tratamento de superfície utilizando fluido de corte BIO100e, uma fresa de aço rápido sem revestimento, 4 arestas de corte, 10 mm de diâmetro, com intuito de garantir o paralelismo e planicidade da amostra. Tal processo permite a redução dos erros que podem ocorrer durante o microfresamento. Os parâmetros de corte utilizados para a preparação da superfície são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de corte empregados na preparação da superfície da liga de alumínio 6101

Parâmetro de corte	Valor adotado
Rotação	2000 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

Para os ensaios de microfresamento, houve a aplicação do fluido solúvel sintético biodegradável BIO100e, da fabricante BQL. É um óleo destinado para usinagem, caracterizado por boa durabilidade, alto poder lubrificante, além de bons efeitos refrigerantes e anticorrosivos. Contudo, é um produto que facilita a manipulação da operação (BQL, 2023). Na Figura 29, nota-se o método de fixação da peça por meio de uma morsa e grampos deslizantes, bem como a disposição dos tubos para o fluido de corte, além da ferramenta já em processo do ensaio de microfresamento.

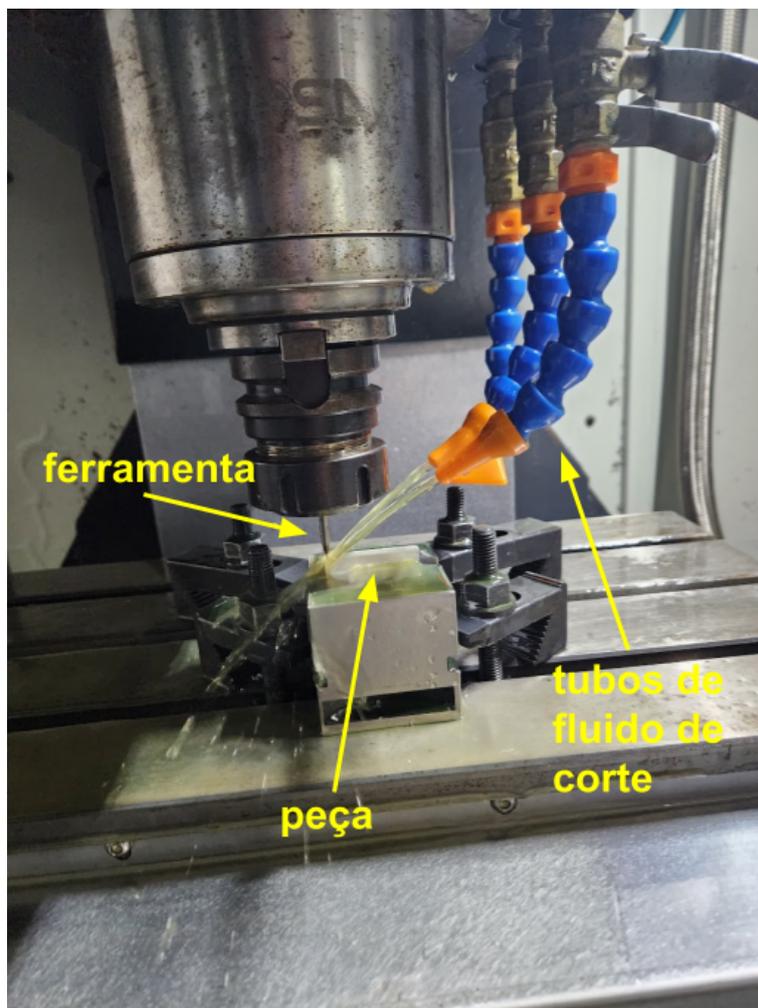


Figura 29 – Fixação da peça por meio de morsa e grampos deslizantes. Tubos de fluido de corte posicionados. Ferramenta em processo do ensaio de microfresamento.

O estudo tem como objetivo averiguar como a variação da velocidade de corte impacta na qualidade superficial dos microcanais da peça, com isso, os parâmetros de corte adotados estão representados na Tabela 5. O parâmetro de rotação é o único que possui variação, enquanto todos os outros parâmetros são mantidos constantes. Uma única ferramenta foi utilizada para todo o ensaio.

Tabela 5 – Parâmetros de corte empregados no microfresamento do alumínio 6061

Parâmetro de corte	Valor adotado
Rotação	2000, 4000 e 6000 rpm
Velocidade de avanço (V_f)	40, 80 e 120 mm/min
Avanço por dente (f_z)	10 μm
Profundidade de corte (a_p)	100 μm
Penetração de trabalho (a_e)	400 μm
Número de dentes (z_n)	2

Foram produzidos 6 microcanais na peça, com espaçamento de 1 mm entre os centros, em que cada um possui 6,35 mm de comprimento, como pode ser observado no desenho esquemático da Figura 30. Para cada valor de rotação, foi executado um ensaio e uma réplica. É possível observar na Tabela 6 a velocidade de rotação a qual cada par de canal (ensaio e réplica) foi submetido. Na Figura 31, é possível observar a imagem da peça imediatamente após o tratamento de superfície (à esquerda), juntamente com a peça após o processo de microfresamento para a obtenção dos microcanais (à direita).

Tabela 6 – Valores de rotação para cada par (ensaio e réplica) de canais.

Canal	Rotação
1 e 2	2000 rpm
3 e 4	4000 rpm
5 e 6	6000 rpm

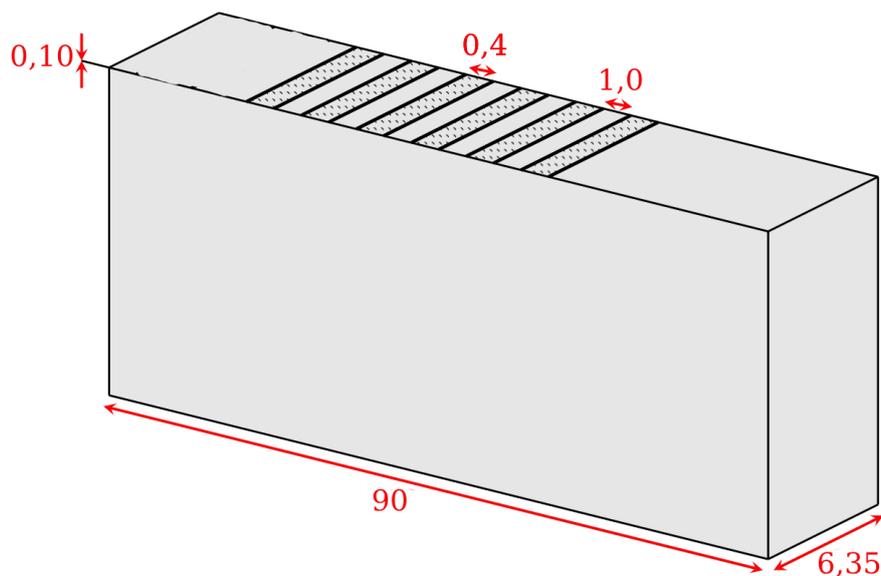


Figura 30 – Esquema da geometria e dimensões dos canais microfresados em uma liga de alumínio 6101.

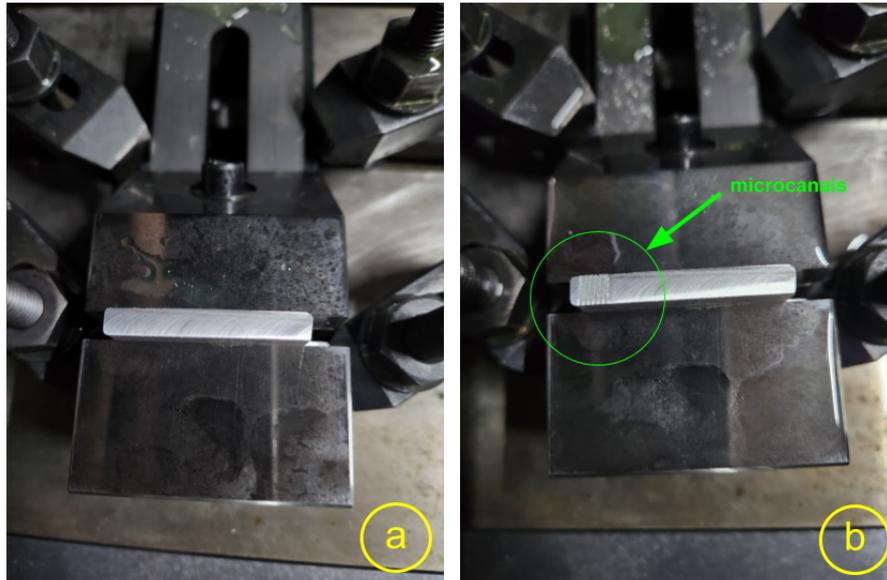


Figura 31 – (a) Peça logo após o tratamento de superfície. (b) Peça após o processo de microfresamento.

3.4 Variáveis de saída

As variáveis de saída foram adquiridas usando um microscópio confocal de varredura a laser Olympus LEXT OLS4100, ilustrado na Figura 32, disponível no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Universidade de Brasília. A microscopia pode ser usada para analisar as seguintes variáveis:

- (i) Imagens da superfície
- (ii) Rugosidade superficial
- (iii) Altura da rebarba



Figura 32 – Microscópio utilizado no experimento para levantamento das variáveis de saída (SILVA, 2021).

3.4.1 Medição da rugosidade superficial

Seguindo a metodologia do trabalho de de Oliveira et al. (2021), para a avaliação da rugosidade, empregou-se o *software LEXT*, o qual está integrado ao microscópio utilizado neste estudo. Três áreas distintas foram escolhidas em cada canal microfresado, conforme ilustrado na Figura 33. As medições foram realizadas nessas localizações, uma medição para cada área selecionada, possibilitando a obtenção das médias e dos desvios padrão, com intervalo de confiança de 95,45%. Para a mensuração da rugosidade no fundo do canal, utilizou-se uma objetiva de microscópio com aumento de 5x para o enquadramento do canal. Em seguida, uma varredura foi executada por toda a extensão das áreas selecionadas, paralelamente à direção do avanço. Durante esse processo, as lentes foram alternadas, finalizando o processo com uma lente de aumento de 50x.

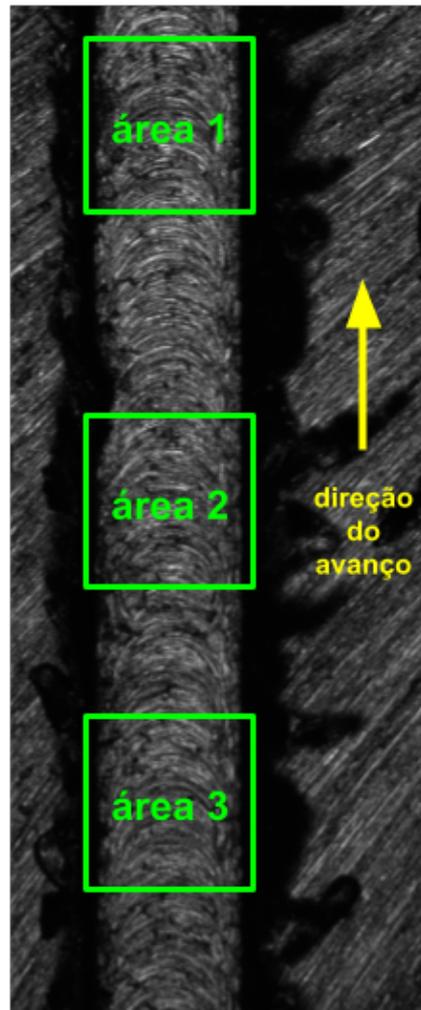


Figura 33 – Processo de avaliação da rugosidade de um microcanal.

