CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE APLICADOS À MICROUSINAGEM DA LIGA AA2024

Rafael da Cunha Hamano

Tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais (PPEMM), do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais

Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa, D. Sc
Coorientadora: Tatiane de Campos Chuvas, D. Sc

Rio de Janeiro
Junho de 2025

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE APLICADOS À MICROUSINAGEM DA LIGA AA2024

Proposta de Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais (PPEMM), do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais

Rafael da Cunha Hamano

Documento assinado digitalmente
gov.br
RAFAEL DA CUNHA HAMANO
Data: 23/07/2025 08:55:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Banca Examinadora:

_____

Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc (CEFET/RJ)

_____

Tatiane de Campos Chuvas, D. Sc(CEFET/RJ)

_____

Humberto Nogueira Farneze, D. Sc(CEFET/RJ)

_____

Matheus Campolina Mendes, D.Sc(CEFET/RJ)

_____

José Luis Lopes da Silveira, D.Sc (UFRJ)

_____

Maria da Penha Cindra Fonseca, D.Sc (UFF)

Rio de Janeiro
Junho de 2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

H198 Hamano, Rafael da Cunha
Influência dos parâmetros de corte aplicados à microusinagem da liga AA2024 / Rafael da Cunha Hamano. — 2025.
xii, 120f. : il. color. , enc.

Tese (Doutorado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia : f. 107-120
Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa
Coorientadora: Tatiane de Campos Chuvas

1. Usinagem. 2. Aspereza de superfície. 3. Ligas de alumínio. 4. Microusinagem. 5. Metais. I. Costa, Hector Reynaldo Meneses. (Orient.). II. Chuvas, Tatiane de Campos (Coorient.) III. Título.

CDD 671.35

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos meus orientadores, Professora Tatiane de Campos Chuvas e Professor Hector Reynaldo Meneses Costa, pela dedicação, paciência e constante disponibilidade ao longo das diversas etapas desta pesquisa, especialmente diante dos desafios enfrentados. Seus contínuos incentivos foram fundamentais para promover meu desenvolvimento científico.

Agradeço também aos professores José Luis da Silveira e Karen Johanna Quintana Cuellar pela receptividade e gentileza com que me receberam no Centro de Estudos em Fabricação e Comando Numérico (CEFCON - UFRJ), pela paciência e pela disponibilidade em abrir as portas do laboratório para a utilização da microfresadora.

Estendo meus agradecimentos à equipe técnica e aos professores do Laboratório Multiusuário de Nanofabricação e Caracterização de Nanomateriais (NANOFAB - UERJ), pela realização criteriosa das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura, fundamentais para o desenvolvimento e a validação dos resultados obtidos neste estudo.

Ao Professor Matheus Campolina Mendes (LAMAT-CEFET), expresso minha gratidão pela realização das análises por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), cujos resultados foram essenciais para identificar e compreender os efeitos decorrentes da elevação de temperatura na superfície das amostras.

Expresso minha gratidão à minha família e amigos pelo constante apoio, incentivo e confiança ao longo de toda essa jornada. A paciência, a compreensão e o carinho dedicados por eles foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios que surgiram ao longo deste percurso e concluir esta etapa importante em minha vida acadêmica e pessoal.

RESUMO

O microfresamento é um processo essencial na manufatura de alta precisão, com grande potencial de aplicação na usinagem de componentes miniaturizados em ligas metálicas avançadas, como a liga de alumínio AA2024, amplamente utilizada na indústria aeronáutica. Apesar de seu potencial, o microfresamento ainda é pouco explorado industrialmente devido às dificuldades inerentes à microfabricação, especialmente à ausência de diretrizes bem estabelecidas quanto à seleção adequada dos parâmetros de corte. Equações e modelos empregados na usinagem convencional não se aplicam diretamente à escala micrométrica, pois não consideram fenômenos específicos dessa escala, como o efeito *plowing*, em que o material é deformado plasticamente sem ser efetivamente removido, comprometendo a qualidade superficial e a precisão dimensional da peça. Além disso, a literatura ainda carece de dados experimentais sistemáticos que orientem a definição de parâmetros operacionais eficientes em microfresamento. Este estudo investiga a influência dos parâmetros de corte – profundidade de corte, velocidade de corte e velocidade de avanço – na rugosidade superficial, na formação de rebarbas e nas forças de usinagem durante o microfresamento da liga AA2024, utilizando uma ferramenta de 0,8 mm de diâmetro revestida com nitreto de alumínio titânio (TiAlN). A pesquisa enfatiza o comportamento das forças de corte sob diferentes condições operacionais, com foco no efeito *plowing* e suas implicações sobre a integridade superficial. Os resultados experimentais demonstraram que o aumento da profundidade de corte de 0,10 mm para 0,15 mm contribui para a melhora da rugosidade superficial, efeito atribuído à redução da predominância do *plowing*, principalmente em condições nas quais a espessura mínima do cavaco se aproxima do limite não removido. Análises por microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV) evidenciaram a presença de óxidos de alumínio sobre o microcanal usinado, indicando aumento localizado da temperatura associado à deformação plástica excessiva. Esses achados reforçam a importância da seleção criteriosa dos parâmetros de corte para minimizar defeitos superficiais, otimizar a eficiência do processo e viabilizar a produção de componentes miniaturizados com alto desempenho e qualidade, alinhados às rigorosas exigências da indústria aeronáutica.

Palavras-chave: Usinagem de precisão, Microfresamento, Rugosidade superficial, Formação de rebarbas, Liga de alumínio

ABSTRACT

Micro-milling is an essential process in high-precision manufacturing, with significant potential for machining miniaturized components made from advanced metallic alloys such as the AA2024 aluminum alloy, widely used in the aerospace industry. Despite its potential, micro-milling remains underutilized in industrial settings due to the inherent challenges of microfabrication, particularly the lack of well-established guidelines for the appropriate selection of cutting parameters. Equations and models developed for conventional machining are not directly applicable at the microscale, as they do not account for specific phenomena at this scale, such as the plowing effect, in which the material is plastically deformed without being effectively removed, compromising surface quality and dimensional accuracy. Furthermore, the literature still lacks systematic experimental data to support the definition of efficient operational parameters in micro-milling. This study investigates the influence of cutting parameters—depth of cut, cutting speed, and feed rate—on surface roughness, burr formation, and cutting forces during the micro-milling of AA2024 alloy, using a 0.8 mm diameter tool coated with Aluminum Titanium Nitride (TiAlN). The research emphasizes the behavior of cutting forces under different operating conditions, with a focus on the plowing effect and its implications for surface integrity. Experimental results showed that increasing the depth of cut from 0.10 mm to 0.15 mm contributed to improved surface roughness, an effect attributed to the reduced predominance of plowing, particularly under conditions where the minimum uncut chip thickness approaches the non-removal threshold. Optical and scanning electron microscopy (SEM) analyses revealed the presence of aluminum oxides on the machined microchannel, indicating localized temperature rise associated with excessive plastic deformation. These findings reinforce the importance of careful selection of cutting parameters to minimize surface defects, optimize process efficiency, and enable the production of high-performance miniaturized components that meet the stringent requirements of the aerospace industry.

Keywords: Precision machining, Micro-milling, Surface roughness, Burr formation, Aluminum alloy

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: (a) Fresamento concordante e (b) fresamento discordante [22] 5
Figura 2.2: Representação do formato do cavaco no fresamento de topo [22]. 6
Figura 2.3: Principais aspectos a se considerar no microfresamento [35]. 8
Figura 2.4: Exemplo de microfresadora (adaptado de [37]). 9
Figura 2.5: Região de formação do cavaco. Fonte: O autor. 15
Figura 2.6: Morfologia do cavaco formado durante o microfresamento usando microfresa de topo produzida por cermet à base de Ti(C7N3), com avanços por dente: (a) f = 0,5 m/z; (b) f = 1 m/z; (c) f = 1,5 m/z; (d) f = 2 m/z [16]. 19
Figura 2.7: Geometrias dos cortes ortogonal e oblíquo [22]. 22
Figura 2.8: Represetatação dos ângulos de entrada e saída [63] 24
Figura 2.9: Principais classificações das rebarbas encontradas no fresamento [67]. 30
Figura 2.10: Representação esquemática dos principais parâmetros de rugosidade: Ra, Rt e Rz. 32
Figura 2.11: Diagrama do sistema binário Al-Cu [192] 47
Figura 3.1: Microestrutura da Liga AA2024, com aumento de 100x. 51
Figura 3.2: Microfresadora CNC Mini- Mill/GX (CEFCON) 53
Figura 3.3: Montagem da amostra sobre o dinamômetro, unidade: mm 56
Figura 3.4: Montagem da amostra sobre o dinamômetro 57
Figura 4.1: Dimensões da microfresa, unidade: mm [142] 62
Figura 4.2: EDS realizado na microfresa diâmetro de 0.8 mm. 63
Figura 4.3: Medição do raio de ponta na ferramenta de 0.8mm 65
Figura 4.4: Ampliação das Forças de Usinagem 66
Figura 4.5: Forças de Usinagem em função de diferentes velocidades de avanço. 67
Figura 4.6: Forças de Usinagem em função da profundidade de corte. 70
Figura 4.7: Forças de Usinagem em função da rotação do eixo-árvore. 72
Figura 4.8: Explicação sobre a localização da aquisição das imagens das rebarbas de topo, de acordo com seu posicionamento. 76
Figura 4.9: MEV exibindo a superfície usinada para diferentes velocidades de avanço. 78
Figura 4.10: MEV exibindo as rebarbas para diferentes profundidades de corte. 80
Figura 4.11: MEV cexibindo as rebarbas para diferentes rotações do eixo-árvore. 82
Figura 4.12: Rugosidade em função das velocidades de avanço. 84
Figura 4.13: MO (aumento de 100x) mostrando os microcanais em diferentes velocidades de avanço, ilustrando o acabamento superficial. 86
Figura 4.14: MEV realizado na região dos óxidos (a) Imagem com aumento de 1000x, demonstrando adesão de cavaco sobre a superfície (b) Nódulos de óxido de alumínio. 89
Figura 4.15: EDS da amostra usinada. (a) Região sobre marcas de usinagem (b) Região sobre nódulos de óxido. 92
Figura 4.16: Rugosidade em função da profundidade de corte. 94
Figura 4.17: Imagens de microscopia óptica (aumento de 100x) mostrando os microcanais em diferentes profundidades de corte, ilustrando o acabamento superficial. (a) 0,10 mm, (b) 0,12 mm, (c) 0,15 mm. 95
Figura 4.18: Rugosidade em função da rotação. 97
Figura 4.19: MO óptica (aumento de 100x) dos microcanais em diferentes rotações. 99
Figura 4.20: MEV (aumento de 500x) dos cavacos, comparando a morfologia para diferentes velocidades de avanço. 101
Figura 4.21: MEV do cavaco obtido sob condição de efeito *plowing*, aumento de 2500x... 103