Logo, é gerado pelo *software* um relatório com diversos valores de rugosidade, como evidenciado na Figura 34. Os parâmetros R_a , R_q e R_z foram adotados no presente trabalho pois, baseado na pesquisa de Todhunter et al. (2017), esses três parâmetros foram os mais utilizados globalmente no ano de 2016, conforme indicado na Figura 35. Seguindo a norma ABNT NBR ISO 4288, em que, filtro de Gauss com cut-off $\lambda_c = 800 \mu m$ e comprimento de amostra $n = 5$.

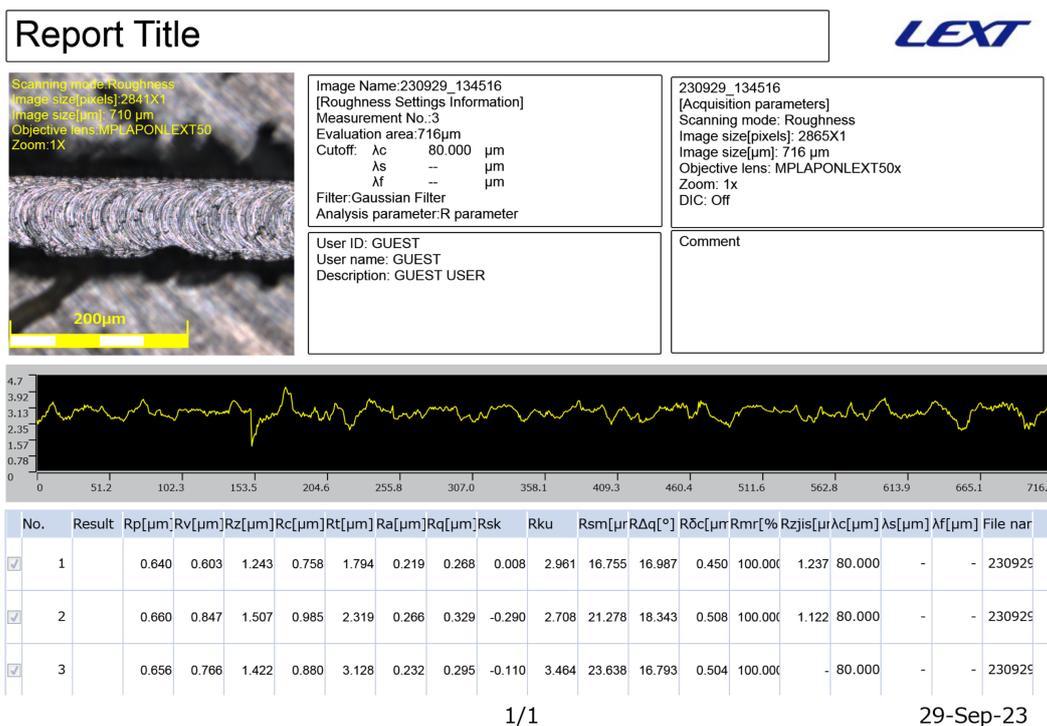


Figura 34 – Relatório gerado pelo *software* LEXT com valores de rugosidade do microcanal avaliado.

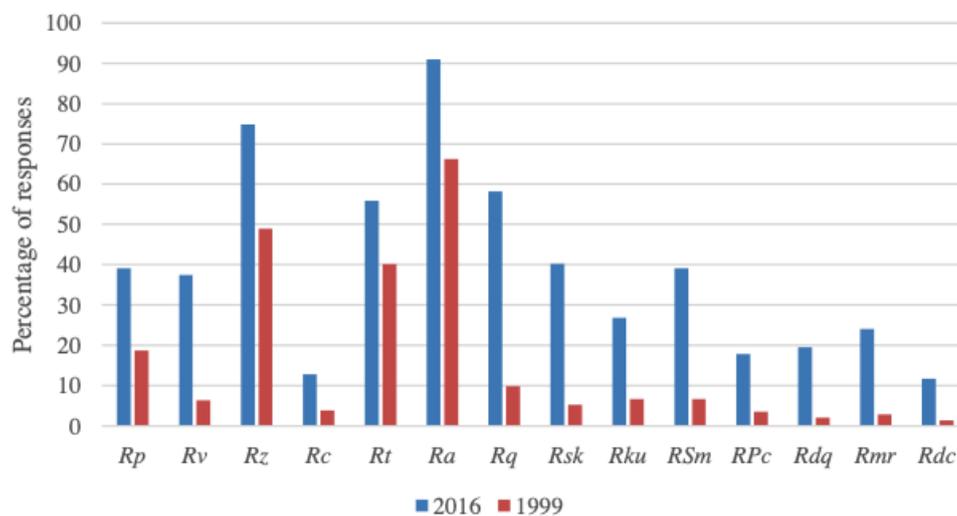


Figura 35 – Análise gráfica que indica o uso de parâmetros de rugosidade da ISO 4287 para as pesquisas de 2016 (azul) e 1999 (vermelho), indicando a porcentagem do número total de respostas que utilizam cada parâmetro (TODHUNTER et al., 2017).

3.4.2 Medição de altura das rebarbas

Para a mensuração das alturas das rebarbas, adotou-se a metodologia proposta por Araujo (2022). Foi empregada a funcionalidade de captura de imagem via laser do micros-

cópio, que analisa e determina o perfil da superfície de cada canal, conforme exemplificado na Figura 36. As imagens capturadas revelaram as variações no relevo da peça, assim observadas na Figura 37. Nesse procedimento, uma linha de posicionamento é inserida na imagem para definir a região desejada para a obtenção das medidas da rebarba. Posteriormente, é estabelecida uma linha vertical de referência, alinhada com a superfície da peça. A linha de referência permanece fixa, enquanto a linha de medição é ajustada nas extremidades das rebarbas. Com base na imagem e nas distâncias entre as duas linhas, o *software* quantifica a altura das rebarbas. Em cada microcanal, foram realizadas cinco medições, duas posicionadas no início, uma na porção central e outras duas no final do canal, permitindo assim a determinação da média e do desvio padrão das alturas correspondentes.

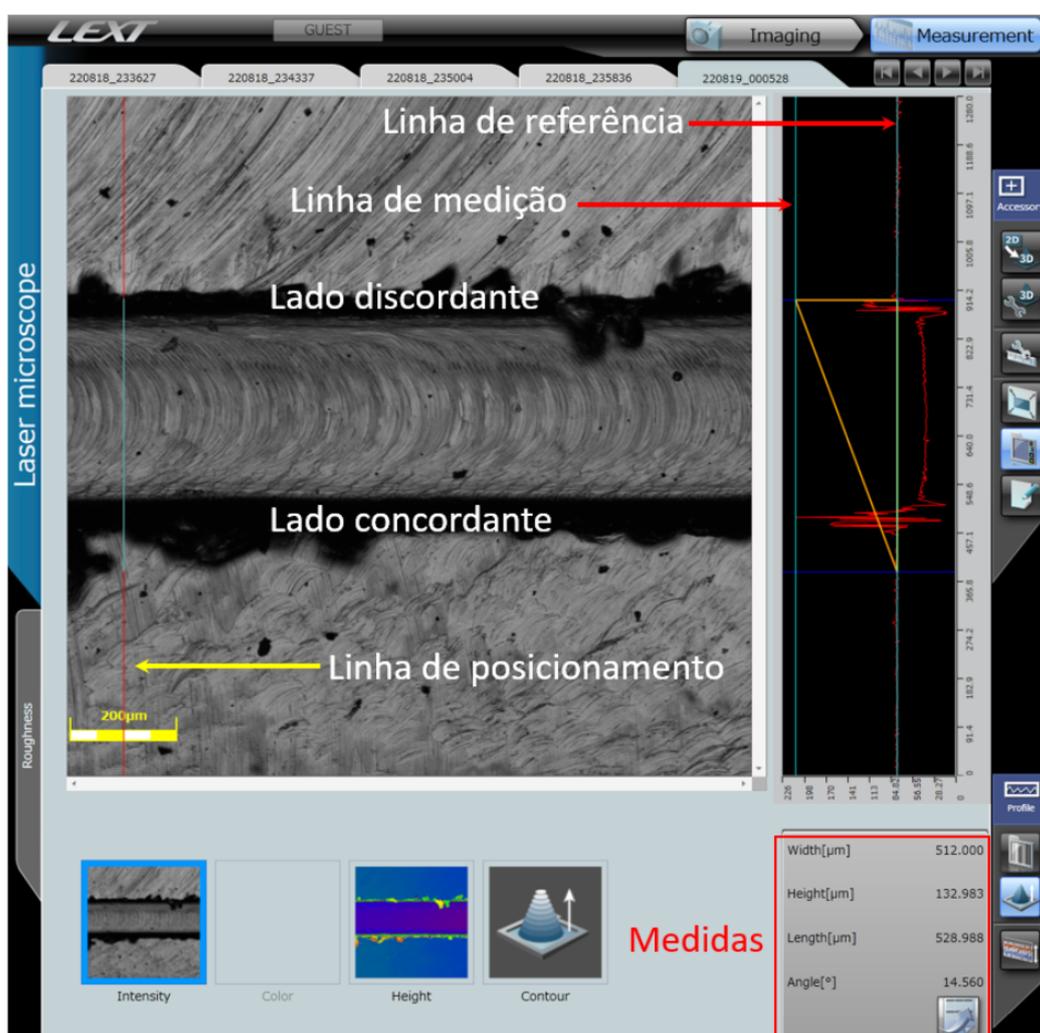


Figura 36 – Medição da rebarba (ARAUJO, 2022).

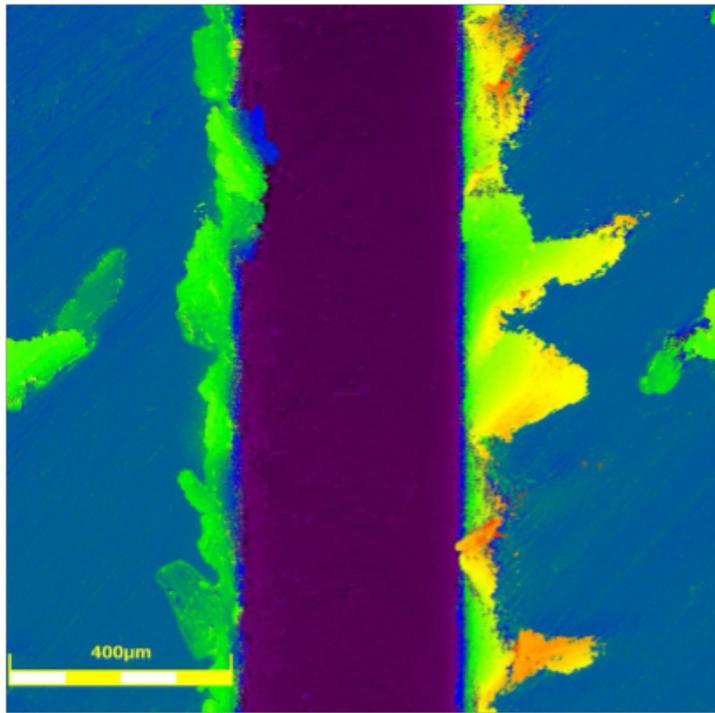


Figura 37 – Variações de relevo da peça usinada.

4 Resultados e Discussões

4.1 Rugosidade superficial e imagens dos canais microusinados

Com auxílio do *software* LEXT, o qual possui integração com o microscópio utilizado nesse estudo, foi possível obter valores de rugosidade. Para cada microcanal que passou pelo processo de usinagem, foram determinadas as médias e os desvios padrões das rugosidades. O erro considerado foi duas vezes o desvio padrão. Estas rugosidades foram mensuradas na direção do avanço, especificamente no centro do canal, conforme ilustrado na Figura 33. Os gráficos que exibem as informações das rugosidades Ra, Rq e Rt podem ser visualizados nas Figuras 38, 40 e 39, respectivamente. A elaboração destes gráficos teve como propósito facilitar a compreensão e interpretação dos dados obtidos nos experimentos.

Observando os gráficos das Figuras 38 e 39, nota-se que o par de canais 3 e 4 (ensaio e réplica), os quais foram submetidos a um valor de rotação de 4000 rpm, possuem menores rugosidades quando comparados aos outros dois pares de canais.

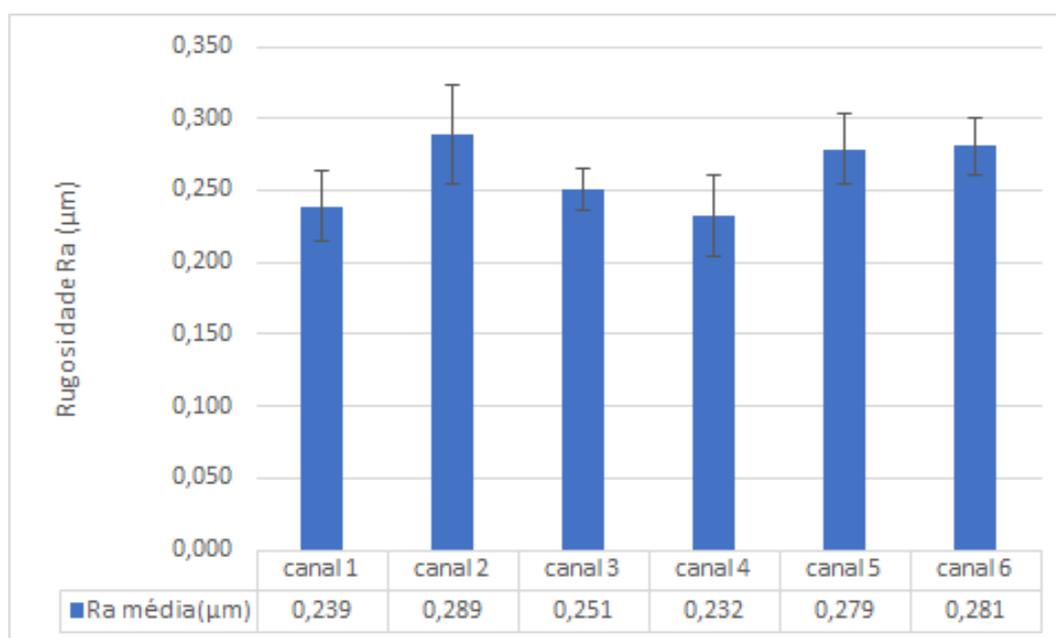


Figura 38 – Valores médios da rugosidade Ra para o ensaio de microfresamento de uma liga Al 6101.

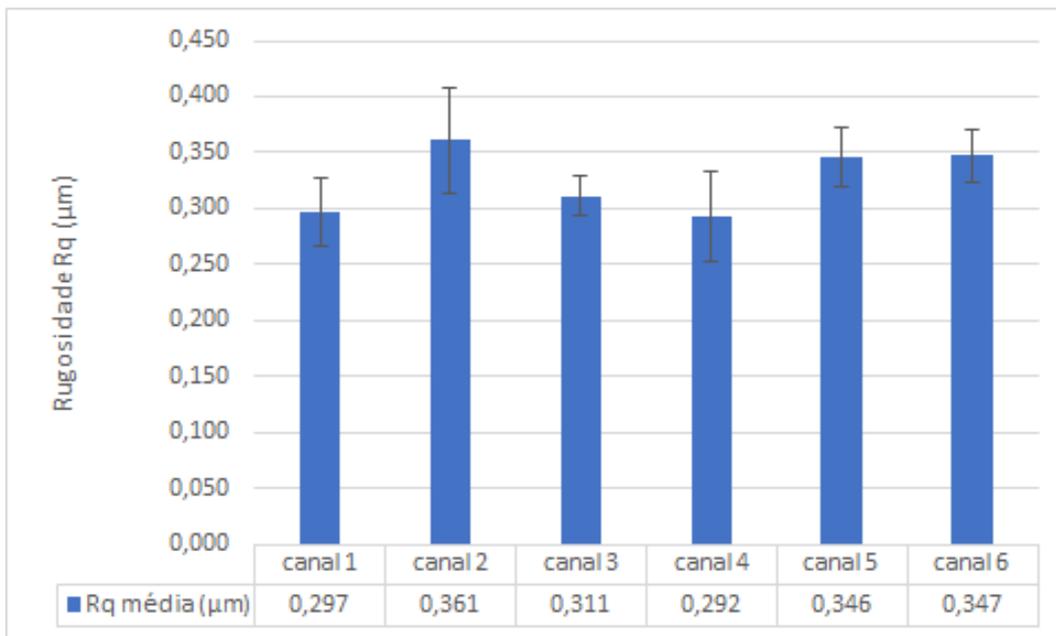


Figura 39 – Valores médios da rugosidade Rq para o ensaio de microfresamento de uma liga Al 6101.

A partir da interpretação gráfica da Figura 40 observa-se que o canal 4 ainda possui rugosidade menor que os demais canais, entretanto seu par, o canal 3, possui valor um pouco maior. Tal variação pode ter sido causada pelos pontos definidos para cálculo da rugosidade. Analisando a Figura 41, percebe-se maior concentração do efeito *plowing*, indicado pelas setas amarelas, na região central do fundo do canal 3, quando comparado à mesma região do canal 4, como se observa na Figura 42.

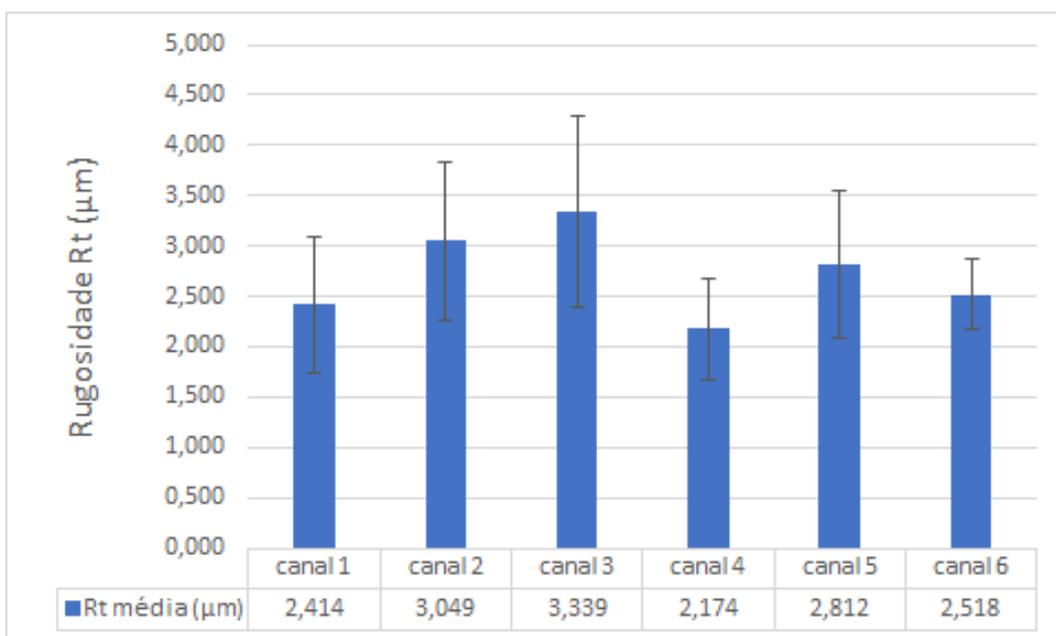


Figura 40 – Valores médios da rugosidade Rt para o ensaio de microfresamento de uma liga Al 6101.

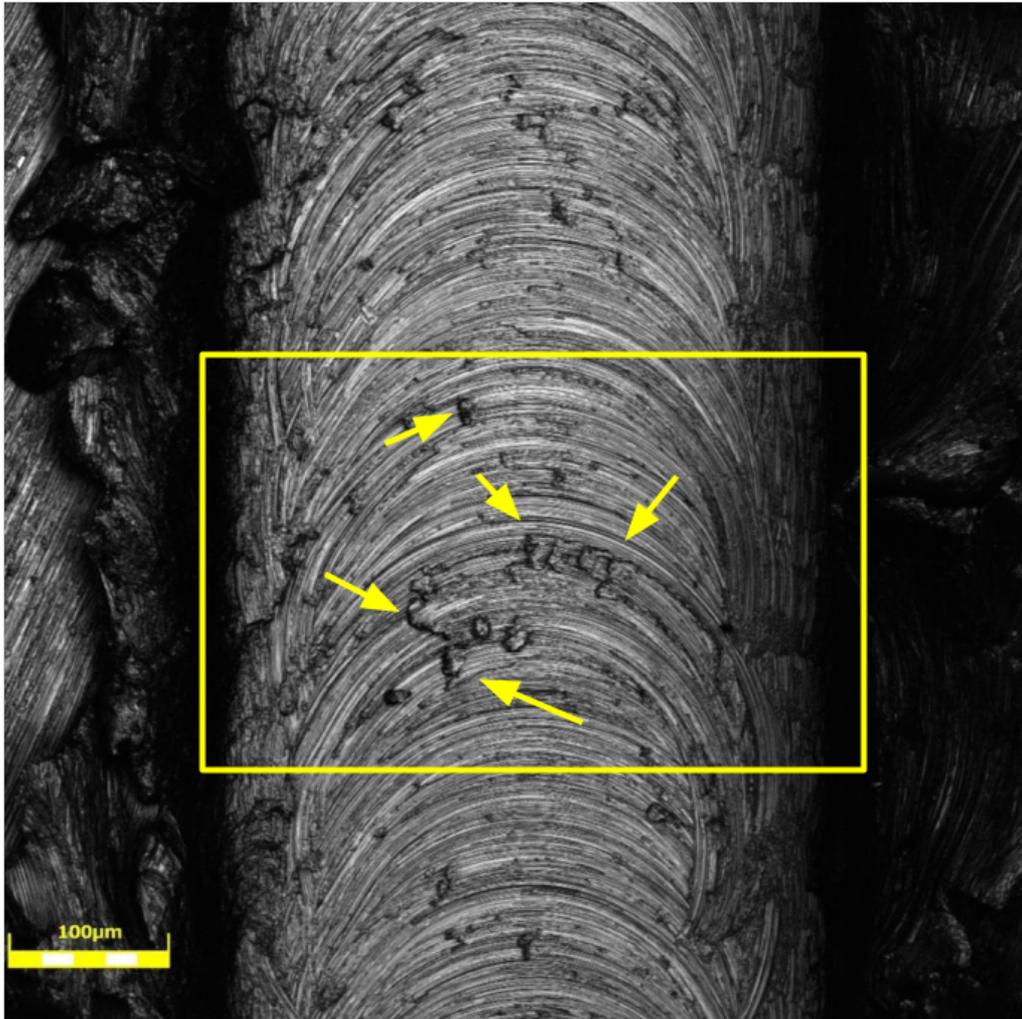


Figura 41 – Presença do efeito *plowing* observado no fundo do canal 3.