Figura 4.22: MEV dos cavacos, (500x), comparando a morfologias para diferentes profundidades de corte.....105
Figura 4.23: MEV dos cavacos, (500x), comparando a morfologia para diferentes rotações. 107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Principal composicão das ligas de alumínio trabalháveis [132]. 38
Tabela 2.2: Principal composição das ligas fundidas [132] 40
Tabela 2.3: Nomeclatura para Tratamentos térmicos [132] 41
Tabela 2.4: Nomeclatura utilizada para Ligas com TT por Solubilização [132]. 42
Tabela 2.5: Designação das Ligas que passaram por TT após Processo de Fabricação [132]. 44
Tabela 2.6: Designação adicional para Ligas que passaram por TT após Processo de Fabricação [132]. 44
Tabela 3.1: Tabela de composição química. 50
Tabela 3.2: Composição química padrão da liga de alumínio AA2024 (em % em peso), conforme especificado pela norma ASTM B209 50
Tabela 3.3: Perfil de microdureza Vickers. 52
Tabela 3.4: Parâmetros de corte. 58

LISTA DE ABREVIATURAS

AISI - Sistema americano para a classificação dos aços (*American Iron and Steel Institute*)

SAE – *Society of Automotive Engineers*

vc – velocidade de corte [m/min]

n – número de rotações por minuto [RPM]

vf – velocidade de avanço [mm/min]

ve – velocidade efetiva de corte [m/min]

VB – desgaste de flanco [mm]

VB_{max} – desgaste de flanco máximo [mm]

fz – avanço por dente [mm/z]

f – avanço [mm/rev ou mm/min, conforme o contexto]

ap – profundidade de corte [mm]

ae – profundidade de penetração [mm]

xr – ângulo de posição [graus (°)]

TTAT – Tratamento de Alívio de Tensões

tc – tempo de corte [s]

Lf – percurso de avanço [mm]

MQL – *Minimum Quantity Lubrication* ou Mínima Quantidade de Lubrificante

Ra – rugosidade superficial média [µm]

ε – raio da ponta da ferramenta [mm]

SUMÁRIO

.....i
LISTA DE FIGURAS.....vii
LISTA DE TABELAS.....ix
SUMÁRIO.....xi
1. Introdução.....1
2. Revisão Bibliográfica.....3
2.1. Usinagem.....3
2.2. Microusinagem.....6
2.2.1. Máquinas e Ferramentas para Microusinagem.....8
2.2.2. Efeitos de Escala e Espessura Mínima de Corte.....11
2.2.3. Parâmetros de corte aplicados ao microfresamento.....16
2.2.4. Morfologia do cavaco no microfresamento.....18
2.2.5. Força de Usinagem.....20
2.2.6. Microusinagem de AA2024.....25
2.3. Integridade Superficial.....27
2.3.1. Formação de Rebarba.....28
2.3.2. Principais Parâmetros de Rugosidade.....31
2.3.3. Rugosidade produzidas através da microusinagem.....33
2.4. Corrosão em ligas de Alumínio.....34
2.5. Monitoramento dos processos de microusinagem.....35
2.6. Alumínio e suas Ligas.....37
2.6.1. Tratamentos térmicos.....40
2.7. Liga de Alumínio AA2024.....45
3. Materiais e Métodos.....49
3.1. Material da Amostra.....49
3.2. Microdureza Vickers (HV).....51
3.3. Ensaios de Microusinagem.....52
3.4. Ferramenta de Corte.....57
3.5. Parâmetros de corte utilizados.....58
3.6. Integridade Superficial.....59
3.6.1. Análise de Rugosidade.....59
3.6.2. Formação de Rebarbas.....60
3.7. Ensaio de Microdureza Vickers.....60
4. Resultados e Discussão.....62

4.1. Ferramenta de Corte 62
4.2. Forças de Usinagem 65
4.2.1. Forças de usinagem com diferentes velocidades de avanço 66
4.2.2. Forças de usinagem em função da profundidade de corte 69
4.2.3. Forças de usinagem em função das diferentes velocidades de rotação 71
4.3. Integridade Superficial 73
4.3.1. Rebarbas de Topo 75
4.3.1. Formação de Rebarbas de Topo em Função de Diferentes Velocidades de Avanço 76
4.3.2. Formação de Rebarbas de Topo em Função de Diferentes Profundidades de Corte 79
4.3.3. Formação de Rebarbas de Topo em Função de Diferentes Velocidades de Corte 81
4.4. Rugosidade da Superfície 83
4.4.1. Efeitos das Velocidades de Avanço na Rugosidade da Superfície 83
4.4.2. Efeitos da profundidade de corte na rugosidade da superfície 93
4.4.3. Efeitos da rotação na rugosidade da superfície 96
4.5. Morfologia do Cavaco 100
4.5.1. Morfologia dos cavacos em função de diferentes velocidades de avanço 100
4.5.2. Morfologia dos cavacos em função de diferentes profundidades de corte 104
4.5.3. Morfologia dos cavacos em função de diferentes rotações do eixo-árvore 106
5. Conclusões 109
6. Propostas de trabalhos futuros 110

1. Introdução

A miniaturização de componentes dotados de geometrias complexas exige precisão geométrica excepcional e qualidade superficial superior, requisitos frequentemente alcançados por meio das tecnologias envolvidas na microusinagem [1]. Nas últimas décadas, a demanda crescente por peças e dispositivos miniaturizados tem sido impulsionada, sobretudo, pelos avanços tecnológicos observados nas indústrias aeroespacial, automobilística e médica [2, 3]. Contudo, o processo de fabricação desses componentes impõe desafios específicos que vão além daqueles comumente enfrentados na usinagem convencional, principalmente porque fenômenos considerados desprezíveis em macroescala passam a desempenhar um papel crucial em microescala, podendo afetar diretamente a integridade superficial das peças e inviabilizar sua aplicação prática [4, 5].

Não há consenso absoluto sobre o limite exato que separa a usinagem convencional (macro) da microusinagem. Geralmente, considera-se como parâmetro principal as dimensões da ferramenta de corte utilizada, que variam entre 1 e 1000 µm de diâmetro na escala micro. Outra perspectiva adotada para essa definição baseia-se na espessura mínima do cavaco não removido, variando desde alguns nanômetros até centenas de micrômetros. Essas reduções dimensionais acarretam o fenômeno conhecido como “efeito escala”, que engloba diversos mecanismos físicos, térmicos e mecânicos cujo impacto passa a ser predominante, demandando investigação específica sobre seus efeitos na qualidade e integridade da peça usinada [6-8].

A versatilidade do alumínio e suas ligas na indústria metalmecânica deve-se, em grande parte, às propriedades mecânicas ajustáveis através da adição estratégica de elementos de liga e dos tratamentos térmicos subsequentes. Dentre essas ligas, a AA2024 é amplamente reconhecida pela sua notável aplicação na indústria aeronáutica, destacando-se especialmente na construção de estruturas externas e componentes estruturais críticos das aeronaves. Tal relevância técnica decorre de suas propriedades específicas, como a excelente relação resistência mecânica/peso, elevada tenacidade à fratura e resistência à fadiga. Além disso, essa liga forma naturalmente uma camada passivadora de óxido com espessura da ordem de 2 a 10nm, que oferece proteção contra agentes oxidantes em condições ambientais normais [9-12].

Contudo, apesar dessa camada protetora, a liga AA2024 é susceptível a determinados tipos de corrosão quando exposta a condições ambientais severas ou quando submetida a processos inadequados durante sua fabricação e tratamento térmico. A precipitação da fase $CuAl_2$ durante o tratamento térmico de solubilização, por exemplo, pode provocar

empobrecimento de cobre em regiões adjacentes aos contornos de grão, transformando essas regiões em zonas preferenciais para ataques corrosivos intergranulares. Tais mecanismos demandam uma rigorosa atenção no controle dos processos de fabricação, particularmente em procedimentos envolvendo usinagem, visando garantir a integridade estrutural e a longevidade dos componentes produzidos [13-15].

Embora seja amplamente empregada na indústria aeronáutica, poucos estudos têm investigado detalhadamente o comportamento da liga AA2024 durante processos específicos de microusinagem. Dentre as raras pesquisas disponíveis na literatura, destaca-se o trabalho realizado por Xu *et al.* [16] que exploraram a formação de rebarbas na microusinagem dessa liga utilizando ferramentas de compósito formado por combinação de cerâmica com metal (cermet). No entanto, aspectos críticos relacionados à formação de cavacos em regimes críticos (onde o efeito *plowing* se manifesta) e a influência dos parâmetros operacionais sobre as forças de corte ainda carecem de maior aprofundamento científico. O efeito *plowing*, particularmente crítico na microusinagem, ocorre quando a espessura do cavaco se torna inferior ao mínimo necessário para sua remoção eficiente, resultando em deformações plásticas superficiais que degradam a qualidade do acabamento [17, 18].

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a influência dos parâmetros de corte aplicados ao microfresamento da liga AA2024, determinando os limites operacionais em que o efeito *plowing* se torna predominante e investigando suas consequências diretas sobre a integridade superficial e as forças de usinagem resultantes do processo. A obtenção desses resultados fornecerá subsídios essenciais para a otimização técnica desse processo produtivo, visando ampliar sua aplicação segura em componentes estruturais críticos na indústria aeronáutica moderna.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Usinagem

A usinagem pode ser definida como um processo mecânico de fabricação por meio do qual o material excedente é removido de uma peça bruta até que ela atinja a forma e as dimensões especificadas em projeto. Trata-se de uma operação realizada por ferramentas cortantes que atuam sobre o material a ser conformado, conferindo-lhe a geometria desejada, precisão dimensional e acabamento superficial adequado ao uso final do componente produzido. A utilização intensiva dos processos de usinagem ocorre especialmente em aplicações industriais que demandam elevada precisão, complexidade geométrica e tolerâncias rigorosas, como nos setores aeroespacial, automotivo, eletrônico e biomédico [19, 20].

A interação entre ferramenta e peça durante o processo de usinagem gera esforços mecânicos consideráveis, resultantes das forças de corte, que podem causar deformações elásticas e plásticas, aquecimento localizado e desgastes acelerados das ferramentas. Além disso, os esforços mecânicos e térmicos implicam diretamente na qualidade da peça produzida, influenciando aspectos críticos como rugosidade superficial, precisão dimensional e integridade estrutural da superfície usinada [21].

Os processos de usinagem podem ser classificados em convencionais e não convencionais. Os convencionais caracterizam-se pela utilização de uma ferramenta cortante rígida que remove o material por meio de esforços mecânicos aplicados diretamente sobre a superfície da peça, enquanto os processos não convencionais são aqueles que removem material por outros meios físicos ou químicos, tais como erosão elétrica, usinagem eletroquímica e usinagem por laser. Entre os processos convencionais, destacam-se torneamento, fresamento, furação, brochamento e retificação, enquanto os não convencionais abrangem técnicas como eletroerosão, usinagem química e corte por jato abrasivo [22].