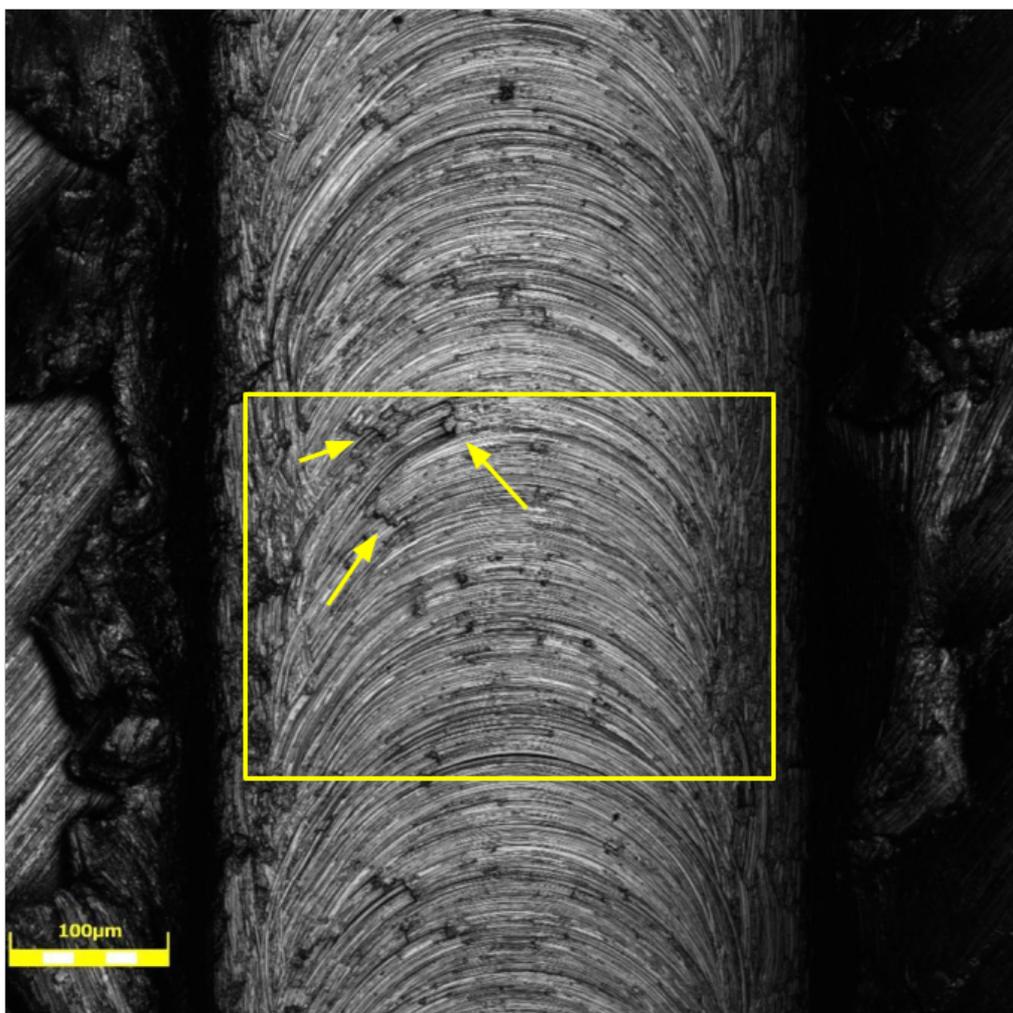


Figura 42 – Presença do efeito *plowing* observado no fundo do canal 4.

O acréscimo em 2000 rpm na velocidade de rotação não causou variações significativas entre os valores encontrados das rugosidades. Para o parâmetro R_a , por exemplo, as rugosidades variaram de $0,232 \mu m$ até $0,289 \mu m$.

Na pesquisa de Jing et al. (2016), foi utilizado uma liga de alumínio 6061, o qual possui propriedades muito similares ao utilizado neste trabalho, em um ensaio de micro-fresamento. Quatro velocidades de rotação foram selecionadas para usinagem de micro-canais, sendo elas 10000, 12000, 14000 e 16000 rpm. Diferente do ensaio deste trabalho, variou-se também os valores de avanço por dente, o que não é relevante para essa análise. É importante observar que na variação de 10000 rpm até 14000 rpm há uma diferença significativa, de aproximadamente 104%, entre os parâmetros de rugosidade R_a . Tomando como exemplo o ensaio com parâmetro de avanço de $2 \mu/dente$, nota-se um valor mínimo de $0,07 \mu m$ e um máximo de $0,143 \mu m$, o que indica o gráfico da Figura 43. Uma diferença muito grande quando comparada à encontrada no ensaio com a liga de alumínio 6101, que possui diferença de aproximadamente 24%.

Valores ainda maiores de rugosidade são notados quando se aumenta a velocidade

de rotação para 16000 rpm. Uma diferença de 6000 rpm para o primeiro microcanal usinado. Os autores relacionam esse fenômeno ao fato do poder de recuperação elástica do alumínio, devido sua ductilidade.

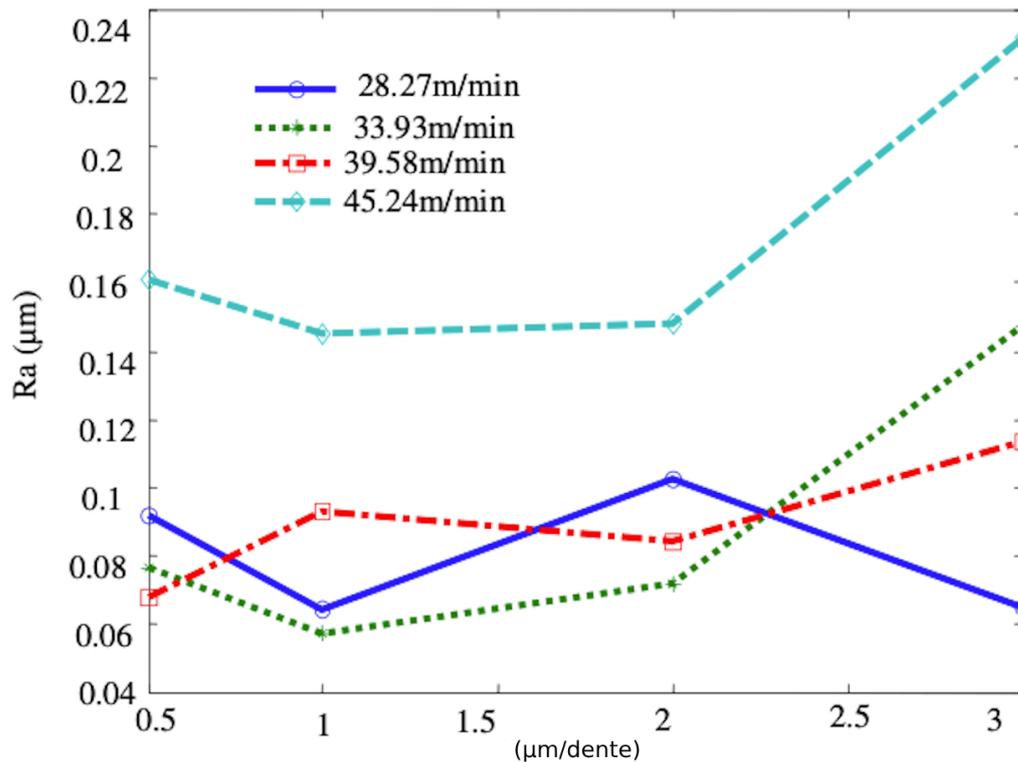


Figura 43 – Comportamento do parâmetro de rugosidade R_a da liga de alumínio 6061 de acordo com a variação da velocidade de rotação e do avanço por dente. Adaptado de Jing et al. (2016).

Oliaei e Karpat (2017) afirmam que, o desgaste da ferramenta deve ser considerado nos processos de microfresamento, influenciando diretamente na eficiência e qualidade da usinagem. Durante a microfresamento, as ferramentas estão sujeitas a condições extremas de corte devido às dimensões reduzidas dos canais e à alta precisão exigida. O desgaste da ferramenta pode manifestar-se de várias maneiras, incluindo desgaste na aresta de corte, formação de aresta postíca de corte (APC), onde um exemplo pode ser observado na Figura 44, além da deformação da geometria da ferramenta. Os pesquisadores destacam que a presença da aresta postíca de corte (APC) tem impactos adversos na qualidade da superfície usinada. No entanto, ela também desempenha um papel protetor essencial ao preservar a microferramenta, mitigando assim o desgaste acelerado.



Figura 44 – Ponta da microfresa com APC (Adaptado de Oliaei e Karpát (2017)).

Esses fenômenos ocorrem pelo contato repetitivo com o material da peça, especialmente em ligas de alumínio que são propensas à adesão e acumulação de material na ferramenta. Uma manifestação recorrente em superfícies microusinadas por ferramentas que apresentam aresta postiga de corte é a aderência de materiais à base do canal, podendo eventualmente desprender-se da ferramenta de corte (ZIBEROV, 2018). Nesse contexto, é perceptível a presença de materiais aderidos ao fundo dos canais microusinados, conforme indicado pelas setas amarelas na Figura 45.

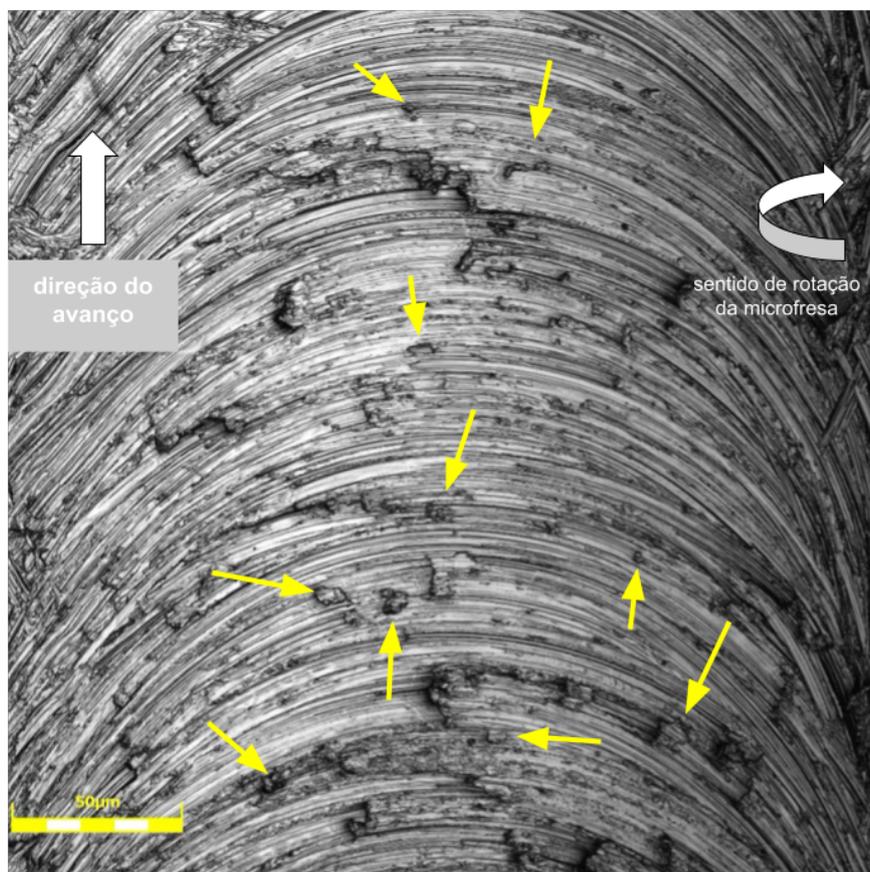


Figura 45 – Presença de materiais aderidos ao fundo dos canais microusinados em uma liga de alumínio Al 6101.

Ziberov (2018) observou ainda, em sua pesquisa, que na condição de corte a seco, houve uma evidente arredondamento da aresta principal de corte e a aderência de material à aresta, característico do fenômeno de aresta postiça de corte (APC). Contudo, deve-se ressaltar que o desgaste concentra-se predominantemente na ponta da ferramenta, resultando em um aumento do arredondamento. Ao analisar as superfícies dos microcanais, o autor notou que apenas os primeiros canais exibem marcas de avanço mais uniformes, ao passo que os canais subsequentes apresentam marcas mais visíveis e profundas, deixadas pela ferramenta, devido à presença da APC na mesma.

Ao examinar as imagens microscópicas dos canais microfresados, localizados nas Figuras 46, 47 e 48, é possível identificar o fenômeno previamente descrito por Ziberov (2018). A análise do fundo do canal 1 revela marcas uniformes deixadas pela ferramenta, resultado compreensível dada a condição inicial da ferramenta de corte, que estava no início do seu ciclo de uso. Entretanto, uma mudança no padrão é observada já no fundo do canal 2, onde há algumas marcas mais evidentes e profundas, sugerindo um início de desgaste da ferramenta, possivelmente iniciando no canal 2. Para os canais subsequentes, as marcas são ainda mais profundas e destacadas.

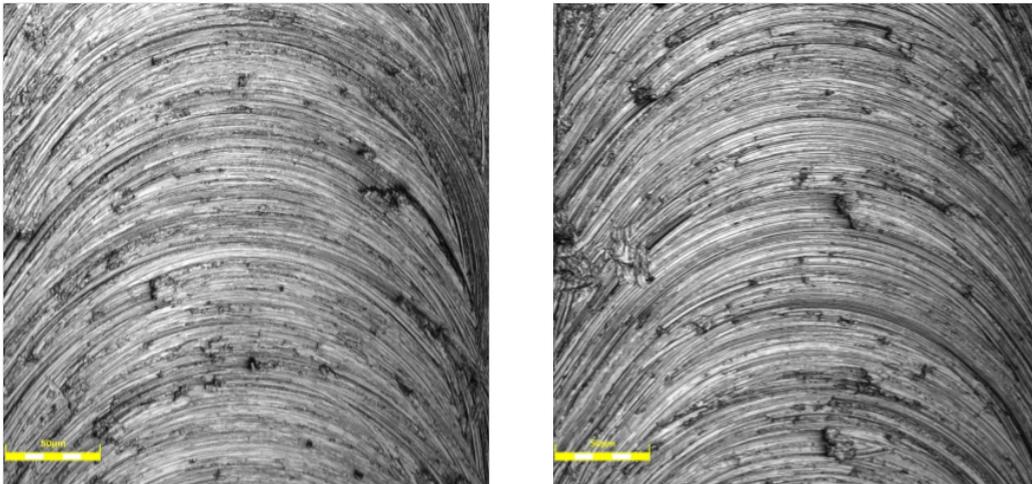


Figura 46 – Fundo dos canais 1 (esquerda) e 2 (direita) microusinados em uma liga Al 6101. Gerados por uma velocidade de rotação de 2000 rpm.

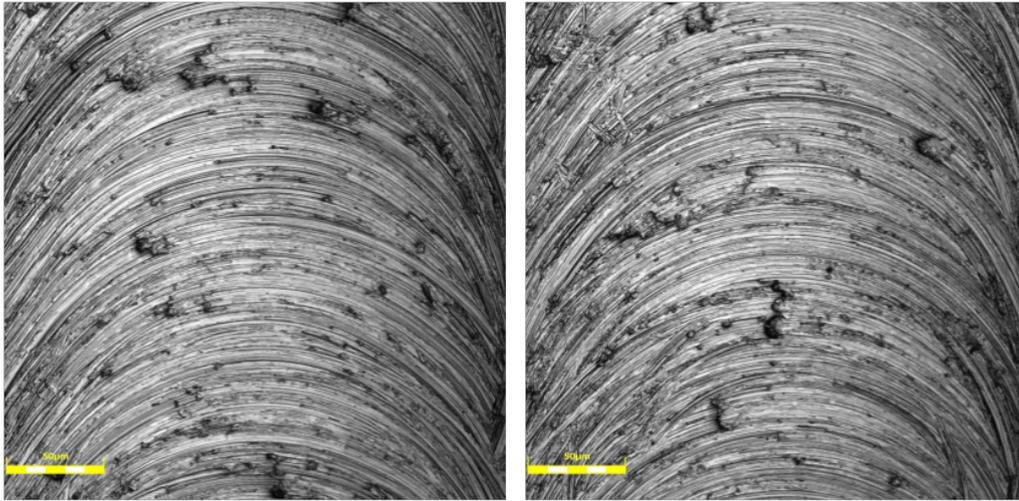


Figura 47 – Fundo dos canais 3 (esquerda) e 4 (direita) microusinados em uma liga Al 6101. Gerados por uma velocidade de rotação de 4000 rpm.

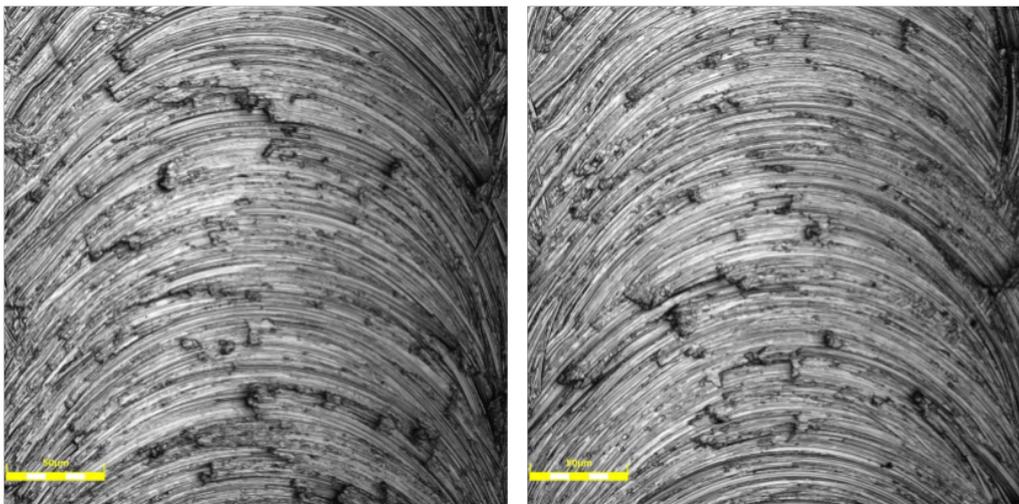


Figura 48 – Fundo dos canais 5 (esquerda) e 6 (direita) microusinados em uma liga Al 6101. Gerados por uma velocidade de rotação de 6000 rpm.

De acordo com a pesquisa de Uzun, Aslantas e Bedir (2013), a microferramenta pode manifestar uma ruptura em sua extremidade e um desgaste de flanco, os quais são apresentados na Figura 49, sendo apontado pelos pesquisadores como o tipo de desgaste preponderante em operações de microfresamento. Esse fenômeno pode ser interpretado como uma potencial correlação entre o desgaste e a qualidade do canal. Neste estudo, a realização desse tipo de observação foi inviabilizada, uma vez que o microscópio não demonstrou capacidade para focalizar a imagem da ferramenta, como se observa na Figura 50.

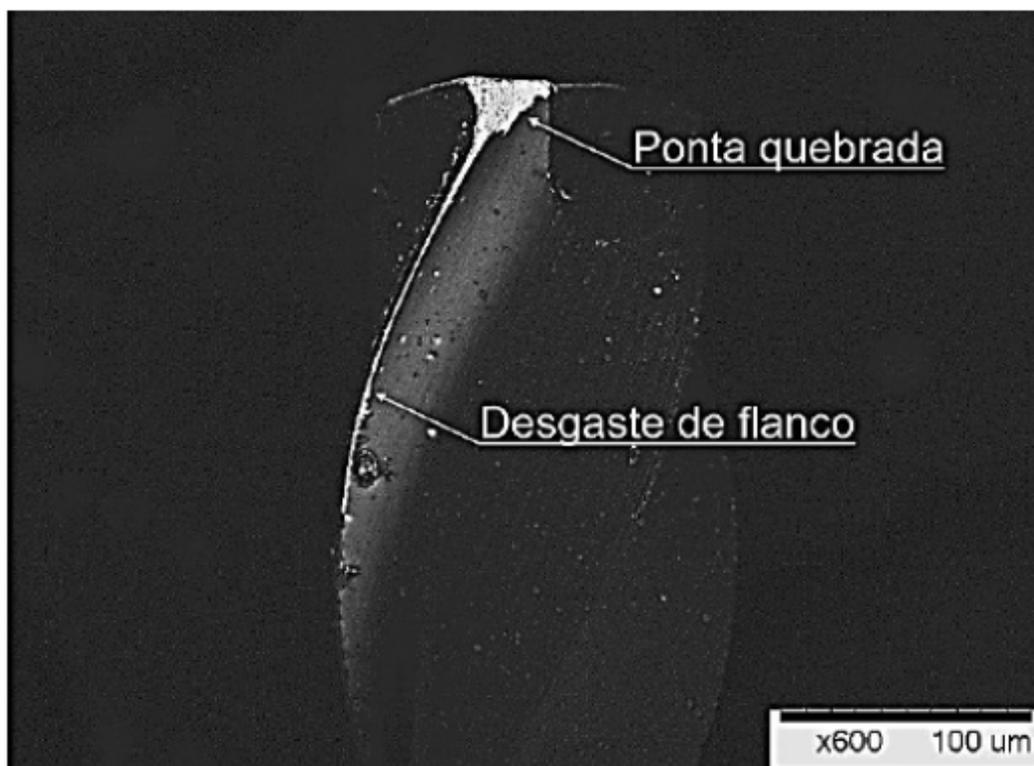


Figura 49 – Ponta quebrada e desgaste de flanco em uma microfresa (Adaptado de Ziberov (2018)).