Para garantir a eficiência do processo de usinagem convencional, o uso de fluidos de corte é frequente, desempenhando papel crucial no controle térmico, lubrificação das superfícies em contato, remoção dos cavacos e redução do atrito entre a ferramenta e a peça [23]. Estudos indicam que a adequada utilização desses fluidos resulta não apenas no aumento da vida útil da ferramenta, mas também na melhoria significativa do acabamento superficial e da integridade dimensional do componente produzido [24]. No entanto, preocupações ambientais e regulatórias recentes têm motivado a indústria a buscar alternativas sustentáveis,

tais como a usinagem a seco ou com mínima quantidade de lubrificante (MQL – *Minimum Quantity Lubrication*), visando reduzir impactos ambientais, custos operacionais e riscos à saúde dos operadores envolvidos no processo [25].

A seleção criteriosa dos parâmetros de usinagem—velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e condições de lubrificação—é essencial para o sucesso do processo. Estudos indicam que esses parâmetros influenciam diretamente não só a produtividade e os custos operacionais, mas também a qualidade superficial, o desgaste das ferramentas e a integridade estrutural do material usinado. O ajuste inadequado desses parâmetros pode levar a consequências negativas como a geração excessiva de calor, deterioração da ferramenta de corte, formação de rebarbas e aumento significativo da rugosidade superficial [26].

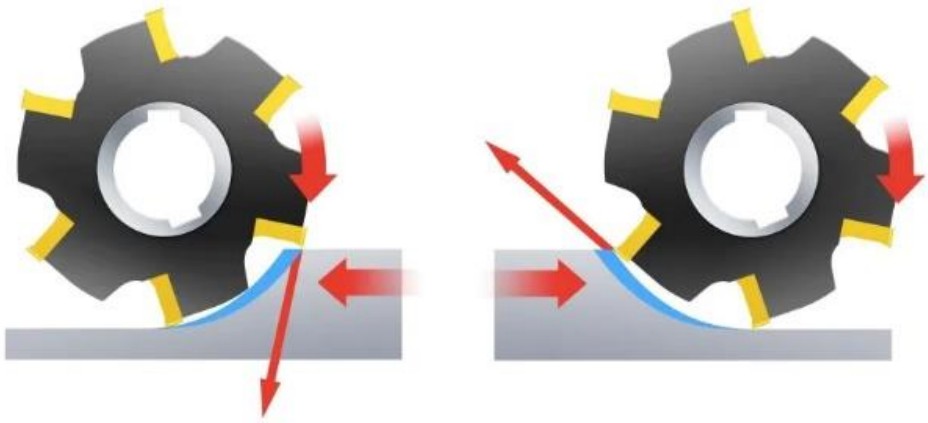
Adicionalmente, os materiais empregados na fabricação das ferramentas de corte têm evoluído significativamente. Atualmente, são amplamente utilizadas ferramentas à base de carbeto de tungstênio revestidas com materiais como nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) e nitreto de alumínio titânio (TiAlN), que oferecem alta resistência ao desgaste, dureza elevada e capacidade de trabalhar sob condições adversas de usinagem, como altas temperaturas e esforços mecânicos intensos. Recentemente, ferramentas à base de diamante policristalino (PCD) e nitreto cúbico de boro (CBN) também têm sido empregadas em aplicações específicas que demandam resistência excepcional ao desgaste e altas velocidades de corte [26, 27].

A compreensão detalhada dos mecanismos envolvidos na remoção de material durante a usinagem é fundamental para o aprimoramento contínuo do processo produtivo. Isso inclui estudos aprofundados sobre a interação ferramenta-peça, os mecanismos de formação de cavacos, a influência dos parâmetros operacionais sobre as forças de corte e o comportamento térmico do sistema de usinagem, além das técnicas mais eficazes para prevenção do desgaste prematuro das ferramentas e da degradação das propriedades da peça usinada [22].

Algumas particularidades distinguem o processo de fresamento dos demais processos de usinagem. Entre essas particularidades, destaca-se a alternância cíclica entre as fases ativa e inativa das arestas de corte, ocasionando a geração de cavacos descontínuos e influenciando diretamente o comportamento térmico e mecânico do processo. Outro aspecto importante é a variação da espessura do cavaco em uma única operação, que pode sofrer alterações expressivas dependendo dos parâmetros de corte adotados, tais como profundidade, velocidade de avanço, rotação do eixo-árvore, bem como da direção do deslocamento relativo entre ferramenta e peça [26].

No fresamento tangencial, ilustrado na Figura 2.1, o deslocamento da mesa em relação à rotação do eixo-árvore pode ocorrer em dois sentidos: concordante ou discordante. A direção desse movimento é especialmente relevante, pois determina diretamente a dinâmica das cargas mecânicas aplicadas à ferramenta durante as etapas de entrada e saída do corte. No fresamento concordante, a espessura do cavaco removido pela aresta cortante (representada na região azul) diminui gradualmente durante a operação, iniciando-se em espessura máxima e reduzindo até praticamente zero na saída da aresta da peça [22].

Por outro lado, no fresamento discordante, a aresta cortante começa o processo com uma espessura mínima de cavaco, próxima a zero, aumentando progressivamente à medida que avança no material até atingir seu valor máximo próximo à saída do corte. Essa variação dinâmica impacta diretamente nas forças envolvidas, podendo afetar a vida útil da ferramenta, a qualidade superficial obtida e a precisão dimensional das peças fabricadas [22].



(a) (b)

Figura 2.1: (a) Fresamento concordante e (b) fresamento discordante [22]

No fresamento de topo, representado na Figura 2.2, ocorre uma alternância simultânea entre os movimentos de corte concordante e discordante durante cada rotação da ferramenta. Tal dinâmica resulta na formação de cavacos segmentados, geralmente em formato semelhante a uma vírgula, cuja espessura varia ao longo do percurso da aresta cortante no material [22]. A espessura máxima desse cavaco, identificada como h_{ex}, ocorre no ângulo de entrada da ferramenta igual a 90º. Em condições de fresamento com largura total de corte (corte a cheio), o valor dessa espessura máxima equivale ao avanço por dente f_z. A representação esquemática

do formato característico desse cavaco é ilustrada na Figura 2.2, destacando-se pela região hachurada em azul [26].

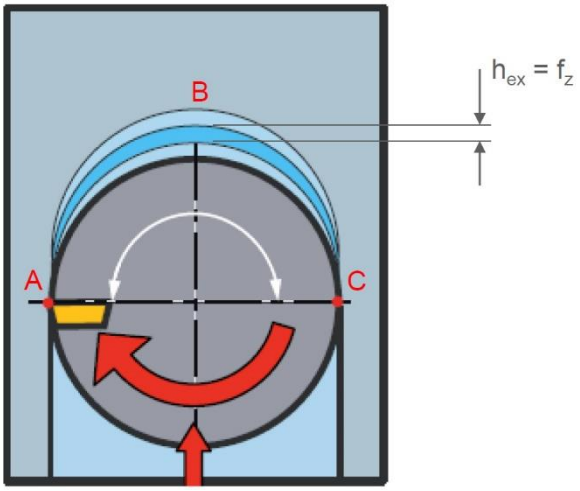


Figura 2.2: Representação do formato do cavaco no fresamento de topo [22].

2.2. Microusinagem

Nas últimas décadas, a crescente demanda por avanços tecnológicos relacionados à miniaturização de peças e componentes tem sido impulsionada principalmente pelas indústrias aeroespacial, automobilística, eletrônica e médica. Nesse contexto, a microusinagem desempenha um papel crucial, permitindo a fabricação de componentes com dimensões micrométricas e tolerâncias dimensionais extremamente rigorosas, frequentemente na ordem de poucos micrômetros ou até inferiores. Essas características possibilitam a produção de dispositivos mais leves, compactos e eficientes, que frequentemente não poderiam ser obtidos por meio das técnicas convencionais de fabricação [28].

Geralmente, o conceito de microusinagem é baseado nas dimensões da ferramenta de corte, que deve apresentar diâmetros situados entre 1 e 1000 µm. Contudo, a característica mais relevante nesse tipo de operação reside nos fenômenos específicos decorrentes do processo, tais como a espessura mínima do cavaco não removido e a relação dimensional entre o tamanho de grão do material da peça usinada e o raio da ponta da ferramenta. Em virtude dessas particularidades, as abordagens tradicionalmente aplicadas na usinagem convencional, em macroescala, não podem ser diretamente transferidas para a microusinagem por simples

comparação de escala, exigindo adaptações específicas dos parâmetros operacionais, estratégias de corte e métodos de avaliação dos resultados obtidos [29, 30].

Entre os processos de microusinagem mecânica, destacam-se principalmente o torneamento, a furação e o fresamento. Desses, o fresamento merece especial atenção devido à sua ampla versatilidade, aplicabilidade tanto em escala micro quanto macro, e capacidade para usinar geometrias complexas e tridimensionais, conferindo acabamentos superficiais superiores e tolerâncias dimensionais extremamente rigorosas. O microfresamento também se destaca pela possibilidade de aplicação em diferentes classes de materiais, tais como ligas metálicas, cerâmicas avançadas, polímeros de alto desempenho e compósitos [31].

Embora apresente semelhanças cinemáticas com a usinagem convencional, o processo de usinagem em escala micro não permite a aplicação direta dos conhecimentos consolidados na escala macro, visto que certos fenômenos considerados irrelevantes na usinagem convencional passam a exercer influência significativa em escalas reduzidas. Esses efeitos incluem o impacto do tamanho do grão do material, o efeito *plowing*, a formação de aresta postiça de corte (APC) e o aumento da influência das forças de atrito, tornando essencial a adaptação dos parâmetros de corte e das estratégias operacionais [32, 33].

Para o operador, essas diferenças são evidentes desde o início da operação, particularmente durante a primeira aproximação da ferramenta em relação à superfície da peça a ser usinada. Tal aproximação inicial frequentemente exige a utilização de dispositivos de ampliação óptica integrados a sensores de proximidade e contato, visando garantir a correta definição do ponto zero. Outra dificuldade crítica é a identificação e análise do desgaste das arestas cortantes, ou mesmo a detecção de quebras parciais ou totais da ferramenta, cujos efeitos, se não identificados prontamente, podem resultar em comprometimento da integridade superficial, perda das tolerâncias geométricas especificadas e redução drástica da qualidade dimensional do componente produzido [34].

Uma abordagem eficaz para estruturar e facilitar a compreensão das particularidades envolvidas no processo de microusinagem por fresamento consiste em classificar os principais fatores envolvidos em três grandes grupos interligados, como representado esquematicamente na Figura 2.3: a peça ou amostra a ser usinada, a ferramenta utilizada para realizar o corte e a máquina-ferramenta responsável pela movimentação e controle preciso dos movimentos da ferramenta e da peça durante a operação [35].