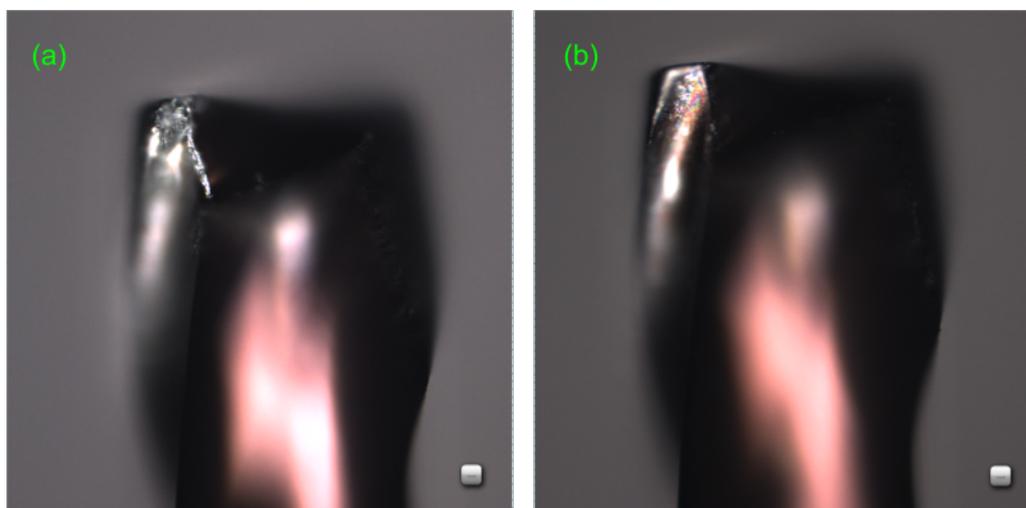


Figura 50 – (a) Desgastes da ponta e do flanco da aresta principal da microferramenta utilizada no ensaio. (b) Desgastes da ponta e do flanco da segunda aresta principal de corte microferramenta utilizada no ensaio.

Utilizando o método encontrado na Figura 36, foi possível obter a média de largura dos canais usinados. Portanto, ao se analisar o gráfico da Figura 51, que relaciona o diâmetro da microferramenta utilizada no ensaio e a média da largura de cada canal encontra-se valores de erros muito altos, onde alguns até ultrapassam o valor da média da largura do canal, como pode se observar na Tabela 7. O erro considerado foi de duas vezes

o desvio padrão. Nesse caso, os dados são inconclusivos, impossibilitando a mensuração do desgaste da ferramenta.

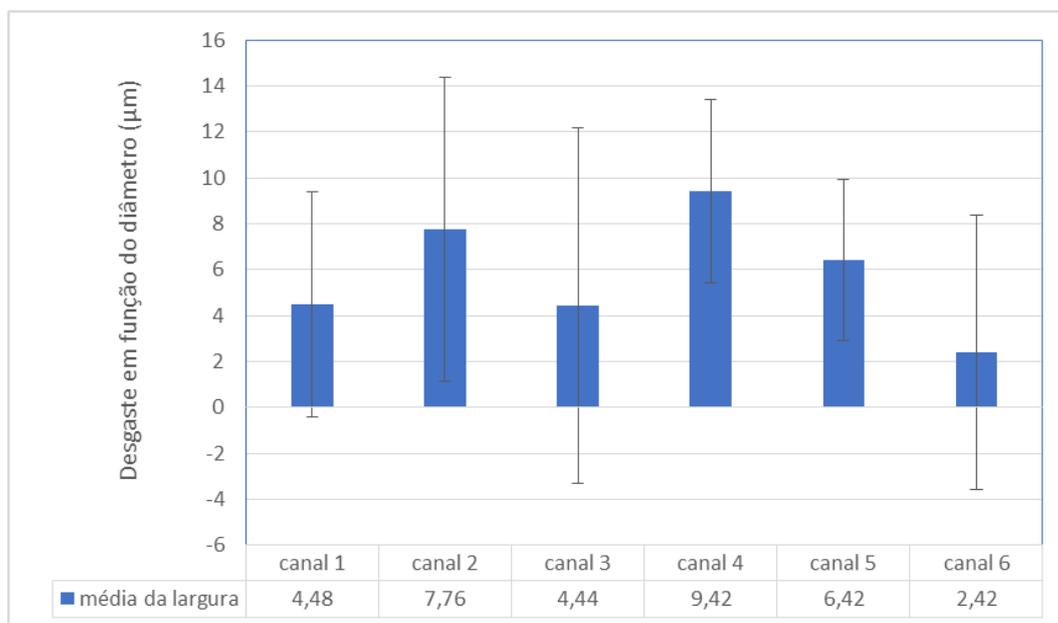


Figura 51 – Valores médios do desgaste em função do diâmetro da ferramenta.

Tabela 7 – Valores de desvio padrão do desgaste em função do diâmetro para cada canal usinado.

canal	desvio padrão (μm)
1	4,91
2	6,59
3	7,75
4	3,97
5	3,52
6	5,96

Fato se dá pois, como se observa na Figura 52, algumas áreas dos canais são ocupadas por rebarbas. Durante o processo de usinagem, algumas rebarbas se curvaram e se posicionaram logo acima do canal microusinado, chegando a ordem de $50 \mu m$. Para cálculo do desgaste da ferramenta, em função de porcentagem, por exemplo, se faz necessário a rebarbação dos canais, o que possibilitará obtenção de dados mais conclusivos.

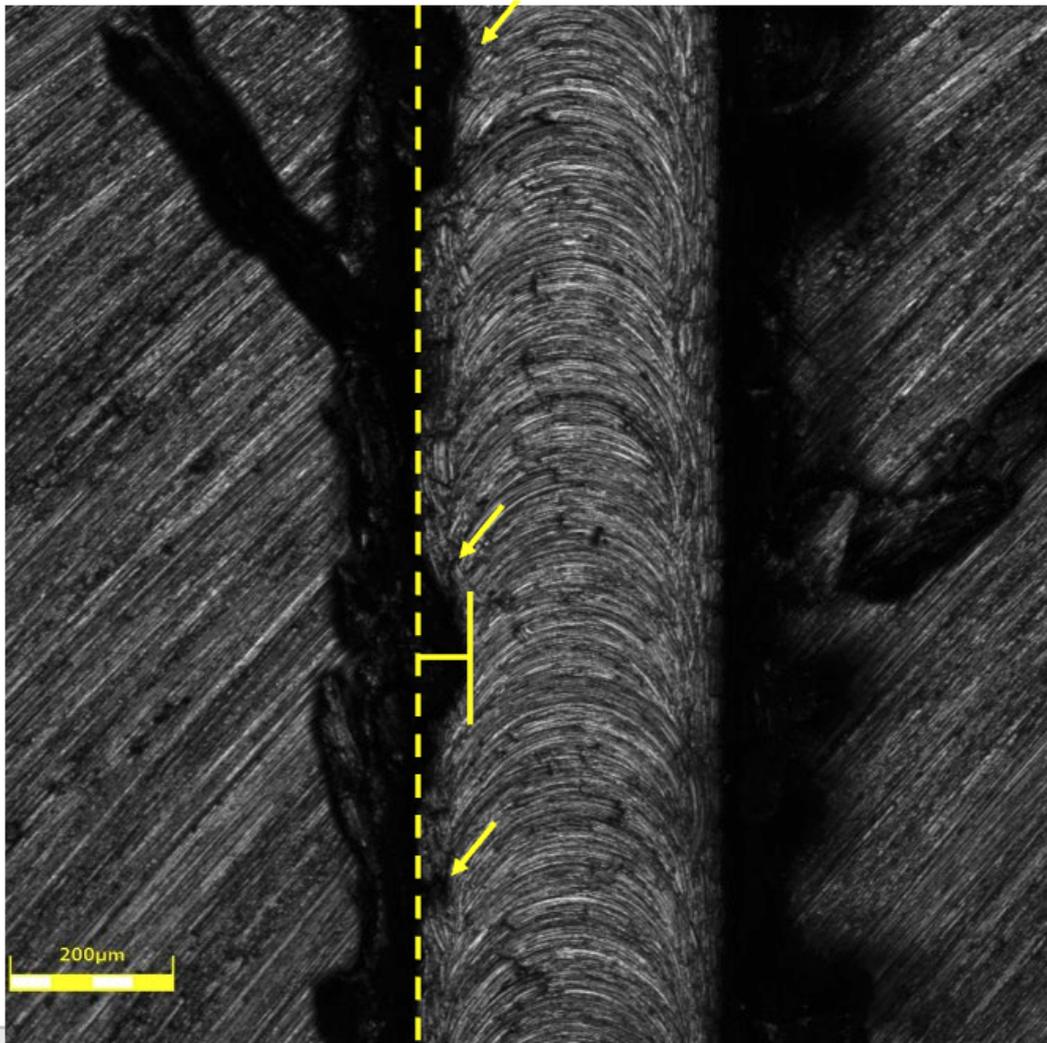


Figura 52 – Rebarbas curvadas sobre o canal microusinado

O trabalho de Mendonca (2022) seguiu-se similarmente a este, portanto, em seus ensaios, a autora fixou o valor da rotação em 6000 rpm e variou o valor do avanço para 4 pares de canais, sendo esses valores de 5, 10, 15 e 20 $\mu\text{m}/\text{dente}$. O primeiro par de canais usinados (1 e 2) foi submetido a uma velocidade de avanço (V_f) de 60 mm/min, um valor intermediário aos quais os dois primeiros pares de canais usinados deste trabalho foram submetidos, com valores de 40 mm/min e 80 mm/min. Ao se comparar os valores de rugosidade de ambos os trabalhos, encontra-se valores muito próximos, onde os maiores valores de R_a , R_q e R_t da pesquisa de Mendonca (2022) são: 0,204 μm ; 0,267 μm e 2,999 μm , respectivamente.

Para o par de canais 3 e 4, a autora adotou a velocidade de avanço (V_f) de 120 mm/min, parâmetro equivalente que os canais 5 e 6 deste trabalho foram submetidos. Os maiores valores de R_a , R_q e R_t encontrados no par por Mendonca (2022) foram: 0,448 μm ; 0,570 μm e 6,118 μm , respectivamente. Esses valores demonstram uma significativa disparidade em relação aos resultados obtidos neste experimento. A autora sugere a hipótese de que o desgaste da ferramenta se inicia na usinagem nos canais 3 e 4, o que pode explicar tal discrepância entre os valores de rugosidade encontrados no fundos dos canais

microfresados, mesmo parâmetros de corte semelhantes. Consequentemente, infere-se que, tal fato pode ser um indício de que a intensidade de 6000 rpm propicia um desgaste mais precoce da ferramenta.