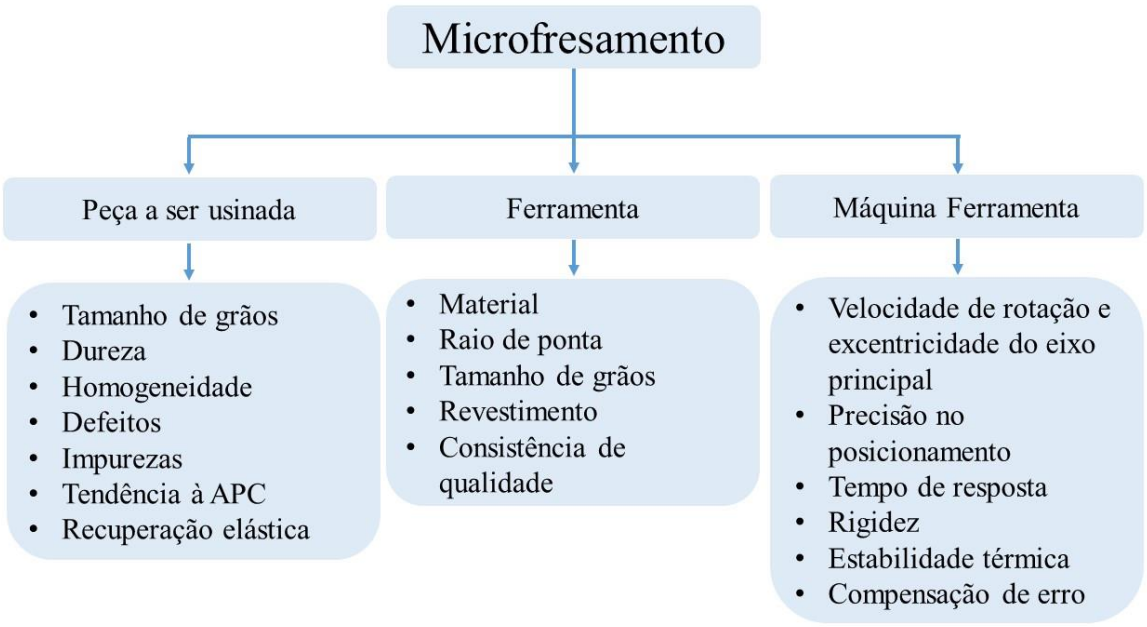


Figura 2.3: Principais aspectos a se considerar no microfresamento [35].

2.2.1. Máquinas e Ferramentas para Microusinagem

Para garantir que o microfresamento seja realizado com alta eficiência e precisão geométrica, é imprescindível que a máquina-ferramenta possua características construtivas específicas, adequadas às exigências operacionais impostas pela microusinagem. Entre essas características destacam-se, principalmente, elevada rigidez estática e dinâmica, fundamental para suportar as forças geradas durante o corte, reduzindo assim vibrações e deslocamentos que poderiam comprometer significativamente a qualidade superficial e a precisão dimensional das peças fabricadas [35, 36].

Adicionalmente, a estabilidade térmica dos materiais empregados na construção dessas máquinas é outro fator crucial, uma vez que variações térmicas mínimas podem resultar em deformações estruturais expressivas, levando a erros dimensionais intoleráveis na microusinagem. Por esse motivo, materiais com baixos coeficientes de expansão térmica, tais como ferro fundido estabilizado, granitos e outros materiais avançados, têm sido amplamente empregados na fabricação das estruturas das máquinas para microusinagem [37].

Outro aspecto essencial diz respeito aos sistemas de alimentação, posicionamento e controle da profundidade de corte. Para atingir as tolerâncias dimensionais exigidas em microescala, essas máquinas devem incorporar sistemas altamente precisos, como atuadores

piezelétricos ou sistemas lineares com resolução submicrométrica, garantindo precisão no posicionamento e repetibilidade de movimento em escalas menores que 1 µm [35, 37].

Ainda, o controle da rotação do eixo-árvore desempenha um papel decisivo no sucesso da operação de microusinagem. As velocidades do eixo-árvore frequentemente ultrapassam 100.000 rpm, demandando rolamentos especiais, alta precisão no balanceamento e monitoramento rigoroso para evitar falhas prematuras da ferramenta ou redução da vida útil do equipamento. Nesse contexto, destaca-se também a importância da excentricidade mínima, com valores máximos recomendados inferiores a 2 µm [35].

A Figura 2.4 apresenta um exemplo típico de microfresadora empregada em estudos experimentais para avaliar o desempenho do processo de microusinagem, particularmente os parâmetros operacionais envolvidos na fabricação de microcanais em ligas de alumínio equivalentes à série 3000 [37].

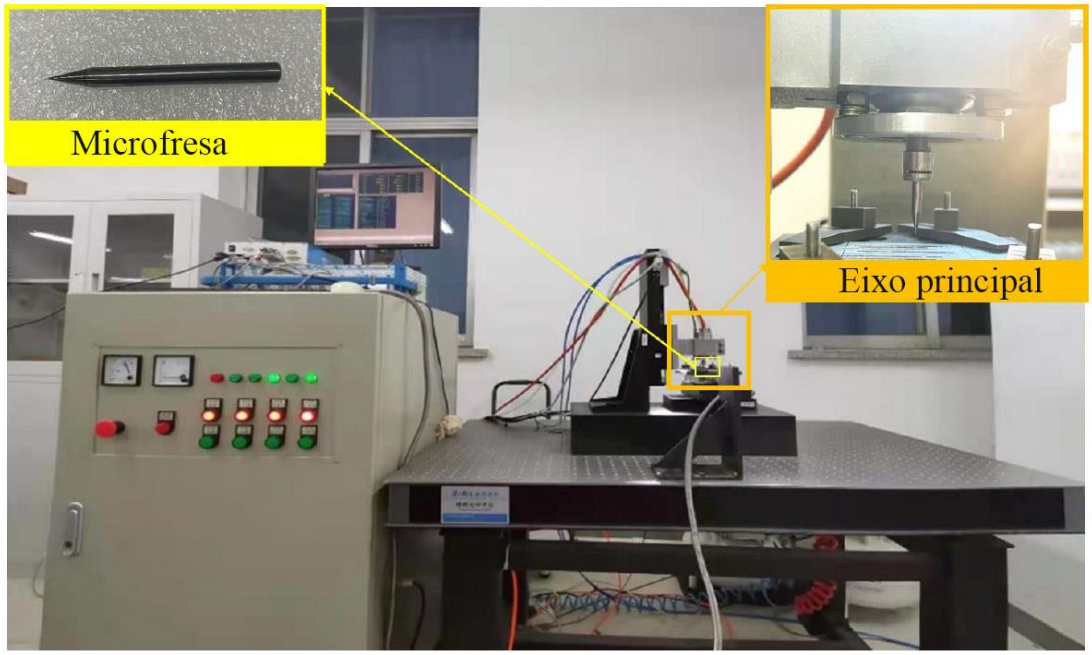


Figura 2.4: Exemplo de microfresadora (adaptado de [37]).

A utilização de fresadoras convencionais não é recomendada para a realização de operações de microfresamento. Um dos principais motivos reside na baixa rigidez das microfresas, cujos diâmetros extremamente reduzidos levam a uma diminuição significativa de sua resistência mecânica. Essa condição favorece a ocorrência de vibrações e flexões indesejáveis durante o corte, podendo comprometer severamente a precisão dimensional, a

integridade estrutural e a qualidade superficial das peças produzidas. Por esse motivo, máquinas projetadas especificamente para o microfresamento devem possuir elevada rigidez estrutural, garantindo estabilidade e precisão do processo mesmo diante da fragilidade inerente às ferramentas empregadas [34].

Outro aspecto crítico que inviabiliza a utilização de fresadoras convencionais no microfresamento é a elevada massa associada aos motores e rolamentos do eixo-árvore dessas máquinas. Tais massas representam um fator limitante, pois dificultam ou até impossibilitam atingir as altas velocidades de rotação exigidas na microusinagem, geralmente superiores a 100.000 rpm. Essas elevadas velocidades são essenciais para garantir que as condições de corte sejam adequadas às reduzidas dimensões das ferramentas utilizadas, proporcionando condições de corte estáveis e adequadas à escala micro [34].

Diferentemente de muitos outros processos de fabricação, a microusinagem impõe requisitos extremamente rigorosos quanto à qualidade superficial, tolerâncias geométricas e precisão dimensional. A miniaturização de componentes demanda máquinas que garantam não apenas dimensões micrométricas, mas também tolerâncias submicrométricas, exigindo controle rigoroso do posicionamento e da movimentação dos eixos [19].

Um alinhamento preciso entre o centro da ferramenta e o eixo principal de rotação também é essencial para evitar erros de excentricidade que poderiam afetar negativamente o processo, reduzindo a vida útil das ferramentas e comprometendo a qualidade do componente usinado. Além disso, características fundamentais como elevada rigidez estática e dinâmica, estabilidade térmica da estrutura e precisão dos sistemas de alimentação e posicionamento são requisitos indispensáveis [19].

Cabe destacar que as máquinas-ferramenta inevitavelmente possuem pequenas imperfeições construtivas, provenientes dos processos de fabricação e montagem. Tais imperfeições podem estar relacionadas a comandos numéricos, guias de deslizamento ou controle dos deslocamentos dos eixos. Embora imperceptíveis na usinagem convencional, essas variações, como uma mínima folga nas guias lineares, podem gerar distorções significativas e inaceitáveis na escala micro, comprometendo drasticamente os resultados finais do processo de microusinagem [35].

Para garantir que as máquinas-ferramenta operem com precisão extrema, além das características físicas mencionadas, elas devem contar com sistemas avançados de monitoramento integrados. Esses sistemas são capazes de avaliar, em tempo real ou durante pausas programadas no processo produtivo, aspectos como vibrações estruturais, consumo de

potência, desgaste das ferramentas, forças envolvidas no corte, morfologia dos cavacos e qualidade superficial das peças usinadas, assegurando, assim, maior confiabilidade e consistência ao processo produtivo [35].

2.2.2. Efeitos de Escala e Espessura Mínima de Corte

Na microusinagem, particularmente no microfresamento, a espessura do cavaco não removido possui ordem de grandeza comparável ao raio da ponta da ferramenta empregada no corte. Quando a espessura do cavaco não removido diminui até valores próximos ou inferiores ao limite crítico necessário para uma remoção efetiva do material, passa a predominar o fenômeno denominado espessura mínima de cavaco não removido, internacionalmente conhecido como *Minimum Uncut Chip Thickness* (MUCT).

Nessa condição específica, o cavaco deixa de ser formado adequadamente, pois as tensões geradas pelo contato entre ferramenta e material não são suficientes para causar a ruptura completa do cavaco. Em consequência, ocorre uma deformação plástica significativa, conhecida na literatura técnica como efeito *plowing*, caracterizada pela ocorrência predominante de deformações superficiais permanentes sem efetiva separação do material [38].

O efeito *plowing* se manifesta claramente quando a espessura efetiva do cavaco não removido se torna inferior ao valor crítico do MUCT, resultando não apenas na ausência da formação eficaz do cavaco, mas também em deformações plásticas indesejáveis na superfície da peça usinada. Essa deformação plástica superficial não controlada produz uma série de efeitos negativos diretamente associados à qualidade da peça fabricada. Entre esses efeitos, destacam-se o aumento significativo da rugosidade superficial, formação excessiva e irregular de rebarbas, redução da precisão dimensional e aumento da ocorrência de defeitos superficiais relacionados à recuperação elástica do material após a passagem da ferramenta [39].

Essas deformações superficiais excessivas têm como consequência o aumento das tensões cisalhantes localizadas e residuais na camada superficial da peça. Além disso, as elevadas tensões geradas pelo *plowing* são frequentemente acompanhadas por aumentos localizados de temperatura devido ao atrito intenso entre ferramenta e peça. Esse aquecimento pode favorecer processos de oxidação superficial, particularmente em materiais metálicos reativos como ligas de alumínio, ampliando ainda mais os danos à integridade superficial da peça [40].

Outro aspecto crítico é o impacto do efeito *plowing* nas propriedades mecânicas superficiais do material usinado. A deformação plástica recorrente provocada pela ausência da formação eficaz do cavaco tende a causar encruamento superficial, resultando em aumento local da dureza, porém de forma irregular e não controlada [41]. Estudos indicam que esse encruamento é altamente dependente das condições de corte, especialmente da taxa de avanço e da profundidade de penetração da ferramenta, influenciando diretamente a morfologia da superfície usinada [42]. Embora o encruamento possa, em certos contextos, ser benéfico ao incrementar a resistência superficial da peça, no caso da microusinagem ele geralmente provoca alterações não uniformes nas propriedades mecânicas, tornando a peça suscetível a trincas e falhas prematuras [43]. Além disso, pesquisas recentes destacam que a concentração localizada de tensões geradas pelo efeito *plowing* pode acelerar processos de fadiga superficial, reduzindo drasticamente a vida útil do componente [44].

Adicionalmente, o efeito *plowing* promove a formação de rebarbas irregulares e de difícil controle, um problema particularmente crítico em microcomponentes, pois exige operações subsequentes de acabamento ou rebarbação, aumentando significativamente o tempo e o custo produtivo [45]. Essas operações adicionais, além de onerarem o processo, elevam o risco de danos às peças, especialmente devido à fragilidade inerente aos componentes microusinados, tornando-se um desafio técnico na fabricação de peças de alta precisão [46].

Além disso, as rebarbas formadas durante a microusinagem podem comprometer funcionalmente o desempenho de componentes críticos, impactando diretamente setores como a indústria médica e aeroespacial. No setor médico, a presença de rebarbas em dispositivos implantáveis pode gerar atrito indesejado, dificultar a fixação adequada e até induzir resposta inflamatória nos tecidos [47]. Já na indústria aeroespacial, superfícies extremamente lisas e livres de imperfeições são essenciais para reduzir o arrasto aerodinâmico e garantir a integridade estrutural das peças submetidas a altas tensões mecânicas e variações térmicas extremas [48]. Assim, a minimização do efeito *plowing* e o controle da formação de rebarbas são fundamentais para assegurar a qualidade e a confiabilidade de componentes produzidos por microusinagem.

Convencionalmente, em operações de usinagem em macroescala, assume-se de maneira simplificada que o material é removido predominantemente por cisalhamento puro. Nessa condição idealizada, desconsidera-se a interação entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície da peça, pois tais interações são tipicamente irrelevantes. Todavia, no microfresamento, devido às dimensões comparáveis entre o raio de ponta da ferramenta e a

espessura indeformada do cavaco, essa interação torna-se crítica. A relação entre esses parâmetros passa a ser determinante para o resultado final da operação, influenciando diretamente a eficiência da remoção de material, as forças de usinagem e a integridade superficial da peça usinada. Além disso, estudos recentes demonstram que a fricção entre a superfície de folga e a peça pode gerar efeitos térmicos e mecânicos que impactam significativamente a qualidade final do microfresamento, aumentando a rugosidade superficial e acelerando o desgaste da ferramenta [49-52].

É importante salientar que, devido ao efeito *plowing*, ferramentas com geometria de ponta esférica (*ball nose*) tornam-se particularmente inadequadas para operações onde a espessura do cavaco indeformado esteja próxima ou inferior ao limite do *Minimum Uncut Chip Thickness* (MUCT). Nessas ferramentas, o contato superficial prolongado intensifica as deformações plásticas e elásticas superficiais, resultando em um aumento significativo da rugosidade e prejudicando a integridade do acabamento superficial. Além disso, estudos recentes demonstram que a geometria esférica da ferramenta contribui para o aumento das forças de corte, uma vez que a área de contato entre a ferramenta e a peça permanece elevada durante toda a operação, ampliando o efeito de fricção e o consumo energético do processo. Como consequência, há um desgaste acelerado da ferramenta, o que compromete a precisão dimensional e reduz a vida útil da ferramenta e da peça usinada [53-56].

Além disso, a relação dimensional entre o raio da ponta da ferramenta e o tamanho médio dos grãos cristalinos do material a ser usinado assume papel decisivo na ocorrência e intensidade do efeito *plowing*. Estudos recentes indicam que, quando essa relação dimensional se aproxima da unidade, ou seja, quando o raio da ferramenta é comparável ao tamanho médio dos grãos do material, a remoção de material passa a ser significativamente influenciada pelas propriedades anisotrópicas dos grãos individuais [57]. Essa condição pode resultar em variações consideráveis na força de corte e na espessura mínima do cavaco, dificultando o controle da usinagem e agravando os efeitos do *plowing* [58]. Além disso, a orientação dos grãos impacta diretamente a integridade superficial, levando a uma maior dispersão nos valores de rugosidade e a variações não homogêneas nas propriedades mecânicas locais do material [59]. Tais fatores tornam essencial a consideração da relação entre raio da ferramenta e tamanho dos grãos na seleção dos parâmetros de corte em operações de microusinagem.

Portanto, compreender a interação entre espessura mínima do cavaco não removido, raio da ponta da ferramenta e características microestruturais do material torna-se essencial para

mitigar os efeitos negativos associados ao fenômeno do *plowing*. Estudos indicam que ajustes estratégicos nos parâmetros de corte, como velocidade de avanço e profundidade de corte, podem reduzir a influência do *plowing* ao garantir que a espessura do cavaco se mantenha acima do limite crítico de remoção eficiente. Além disso, a seleção de ferramentas com geometrias otimizadas e revestimentos específicos pode minimizar as forças de atrito e o desgaste prematuro, promovendo uma maior estabilidade do processo e melhor integridade superficial da peça usinada. Dessa forma, o estabelecimento de parâmetros operacionais adequados e estratégias de corte otimizadas é fundamental para garantir a qualidade e a eficiência na microusinagem [60-62].

O efeito *plowing* exige maior cuidado no caso do microfresamento, já que a espessura do cavaco varia conforme o ângulo de posição [63]. Por isso, a análise do corte pode ser dividida em três regiões, representado na Figura 2.5.

A primeira região ocorre quando a ferramenta inicia o contato com a peça. Neste momento, não ocorre o corte por cisalhamento e, portanto, não há formação de cavaco. Nesta região, $h < h_{min}$, resultando no efeito *plowing*.

A segunda região inicia-se com o ângulo θ_{min} ou ângulo de posição crítico (θ_{Pi}), que representa a posição angular crítica, a partir da qual se terá a formação de cavaco.

A terceira região representa o instante no qual a posição angular atinge o seu limite final $\theta_{Pf} = 180° - \theta_{min}$. Nessa região, retorna-se ao caso onde $h < h_{min}$ e portanto, repete-se as características da primeira região.

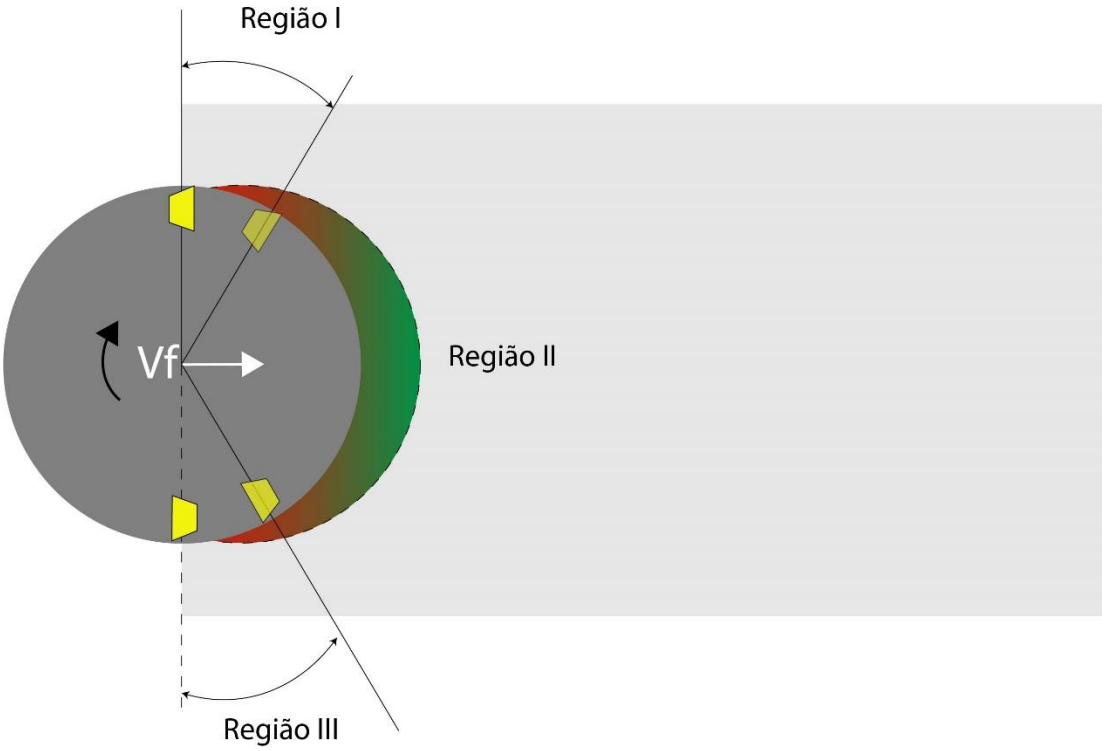


Figura 2.5: Região de formação do cavaco. Fonte: O autor.

No microfresamento, as ferramentas mais frequentemente empregadas são microfresas do tipo topo ou ponta esférica (*ball-nose*), comumente dotadas de duas arestas cortantes. Embora ferramentas com quatro arestas também estejam disponíveis, são menos utilizadas devido às restrições geométricas impostas pela reduzida dimensão das operações em escala micro. Quanto ao tamanho dessas ferramentas, a literatura especializada relata o emprego de microfresas com diâmetros extremamente reduzidos, podendo chegar a até 50 μm, demonstrando as possibilidades técnicas avançadas disponíveis atualmente [64].