4.2 Altura das rebarbas

As rebarbas provenientes do processo de microfresamento da liga de alumínio 6101 foram categorizadas em concordantes e discordantes, levando em consideração o lado de formação e o sentido de avanço adotado. Os resultados obtidos para as rebarbas concordantes e discordantes podem ser visualizados na Figura 53. A mensuração das rebarbas seguiu a abordagem metodológica proposta por de Oliveira et al. (2021), em que uma linha de referência foi posicionada de acordo com a superfície da amostra, juntamente com uma linha de medição, conforme ilustrado na Figura 36.

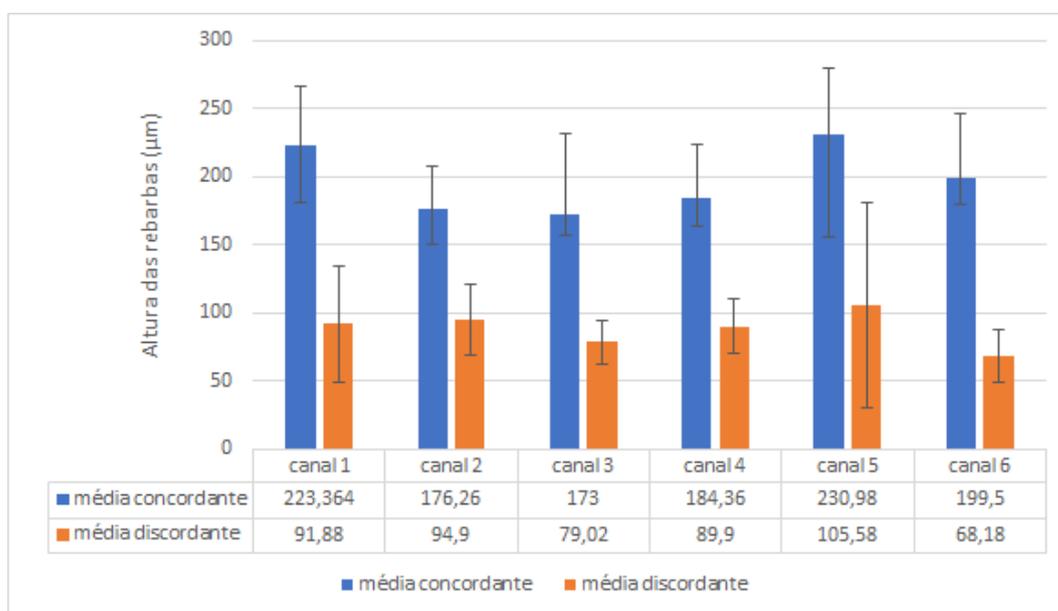


Figura 53 – Altura das rebarbas concordantes e discordantes para o microfresamento de uma liga de alumínio 6101.

Com isso, a análise revela que, no contexto do microfresamento, as dimensões médias das rebarbas para o lado concordante variaram entre aproximadamente 173,0 μm e 230,9 μm , enquanto para o lado discordante, a variação média foi de 68,1 μm a 105,6 μm . Essa constatação evidencia que as rebarbas de maiores dimensões são predominantes no lado concordante. Esse achado está em consonância com resultados apresentados nos estudos de Kiswanto, Zariatian e Ko (2014) e Kumar, Deb e Paul (2018).

De maneira geral, observou-se uma tendência para o canal 3 apresentar valores mais baixos de altura de rebarba, especialmente no que se refere às rebarbas do lado concordante, alcançando o valor de 173 μm . Em contraste, o canal 5 demonstrou os maiores valores de altura de rebarba, registrando 230,98 μm no lado concordante e 105,58 μm no

lado discordante. Os valores de desvio-padrão obtidos no contexto do presente trabalho foram elevados, assim indicados na Tabela 8, reflexo da irregularidade das características das rebarbas no processo de microfresamento.

Tabela 8 – Valores desvio padrão para a altura das rebarbas no lado concordante e no lado discordante.

canal	desvio padrão no lado concordante (μm)	desvio padrão no lado discordante (μm)
1	43,39	42,34
2	31,76	25,74
3	58,32	16,17
4	40,10	19,97
5	48,59	75,20
6	46,30	19,28

Santos (2016) conduziu um estudo de microfresamento em aço inoxidável Duplex S32205, empregando microferramentas de metal duro revestidas com nitreto de titânio e com um diâmetro de 381 μm . De forma notável, a autora observou que o desgaste da ferramenta não exerceu influência significativa sobre a altura das rebarbas, sendo que estas aumentaram de forma relevante apenas quando houve a quebra da microfresa. A pesquisadora identificou uma tendência de maior altura nas rebarbas do lado concordante, no entanto, os dados apresentaram considerável variabilidade nas leituras, evidenciando elevados valores de desvio padrão. A discrepância de altura entre os lados concordante e discordante, conforme apontado pela autora, pode ser atribuída à quantidade de material deslocada à frente da aresta de corte e na direção da força de corte, resultado da rotação da ferramenta.

5 Conclusões

Com base na revisão bibliográfica e nos resultados obtidos nos experimentos de microfresamento da liga Al 6101, é possível inferir que:

(i) Em relação à rugosidade:

- Como consequência do processo de microfresamento, foi observada a presença de materiais aderidos na parte inferior dos canais, sugerindo a possível existência da aresta postiça de corte (APC) na ferramenta.
- Analisando os canais de forma individual, o canal 2, usinado à rotação de 2000 rpm, possui os maiores valores de R_a e R_q , $0,289 \mu m$ e $0,361 \mu m$. O canal 3, submetido à rotação de 4000 rpm, possui o maior valor de R_t , sendo ele de $3,339 \mu m$.
- Ao se analisar a média de valores de rugosidade dos pares de canais, os quais foram submetidos à mesma velocidade de rotação, há uma mudança de comportamento. O par de canais 5 e 6, que foi submetido à velocidade de 6000 rpm, possui a maior média de R_a e R_q , sendo os valores de $0,280 \mu m$ e $0,347 \mu m$, respectivamente.
- Ainda analisando os pares, o maior valor da média da rugosidade R_t é do par 3 e 4, o qual foi submetido à velocidade de 4000 rpm, sendo ela de $2,756 \mu m$. Um valor muito próximo das outras médias desse mesmo parâmetro para os outros pares, cujos valores são: $2,731 \mu m$ para o par de canais 1 e 2 e, $2,665 \mu m$ para o par de canais 5 e 6.
- De maneira global, verificou-se que a velocidade de rotação de 4000 rpm proporcionou os menores valores de rugosidade para os canais usinados, indicando uma influência positiva dessa condição específica no processo de microfresamento.

(ii) Em relação às rebarbas:

- Conforme previsto na literatura, as rebarbas mais proeminentes do processo foram identificadas no lado concordante.
- Os valores máximos registrados para as rebarbas, tanto no lado concordante quanto discordante, foram de $230,98 \mu m$ e $105,58 \mu m$, respectivamente, sendo

notados no canal 5, o qual foi submetido a uma velocidade de rotação de 6000 rpm.

- Os microcanais exibiram rebarbas concordantes até 100% superiores em relação às discordantes, o que é esperado conforme o padrão antecipado pela direção de rotação da microferramenta durante o processo de corte.
- A alteração na geometria da ferramenta de corte, além da variação das velocidades de rotação, contribuem para a explicação dos valores encontrados. Além disso, é importante destacar que as ligas de alumínio, em geral, são caracterizadas por uma elevada ductilidade, fator que exerce influência na formação de rebarbas substanciais.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o propósito de aprofundar a pesquisa e complementar os resultados apresentados neste estudo, recomenda-se, como direção para trabalhos futuros:

- (i) Fazer rebarbação da peça antes de medir os valores médios da largura dos canais usinados.
- (ii) Adaptar a máquina-ferramenta, como a utilização de uma turbina, para viabilizar a repetição do experimento utilizando velocidades de corte mais elevadas.
- (iii) Realizar ensaios adicionais com diferentes configurações de rotação (como 1500, 3500 e 5500 rpm) e incrementar os valores de avanço para obter uma compreensão mais abrangente do impacto desses parâmetros no processo.

Referências

- ABENI, A.; LANCINI, M.; ATTANASIO, A. Characterization of machine tools and measurement system for micromilling. *Nanotechnology and Precision Engineering*, v. 2, n. 1, p. 23–28, 2019. ISSN 2589-5540. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.npe.2019.03.006>>. Citado na página 7.
- ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, v. 33, n. 4, p. 402–407, 2009. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.002>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 13 e 19.
- ARAUJO, A. C.; MOUGO, A. L.; CAMPOS, F. O. A study of the influence of the width of cut on micro milling aluminum alloy. In: *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas vi, 23 e 24.
- ARAUJO, M. L. *Influência do tempo de polimento na qualidade da rebarbação de microcanaís em Inconel 718*. 70 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2022. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/34760>>. Citado 3 vezes nas páginas vii, 33 e 34.
- ATTANASIO, A.; GELFI, M.; POLA, A.; CERETTI, E.; GIARDINI, C. Influence of material microstructures in micromilling of ti6al4v alloy. *Materials*, v. 6, n. 9, p. 4268–4283, 2013. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/6/9/4268>>. Citado na página 9.
- BALÁZS, B. Z.; GEIER, N.; TAKÁCS, M.; DAVIM, J. P. A review on micro-milling: recent advances and future trends. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 112, p. 655–684, 2021. Citado 4 vezes nas páginas v, vi, 13 e 14.
- BILLAT, S.; GLOSCH, H.; KUNZE, M.; HEDRICH, F.; FRECH, J.; AUBER, J.; SANDMAIER, H.; WIMMER, W.; LANG, W. Micromachined inclinometer with high sensitivity and very good stability. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 97-98, p. 125–130, 2002. ISSN 0924-4247. Selected papers from Eurosenors XV. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00824-X](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00824-X)>. Citado 2 vezes nas páginas v e 1.
- BISSACCO, G.; HANSEN, H.; De Chiffre, L. Size effects on surface generation in micro milling of hardened tool steel. *CIRP Annals*, v. 55, n. 1, p. 593–596, 2006. ISSN 0007-8506. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60490-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60490-9)>. Citado 3 vezes nas páginas vi, 18 e 19.
- BQL. *BIO 100E - Óleo Solúvel Sintético Biodegradável*. 2023. Disponível em: <<https://biolub.com.br/oleos-soluveis-sinteticos/bio-100e>>. Citado na página 28.
- 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://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.05.015>>. Citado 7 vezes nas páginas v, 1, 2, 8, 12, 14 e 18.

CHERN, G.-L.; WU, Y.-J. E.; CHENG, J.-C.; YAO, J.-C. Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-edm. *Precision Engineering*, v. 31, n. 2, p. 122–129, 2007. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2006.04.001>>. Citado 4 vezes nas páginas vi, 14, 15 e 16.

COLPANI, A.; FIORENTINO, A.; CERETTI, E.; ATTANASIO, A. Tool wear analysis in micromilling of titanium alloy. *Precision Engineering*, v. 57, p. 83–94, 2019. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.03.011>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 18.