A escolha adequada do material da ferramenta é um fator crítico para assegurar tanto uma vida útil prolongada quanto o alto desempenho na microusinagem. Ferramentas de diamante monocristalino são particularmente indicadas para usinagem de metais não ferrosos e materiais altamente abrasivos, devido às suas características excepcionais de dureza, resistência ao desgaste e capacidade de manter uma aresta de corte extremamente afiada. Entretanto, quando se trata da usinagem de ligas ferrosas ou materiais que podem induzir reações químicas com o carbono (presente no diamante), as ferramentas de metal duro revestidas com nitretos, especialmente o nitreto de alumínio-titânio (TiAlN), surgem como uma alternativa superior,

proporcionando resistência química aprimorada, menor desgaste abrasivo e maior estabilidade térmica, mesmo em condições extremas de usinagem [65-66].

Ferramentas revestidas com TiAlN têm sido amplamente utilizadas em processos de microusinagem devido à sua excelente resistência à oxidação em altas temperaturas, permitindo o emprego de elevadas velocidades de corte e reduzindo significativamente o desgaste prematuro das arestas. Kiswanto *et al.* [67] demonstraram que microfresas revestidas com Mega-T (um revestimento à base de nitreto de alumínio titânio avançado, fornecido pela fabricante SECO) exibem desempenho superior durante o microfresamento da liga de alumínio AA1100, resultando em maior vida útil das ferramentas e melhor acabamento superficial, mesmo diante de exigências operacionais severas típicas do processo.

Outro fator relevante na microusinagem é o monitoramento das forças envolvidas durante o corte. Dado que as microfresas possuem dimensões semelhantes às do material removido, forças excessivas ou inadequadas podem resultar em quebras prematuras ou desgaste acelerado das ferramentas, comprometendo a precisão dimensional, a qualidade superficial e a repetibilidade do processo [68]. Para avaliar essas forças com eficácia, é necessário utilizar sistemas de aquisição de dados com alta taxa de amostragem, possibilitando capturar oscilações em alta frequência, comuns durante operações realizadas em elevadas velocidades de rotação [69].

Adicionalmente, a avaliação criteriosa da qualidade superficial obtida após o processo é essencial na microusinagem. Técnicas avançadas de metrologia, como interferometria de luz branca, microscopia de força atômica (AFM) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), têm sido amplamente utilizadas para essa finalidade. Essas técnicas possibilitam não apenas avaliar a rugosidade superficial, mas também identificar efeitos negativos resultantes do efeito *plowing*. De maneira geral, observa-se que ferramentas com raios menores de ponta proporcionam acabamentos superficiais mais refinados, pois diminuem significativamente o efeito *plowing* e, consequentemente, as deformações superficiais indesejadas [70-73].

Desse modo, fica evidente que a seleção adequada das ferramentas e seus revestimentos, aliada ao rigoroso controle dos parâmetros operacionais, são elementos determinantes para o sucesso e a eficiência do microfresamento, permitindo alcançar altos padrões de qualidade e precisão dimensional.

2.2.3. Parâmetros de corte aplicados ao microfresamento

A produção de peças e componentes em escala micrométrica demanda elevados padrões de qualidade, com destaque especial para precisão dimensional e acabamento superficial. Particularmente nos processos de microusinagem, como o microfresamento, o controle preciso dos parâmetros operacionais desempenha um papel decisivo na obtenção desses requisitos, exigindo uma avaliação criteriosa e detalhada para determinar as melhores combinações de velocidade de rotação, profundidade de corte e avanço da ferramenta [74-76].

Kiswanto *et al.* [67], ao estudarem o microfresamento da liga de alumínio AA1100, analisaram especificamente a influência dos parâmetros de corte sobre a qualidade superficial obtida. Nesse estudo, velocidades de rotação elevadas (35.000, 70.000 e 95.000 rpm) foram combinadas a avanços lineares entre 0,05 mm/s e 1,00 mm/s, empregando microfresas de metal duro revestidas (Mega-T) com diâmetro de 0,20 mm. Os autores verificaram que avanços mais altos (1 mm/s), embora favoreçam o aumento da taxa de remoção de material, resultaram em deformações superficiais mais acentuadas ao longo do tempo, como consequência direta da ocorrência frequente de efeito *plowing*. Esse fenômeno, caracterizado pela deformação plástica superficial sem a efetiva formação do cavaco, compromete significativamente a qualidade superficial, produzindo rugosidades elevadas e rebarbas indesejadas.

Shinge e Dabade [77] investigaram parâmetros ideais para otimizar a taxa de remoção de material (*Material Removal Rate* – MRR) no microfresamento do alumínio AA6063-T6. Ao empregar ferramentas de carbeto de tungstênio de 400 µm de diâmetro, identificaram que parâmetros mais conservadores, com avanços moderados (1,8 mm/min) e rotações intermediárias (2.000 rpm), proporcionaram maior controle dimensional dos canais produzidos. Por outro lado, parâmetros mais agressivos resultaram em desvios dimensionais significativos e maior incidência do efeito *plowing*, prejudicando a qualidade superficial e reduzindo a vida útil das ferramentas, devido ao desgaste acelerado provocado pelo atrito excessivo entre ferramenta e peça.

Adicionalmente, Xu *et al.* [16] ressaltaram que, durante o microfresamento da liga AA2024, a seleção incorreta dos parâmetros de corte pode levar rapidamente ao efeito *plowing*, intensificando não só a rugosidade superficial como também a formação de rebarbas e a deterioração acelerada da ferramenta. Nesse contexto, destacam que ferramentas com menor raio de ponta apresentam vantagens significativas, pois possibilitam iniciar o corte com espessura de cavaco suficientemente alta para evitar o *plowing*, melhorando o acabamento superficial e prolongando a vida útil das ferramentas.

A correta seleção dos parâmetros operacionais no microfresamento é, portanto, crucial para minimizar a ocorrência do efeito *plowing*. Esse fenômeno não apenas prejudica a integridade superficial das peças, elevando a rugosidade e induzindo deformações plásticas irregulares, mas também compromete as propriedades mecânicas superficiais do material devido ao encruamento não controlado. A deformação plástica superficial decorrente do efeito *plowing* pode resultar ainda no endurecimento localizado, formação de rebarbas excessivas e até mesmo na geração de tensões residuais indesejáveis, comprometendo o desempenho funcional dos componentes microusinados [78-79].

2.2.4. Morfologia do cavaco no microfresamento

Uma forma eficaz de avaliar e compreender o processo de microfresamento consiste na observação detalhada da morfologia dos cavacos gerados sob diferentes condições operacionais. A morfologia do cavaco fornece importantes informações sobre a eficiência do processo de corte, permitindo inferir sobre a adequação ou inadequação dos parâmetros empregados. De fato, características como forma, tamanho, uniformidade e regularidade dos cavacos são indicativas diretas das condições de usinagem, especialmente na microusinagem, onde pequenos desvios nos parâmetros podem resultar em grandes variações na qualidade superficial e na integridade dimensional das peças produzidas [80-81].

Xu *et al*. [16] realizaram um estudo comparativo para investigar a morfologia dos cavacos formados durante o processo de microfresamento da liga de alumínio AA2024, conforme ilustrado na Figura 2.6. Nesse estudo, foram aplicados diferentes avanços por dente f_z: 0,5 μm/z, 1 μm/z, 1,5 μm/z e 2 μm/z, representados respectivamente nas Figuras 2.6a, 2.6b, 2.6c e 2.6d. Ao avaliar a morfologia dos cavacos produzidos sob essas condições, os autores observaram diferenças significativas na qualidade dos cavacos gerados, correlacionando diretamente essas diferenças à seleção adequada dos parâmetros de corte e, especialmente, ao fenômeno conhecido como espessura mínima do cavaco não removido (*Minimum Uncut Chip Thickness* – MUCT).

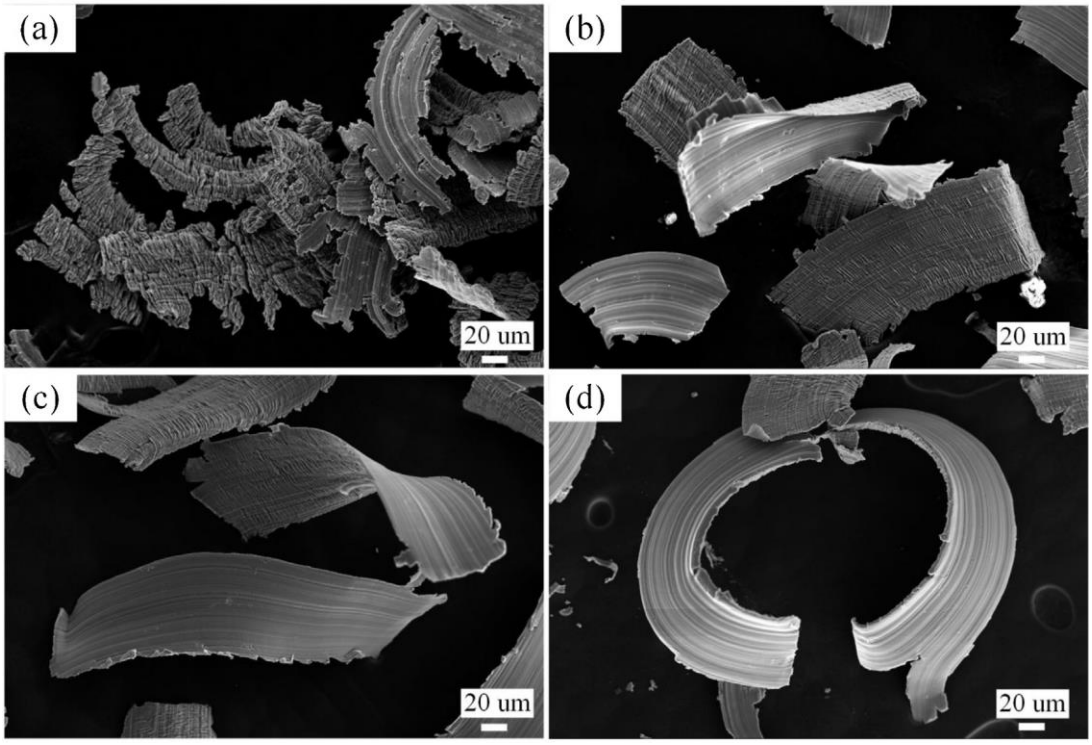


Figura 2.6: Morfologia do cavaco formado durante o microfresamento usando microfresa de topo produzida por cermet à base de Ti(C7N3), com avanços por dente: (a) f = 0,5 m/z; (b) f = 1 m/z; (c) f = 1,5 m/z; (d) f = 2 m/z [16].