CÂMARA, M.; RUBIO, J. C.; ABRÃO, A.; DAVIM, J. State of the art on micromilling of materials, a review. *Journal of Materials Science Technology*, v. 28, n. 8, p. 673–685, 2012. ISSN 1005-0302. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60115-7](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60115-7)>. Citado 3 vezes nas páginas v, 10 e 11.

de Oliveira, D.; GOMES, M. C.; de Oliveira, G. V.; dos Santos, A. G.; da Silva, M. B. Experimental and computational contribution to chip geometry evaluation when micro-milling inconel 718. *Wear*, v. 476, p. 203658, 2021. ISSN 0043-1648. 23rd International Conference on Wear of Materials. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203658>>. Citado 4 vezes nas páginas v, 2, 31 e 47.

DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y. Recent advances in mechanical micromachining. *CIRP Annals*, v. 55, n. 2, p. 745–768, 2006. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.006>>. Citado 6 vezes nas páginas v, vi, 4, 5, 12 e 20.

FILIZ, S.; XIE, L.; WEISS, L. E.; OZDOGANLAR, O. Micromilling of microbarbs for medical implants. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 48, n. 3, p. 459–472, 2008. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2007.08.020>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 9.

Império dos Metais. *Alumínio 6101*. 2022. Disponível em: <<https://www.imperiodosmetais.com.br/aluminio>>. Citado na página 25.

JAIN, V. Editorial by v. k. jain, i.i.t. kanpur (india) for the special issue on ‘micromanufacturing’. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 76, p. 1–3, 01 2014. Citado na página 4.

JING, X.; LI, H.; WANG, J.; YUAN, Y.; ZHANG, D.; KWOK, N.; NGUYEN, T. An investigation of surface roughness in micro-end-milling of metals. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, p. 1–9, 07 2016. Citado 7 vezes nas páginas vi, vii, 20, 21, 22, 39 e 40.

KAUFMAN, J. G. *Introduction to aluminum alloys and tempers*. [S.l.]: ASM international, 2000. Citado na página 23.

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://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.05.003>>. Citado 3 vezes nas páginas vi, 23 e 47.

KOMATSU, T.; YOSHINO, T.; MATSUMURA, T.; TORIZUKA, S. Effect of crystal grain size in stainless steel on cutting process in micromilling. *Procedia CIRP*, v. 1, p. 150–155, 2012. ISSN 2212-8271. Fifth CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.026>>. Citado na página 19.

KOU YI WAN, Y. C. X. L. Z.; LIU, Z. Burr controlling in micro milling with supporting material method. *Procedia Manufacturing*, v. 1, n. 8, p. 501–511, 2015. ISSN 1005-0302. Disponível em: <<https://doi.org/j.promfg.2015.09.015>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 14.

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: . [S.l.: s.n.], 2018. p. V004T03A014. Citado na página 47.

KUMAR, S.; JAYARAJ, J.; KUMANAN, S.; PRABAKARAN, R. A review on current research aspects in tool-based micromachining processes. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 29, 12 2014. Citado na página 4.

MACHADO, A.; ABRAO, A.; SILVA, M. da; COELHO, R. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Sao Paulo: Edgard Blucher, 2009. Citado na página 22.

MALCHER, L.; MORALES, L.; RODRIGUES, V.; SILVA, V.; ARAÚJO, L.; FERREIRA, G.; NEVES, R. Experimental program and numerical assessment for determination of stress triaxiality and J_3 effects on aa6101-t4. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v. 106, p. 102476, 2020. ISSN 0167-8442. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102476>>. Citado na página 25.

MARTINS, W. *Soldagem do Alumínio e suas Ligas*. [S.l.]: Praxair INC, 2002. Citado na página 22.

MASUZAWA, T. State of the art of micromachining. *CIRP Annals*, v. 49, n. 2, p. 473–488, 2000. ISSN 0007-8506. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63451-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63451-9)>. Citado 5 vezes nas páginas v, 1, 5, 6 e 7.

MENDONCA, G. D. *Análise da influência do avanço no microfresamento da liga Al6101 T6 através da qualidade superficial dos canais*. 83 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2022. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/34742>>. Citado na página 46.

MIN, S.; DORNFELD, D.; INASAKI, I.; OHMORI, H.; LEE, D.; DEICHMUELLER, M.; YASUDA, T.; NIWA, K. Variation in machinability of single crystal materials in micromachining. *CIRP Annals*, v. 55, n. 1, p. 103–106, 2006. ISSN 0007-8506. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60376-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60376-X)>. Citado 3 vezes nas páginas vi, 16 e 17.

MITSUBISHI. *Solid End Mills*. 2023. Disponível em: <https://www.mitsubishicarbide.net/webcatalog/OMB07F001BLogic.do?mkt_rykshu=mht&gng_rykshu=enuk&ctgr_rykshu=solid_end_mills&ybkgu=MS2MSD0040&zish_mi=&sihn_id=20060775&srs_id=10000222&hskzi_ini=&tlng_sht_disp_flg=1>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 27.

MUHAMMAD, A.; GUPTA, M. K.; MIKOŁAJCZYK, T.; PIMENOV, D. Y.; GIASIN, K. Effect of tool coating and cutting parameters on surface roughness and burr formation during micromilling of inconel 718. *Metals*, v. 11, n. 1, 2021. ISSN 2075-4701. Disponível

em: <<https://www.mdpi.com/2075-4701/11/1/167>>. Citado 3 vezes nas páginas vi, 17 e 20.

MUKHIYA, R.; SANTOSH, M.; SHARMA, A.; Santosh Kumar, S.; BOSE, S.; GOPAL, R.; PANT, B. Fabrication and characterization of a bulk micromachined polysilicon piezo-resistive accelerometer. *Materials Today: Proceedings*, v. 48, p. 619–621, 2022. ISSN 2214-7853. International Conference on Advances in Nanomaterials and Devices for Energy and Environment. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.588>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 6.

MURAKAMI, Y.; IDEGAMI, K.; NAGAI, H.; KIKUCHI, T.; MORITA, Y.; YAMAMURA, A.; YOKOYAMA, K.; TAMIYA, E. Application of micromachine techniques to biotechnological research. *Materials Science and Engineering: C*, v. 12, n. 1, p. 67–70, 2000. ISSN 0928-4931. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0928-4931\(00\)00160-0](https://doi.org/10.1016/S0928-4931(00)00160-0)>. Citado 2 vezes nas páginas v e 1.

OLIAEI, S. N. B.; KARPAT, Y. Built-up edge effects on process outputs of titanium alloy micro milling. *Precision Engineering*, v. 49, p. 305–315, 2017. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.02.019>>. Citado 3 vezes nas páginas vii, 40 e 41.

RODRIGUES, L. D. S.; ALMEIDA, J. A. de; SOUZA, C. R. de; LEÃO, R. M. Propriedades mecânicas da liga de alumínio al-6063 tratada termicamente. *CONTECC - Congresso Técnico-científico da Engenharia e da Agronomia*, 2021. Disponível em: <<https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/Contecc2021/Mec%C3%A2nica%20e%20Metal%C3%BArgica/PROPRIEDADES%20MEC%C3%82NICAS%20DA%20LIGA%20DE%20ALUM%C3%8DNIO%20AL-6063%20TRATADA%20TERMICAMENTE.pdf>>. Citado na página 22.

SANTOS, A. G. dos. *Microfresamento de aço inoxidável duplex UNS S32205 com ferramentas de metal duro revestidas com nitreto de titânio*. Monografia (Dissertação (Mestrado em Engenharias)) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15018>>. Citado na página 48.

SILVA, G. de P. *Influência das rebarbas e métodos derebarbação na medição de desgaste emmicrocanaís de Inconel 718*. 85 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2021. Citado 2 vezes nas páginas vii e 31.

STOJANOVIC, B.; BUKVIC, ; EPLER, I. Application of aluminum and aluminum alloys in engineering. *Applied Engineering Letters: Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018. Citado na página 23.

SUN, Q.; CHENG, X.; LIU, Y.; YANG, X.; LI, Y. Modeling and simulation for micromilling mechanisms. *Procedia Engineering*, v. 174, p. 760–766, 2017. ISSN 1877-7058. 13th Global Congress on Manufacturing and Management Zhengzhou, China 28-30 November, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.219>>. Citado na página 17.

TODHUNTER, L.; LEACH, R.; LAWES, S.; BLATEYRON, F. Industrial survey of iso surface texture parameters. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 19, p. 84–92, 2017. ISSN 1755-5817. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.06.001>>. Citado 3 vezes nas páginas vii, 32 e 33.

UCUN İrfan; ASLANTAS, K.; BEDIR, F. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of inconel 718 super alloy. *Wear*, v. 300, n. 1, p. 8–19, 2013. ISSN 0043-1648. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.103>>. Citado na página 43.

WANG, F.; CHENG, X.; LIU, Y.; YANG, X.; MENG, F. Micromilling simulation for the hard-to-cut material. *Procedia Engineering*, v. 174, p. 693–699, 2017. ISSN 1877-7058. 13th Global Congress on Manufacturing and Management Zhengzhou, China 28-30 November, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.209>>. Citado na página 10.

WANG, F.; CHENG, X.; ZHENG, G.; YANG, X.; GUO, Q.; SUN, Q. Study of micromilling parameters and processes for thin wall fabrications. *Precision Engineering*, v. 56, p. 246–254, 2019. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.12.005>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 10.

ZIBEROV, M. *Microfresamento da liga Ti-6Al-4V com microferramentas com diferentes revestimentos e aplicação de MQL*. Monografia (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.772>>. Citado 4 vezes nas páginas vii, 41, 42 e 44.

ZIBEROV, M.; SILVA, M. B. da; JACKSON, M.; HUNG, W. N. Effect of cutting fluid on micromilling of ti-6al-4v titanium alloy. *Procedia Manufacturing*, v. 5, p. 332–347, 2016. ISSN 2351-9789. 44th North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 44, June 27-July 1, 2016, Blacksburg, Virginia, United States. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.029>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 8.

Anexo

A Especificações da Máquina CNC (VEGA XH7132)

SPECIFICATION

Model	XH7132
Table size	920x320 mm
Table travel (X, Y, Z)	620x350x500 mm
T-slot(number-width-distance)	3/14/85 mm
Distance from spindle end to table top	100-600 mm
Distance from spindle center to column guide way	395 mm
Spindle taper	BT40
Spindle speed range	60-6000 r/min
Rapid feed speed (X,Y,Z)	18000 mm/min
Feed Speed (X, Y, Z)	2.5 – 3000 mm/min
Tool magazine Capability	16 qty
Max. dimension of tool	Ø 120 x 200 mm
Max. weight of tool	8 kg.
Positioning accuracy	± 0.015
Repeat Positioning accuracy	± 0.0075
Main motor (spindle)	3.7kw
Feed motor	1.2kw
Cooling pump	0.1KW
CNC System	Fanuc Oi Mate – MD
Overall dimension (LxWxH)	2050 × 1870 × 2170 mm
Machine Weight	2540 kg.

STANDARD ACCESSORIES:

- Fanuc Oi Mate-MD
- Spanner
- Wrench
- Adjusting Screw
- Sizing block

OPTIONAL ACCESSORIES

- Siemens 02C or KND 1000I CNC system
- Assemble A axis

Machine Tools Traders (Mudras)