Na Figura 2.6a, correspondente ao avanço mais baixo (0,5 μm/z), observa-se claramente uma morfologia irregular, fragmentada e descontínua do cavaco, evidenciando que o valor de avanço por dente utilizado está abaixo do limite mínimo necessário para a formação adequada do cavaco (h_{min}). Nessas condições, prevalece o efeito *plowing*, resultando em deformações plásticas superficiais intensas, sem que haja uma remoção efetiva e contínua do material, o que prejudica substancialmente o acabamento superficial das peças usinadas.

Com o aumento gradual do avanço por dente para 1 μm/z (Figura 2.6b) e posteriormente 1,5 μm/z (Figura 2.6c), nota-se uma melhora progressiva na homogeneidade dos cavacos, indicando que a espessura de corte começa a se aproximar do valor crítico necessário para uma usinagem eficiente. Entretanto, somente com um avanço por dente de 2 μm/z (Figura 2.6d) é que se obtém uma morfologia homogênea, uniforme e contínua, representativa da formação efetiva do cavaco e da completa superação do efeito *plowing*. Portanto, pode-se inferir com clareza que o valor da espessura mínima do cavaco não removido (h_{min}) para a liga AA2024, utilizando as condições experimentais descritas por Xu *et al*. [16], situa-se entre 1,5 μm/z e 2 μm/z.

Esses resultados reforçam a importância crítica da correta seleção e otimização dos parâmetros de corte no microfresamento. Valores inadequados de avanço por dente podem levar não apenas ao surgimento do efeito *plowing*, mas também a uma série de problemas adicionais, como maior desgaste das ferramentas, deterioração da integridade superficial da peça e aumento significativo da rugosidade, exigindo etapas adicionais de acabamento. A correta definição desses parâmetros torna-se, assim, essencial para garantir a qualidade final das peças microusinadas, promovendo um processo mais econômico, eficiente e capaz de atender aos rigorosos padrões exigidos em aplicações industriais avançadas.

2.2.5. Força de Usinagem

A força de usinagem é um parâmetro fundamental que descreve a resistência oferecida pelo material da peça durante a penetração da ferramenta de corte. Essa resistência resulta diretamente das propriedades mecânicas do material usinado, das condições geométricas da ferramenta e dos parâmetros operacionais empregados durante o processo [22]. Ao longo das últimas décadas, inúmeros pesquisadores têm se dedicado à formulação de modelos matemáticos capazes de prever as forças geradas em operações de usinagem, dada a importância crucial desses parâmetros para o dimensionamento adequado das máquinas-ferramenta, especialmente em relação à potência exigida pelos motores. Além disso, as forças geradas afetam diretamente a vida útil das ferramentas, o desgaste acelerado e a integridade superficial das peças produzidas, impactando diretamente a eficiência econômica e técnica do processo produtivo [82-83].

As abordagens teóricas para modelar as forças de corte são tradicionalmente fundamentadas na fenomenologia da formação do cavaco, simplificando o complexo mecanismo físico envolvido através de uma análise da deformação plástica do material ao redor do plano de cisalhamento principal e das superfícies de contato entre ferramenta e cavaco. Em geral, esses modelos realizam a decomposição das forças atuantes em componentes principais, buscando simplificar a análise ao considerar o corte em duas dimensões. Apesar das simplificações, tais modelos fornecem uma boa aproximação inicial das forças reais envolvidas em processos práticos de usinagem, permitindo estudos comparativos entre diferentes condições operacionais e materiais [84-87].

A partir da década de 1920, houve um crescimento expressivo nas pesquisas científicas direcionadas ao desenvolvimento de modelos analíticos e empíricos capazes de prever as forças

envolvidas na usinagem. Esse avanço foi impulsionado principalmente pelas demandas das grandes indústrias, interessadas em melhorar continuamente a relação custo-benefício dos processos produtivos, otimizar a produtividade e reduzir desperdícios. Pesquisadores como Kienzle [88], Kronenberg [89] e Altintas [63] tiveram papel decisivo ao estabelecerem métodos quantitativos e qualitativos para interpretar e prever essas forças, analisando não apenas os parâmetros operacionais, mas também a geometria específica das ferramentas, as características microestruturais dos materiais usinados e possíveis deformações sofridas pelas ferramentas durante o corte [90].

Nesse contexto, o corte ortogonal se configura como o modelo mais amplamente adotado para descrever e compreender os mecanismos básicos de remoção de material. No corte ortogonal, a aresta cortante da ferramenta posiciona-se perpendicularmente à direção do movimento principal da peça, resultando em uma configuração mais simples e idealizada, em que a aresta de corte é perpendicular à velocidade de corte (v_c), largura de corte (b) e à espessura do cavaco indeformado (h_n). Essa simplificação permite considerar um corte uniforme ao longo da aresta cortante, facilitando o entendimento dos fenômenos físicos envolvidos e possibilitando a decomposição das forças geradas em duas componentes principais: força tangencial (F_t), que atua na direção da velocidade de corte, e força de avanço (F_f, que atua na direção da espessura do cavaco não removido [22].

Na prática, contudo, a maioria das operações de usinagem ocorre em condições tridimensionais complexas, envolvendo geometrias variadas e interações mais elaboradas entre a ferramenta e a peça. Nesses casos, emprega-se o modelo de corte oblíquo, no qual a aresta cortante da ferramenta é inclinada em um ângulo específico (i) em relação à direção principal de corte. Diferentemente do corte ortogonal, no corte oblíquo surge uma componente adicional de força, denominada força radial (F_r), que atua perpendicularmente às outras duas componentes mencionadas anteriormente. Essa configuração mais próxima da realidade dos processos industriais introduz complexidade adicional às análises, exigindo modelos cinemáticos e matemáticos mais avançados para descrever adequadamente as forças resultantes e suas interações com o sistema de usinagem. A Figura 2.7 apresenta, de forma esquemática e comparativa, as configurações dos cortes ortogonal e oblíquo, evidenciando claramente as diferenças conceituais entre ambos e suas respectivas componentes de força envolvidas no processo de usinagem [22].

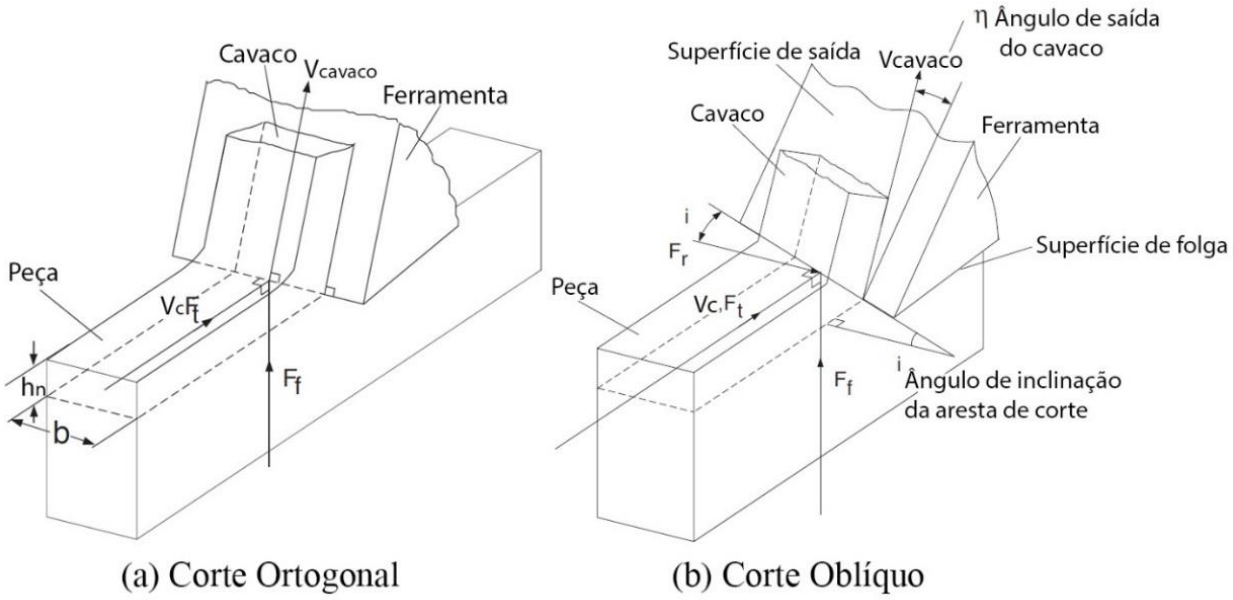


Figura 2.7: Geometrias dos cortes ortogonal e oblíquo [22].

No fresamento, a geração do cavaco resulta da interação dinâmica entre a ferramenta de corte, em movimento rotacional, e a peça que se desloca linearmente. Nesse processo, as arestas cortantes da fresa penetram periodicamente no material, promovendo ciclos intercalados de engajamento (fase ativa) e liberação do contato (fase inativa) [22]. Em consequência dessa interação intermitente, ocorre uma variação significativa e contínua na espessura do cavaco produzido ao longo de cada rotação da ferramenta. Tal variação, embora inerente ao processo de fresamento em qualquer escala, torna-se particularmente crítica em operações de microusinagem, devido à escala reduzida das ferramentas empregadas [91].

A espessura do cavaco formado durante o fresamento é influenciada diretamente por parâmetros operacionais como o avanço por dente, a profundidade de corte, a velocidade de avanço da peça e a rotação do eixo-árvore [22]. Além disso, depende também das características geométricas da ferramenta, como o número de arestas cortantes, o raio da ponta da ferramenta e a geometria específica das arestas [92]. Dessa forma, o estudo detalhado dessas variáveis é imprescindível para assegurar um controle eficiente das condições de corte, otimizando a qualidade do acabamento superficial e garantindo maior vida útil da ferramenta utilizada [93, 94].

A espessura efetiva do cavaco durante o fresamento pode ser representada matematicamente por meio de modelos que levam em consideração parâmetros fundamentais, tais como o avanço por dente, a profundidade de corte e o ângulo de posição da aresta cortante

em relação à peça usinada. Um modelo amplamente empregado na literatura técnica para aproximar a espessura instantânea do cavaco é expresso pela Equação (2.1), conforme descrito por Altintas [63]. Tal equação leva em consideração não apenas o avanço por dente, mas também o ângulo de rotação instantâneo da ferramenta e a geometria específica do corte.

A correta determinação da espessura do cavaco é especialmente relevante, pois afeta diretamente diversos aspectos críticos do processo de microusinagem. Por exemplo, quando a espessura do cavaco indeformado se aproxima ou torna-se inferior à espessura mínima crítica MUCT, ocorre o fenômeno denominado efeito *plowing*, resultando em deformações plásticas superficiais acentuadas, aumento das forças de corte e maior desgaste da ferramenta [95]. Por outro lado, quando essa espessura se mantém acima do limiar mínimo, o cavaco é removido eficientemente por cisalhamento, resultando em acabamentos superficiais homogêneos e maior eficiência do processo [96].

O conhecimento preciso da variação dinâmica da espessura do cavaco, fornecido por modelos como o representado pela Equação (2.1), é fundamental para selecionar corretamente os parâmetros de corte, assegurando que as condições operacionais permaneçam sempre adequadas à minimização dos efeitos indesejáveis do processo, como rugosidade excessiva, formação irregular de rebarbas, desgaste prematuro das ferramentas e comprometimento da integridade superficial e dimensional da peça usinada [63].

$$h(x) = c \sin \emptyset \qquad (2.1)$$

Onde c é o avanço por dente e $\emptyset$ é o ângulo de entrada instantâneo. As forças atuantes na aresta de corte em um segmento discreto e oblíquo podem ser decompostas em forças tangenciais ($F_t(\emptyset)$), radiais ($F_r(\emptyset)$) e axiais ($F_a(\emptyset)$), expressas em função da área do cavaco ($ah(\emptyset)$) e do comprimento de contato (a). Em cada direção, a força de corte pode ser ainda dividida em duas parcelas. A primeira parcela das forças ocorre devido ao cisalhamento do material da peça usinada na zona de cisalhamento e ao atrito ao longo da superfície de saída. Os coeficientes que representam essa parcela são o K_{tc}, K_{rc} e K_{ac}. A segunda parcela descreve as forças de riscamento, onde a aresta de corte gera uma deformação plástica na peça usinada decorrente do contato da ponta da ferramenta. Essas forças de riscamento são representadas pelas componentes K_{te}, K_{re} e K_{ae}.

$$F_t(\emptyset) = K_{tc}ah(\emptyset) + K_{te}a; \quad (2.2)$$

$$F_r(\emptyset) = K_{rc}ah(\emptyset) + K_{re}a; \quad (2.3)$$

$$F_a(\emptyset) = K_{ac}ah(\emptyset) + K_{ae}a; \quad (2.4)$$

Todos os coeficientes de força de corte $K_{tc}, K_{rc}, K_{ac}, K_{te}, K_{re}$ *e* K_{ae} podem ser avaliados através de experimentação ou de forma analítica. A espessura média de cavaco por revolução é calculada na região usinada como apresenta a Equação 2.5.

$$h_a = \frac{\int_{\emptyset st}^{\emptyset ex} c \sin \emptyset d\emptyset}{\emptyset_{ex} - \emptyset_{st}} = - \frac{\cos \emptyset_{ex} - \cos \emptyset_{st}}{\emptyset_{ex} - \emptyset_{st}} \quad (2.5)$$

Onde $\emptyset_{st}$e $\emptyset_{ex}$ são ângulos de entrada e saída, respectivamente, e são ilustrados na Figura 2.8. A fresa pode conter mais de um inserto usinando simultaneamente. O torque instantâneo T_c na fresa possuem as componentes:

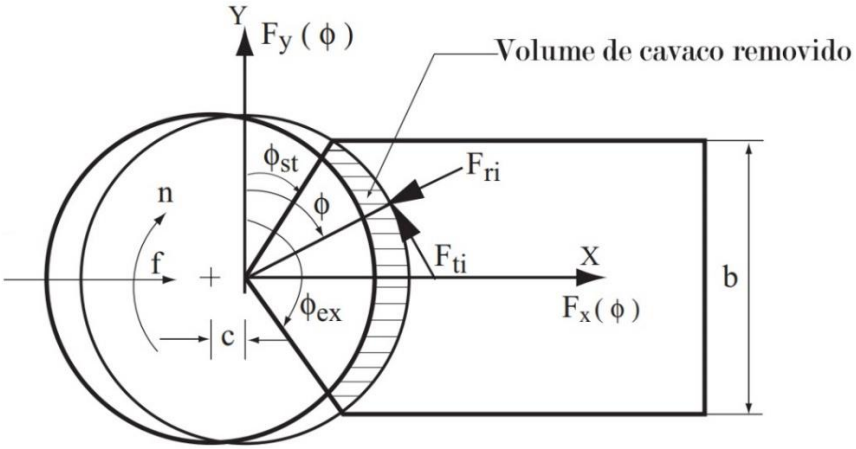


Figura 2.8: Represetatação dos ângulos de entrada e saída [63]

$$F_x(\emptyset) = -F_t \cos \emptyset - F_r \sin \emptyset \quad (2.6)$$

$$F_y(\emptyset) = +F_t \sin \emptyset - F_r \cos \emptyset; \quad (2.7)$$

$$F_z(\emptyset) = +F_a \quad (2.8)$$

As forças de usinagem só ocorrerão quando as ferramentas estão na zona de corte, ou seja, $F_x(\emptyset)$, $F_y(\emptyset)$ e $F_z(\emptyset) > 0$ quando $\emptyset_{st} \leq \emptyset \leq \emptyset_{ex}$. Dependendo do número de inserto, ângulo de pitch pode ser definido como:

$$\emptyset_p = \frac{2\pi}{N} \qquad (2.9)$$

Onde N é o número de insertos. Quando mais de um dente ou inserto cortam simultaneamente, a contribuição de cada dente para o avanço e a força normal deve ser considerada. Além disso, a espessura de cavaco removida no mesmo instante será diferente para cada dente ou inserto. Por isso, as forças de avanço, normal e axial são descritas como:

$$F_x = \sum_{j=1}^{N} F_{xj}(\emptyset_j); \qquad (2.10)$$

$$F_y = \sum_{j=1}^{N} F_{yj}(\emptyset_j); \qquad (2.11)$$

$$F_z = \sum_{j=1}^{N} F_{zj}(\emptyset_j); \qquad (2.12)$$

Onde $\emptyset_{st} \leq \emptyset_j \leq \emptyset_{ex}$. Cada termo da soma representa a contribuição de cada dente ou inserto na força de corte. Se o dente está fora da zona de corte, sua contribuição é nula. A força instantânea de corte é dada pela Equação 2.13:

$$F = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)} \qquad (2.13)$$

2.2.6. Microusinagem de AA2024

A microusinagem da liga de alumínio AA2024 reveste-se de significativa importância na engenharia aeronáutica e aeroespacial, devido às excepcionais propriedades mecânicas dessa liga e à sua elevada relação resistência/peso. O emprego dessa liga possibilita a fabricação de componentes estruturais altamente resistentes e com reduzida massa, promovendo a redução substancial do peso total das aeronaves e espaçonaves. Consequentemente, ocorre uma ampliação da carga útil disponível e uma otimização da eficiência energética durante a operação, reduzindo assim os custos operacionais e aumentando o desempenho global dos sistemas aeroespaciais [97].

A liga AA2024, além de apresentar uma combinação única de propriedades mecânicas, como alta resistência à fadiga, elevada resistência à tração e boa ductilidade, também exibe um comportamento particularmente interessante relacionado à propagação de trincas. Trata-se de uma liga frequentemente denominada "*self-healing*" (auto-reparadora), em virtude da sua

capacidade intrínseca de impedir ou retardar a propagação de trincas em estágio inicial, fenômeno que ocorre por meio da precipitação localizada de elementos solutos durante o início da trinca. Precipitação de partículas promove o bloqueio da propagação de fissuras microscópicas, aumentando significativamente a resistência à fadiga e a durabilidade dos componentes estruturais fabricados com essa liga, especialmente em condições críticas típicas do ambiente aeronáutico e aeroespacial [98].

Contudo, apesar dessas vantagens excepcionais, a microusinagem da liga AA2024 apresenta uma série de desafios específicos, especialmente relacionados à correta seleção do material e da geometria das ferramentas de corte. O alumínio é reconhecidamente um material de elevada ductilidade e baixa dureza, características que conferem alta usinabilidade, mas que também resultam em tendência acentuada à formação de arestas postiças de corte (APC), rebarbas excessivas e, frequentemente, dificuldades na obtenção de um acabamento superficial satisfatório. A formação da APC decorre da adesão do material usinado à ferramenta, gerando irregularidades na superfície e intensificando o desgaste acelerado das ferramentas [99-100].

Para o microfresamento dessa liga, as microfresas mais comumente empregadas são confeccionadas em carbeto de tungstênio (WC) ou diamante policristalino (PCD – *Poly-Crystalline Diamond*). Adicionalmente, têm sido documentadas aplicações bem-sucedidas utilizando ferramentas cerâmicas à base de Ti(C,N), que oferecem boa resistência ao desgaste abrasivo e térmico. No entanto, independentemente do material empregado, o desgaste acelerado das microfresas é um fenômeno crítico, afetando diretamente a rugosidade superficial, a integridade dimensional e a estabilidade do processo de microusinagem [101-103].

Estudos específicos, como os realizados por Shinge *et al.* [104], apontam que, durante o microfresamento da liga AA2024, os principais mecanismos de desgaste das ferramentas são o desgaste de flanco e o microlascamento das arestas cortantes, especialmente notáveis quando são utilizadas ferramentas de PCD. Esses desgastes, além de aumentarem a rugosidade superficial e provocarem desvios dimensionais, também intensificam a geração de rebarbas. A formação de rebarbas é inevitável no microfresamento dessa liga, manifestando-se principalmente nas extremidades e contornos das superfícies usinadas. Contudo, a correta seleção e otimização dos parâmetros operacionais, especialmente o avanço por dente, a profundidade de corte e a rotação do eixo-árvore, podem reduzir significativamente a ocorrência dessas rebarbas [105-107].

Segundo Shinge *et al*. [104], há uma clara correlação entre o avanço por dente (f_z) e o incremento na formação de rebarbas. Quando o avanço por dente é inferior à espessura mínima crítica do cavaco (h_{min}) não ocorre cisalhamento efetivo e homogêneo do material usinado, prevalecendo o efeito *plowing*. Nessa condição, o corte irregular, aliado à recuperação elástica parcial do material após a passagem da ferramenta, acentua a geração de rebarbas, prejudicando substancialmente a qualidade superficial e aumentando a necessidade de operações adicionais para acabamento das peças.

2.3. Integridade Superficial

A integridade superficial refere-se ao conjunto de características que definem a qualidade de uma superfície usinada, abrangendo aspectos superficiais e subsuperficiais. Durante o processo de usinagem, múltiplos fenômenos físicos, tais como cisalhamento, deformação plástica, geração de calor, formação de tensões residuais e recuperação elástica, ocorrem simultaneamente, exercendo influência direta sobre a condição final da superfície produzida. Esses fatores não apenas determinam a textura superficial resultante, mas também influenciam significativamente as propriedades mecânicas e metalúrgicas das camadas próximas à superfície da peça [108].

A integridade superficial é comumente avaliada através de parâmetros como rugosidade, microdureza, tensões residuais e presença de defeitos superficiais ou subsuperficiais. A rugosidade caracteriza as pequenas irregularidades presentes na superfície geradas durante o processo de corte. A microdureza indica a resistência da superfície à deformação plástica e pode revelar alterações relacionadas ao encruamento ou modificações microestruturais induzidas pelo processo. As tensões residuais, podendo ser trativas ou compressivas, são introduzidas durante a usinagem e possuem impacto direto sobre a resistência do material à fadiga e à corrosão [109].

A integridade superficial é influenciada por diversos fatores, incluindo parâmetros de corte (tais como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte), material e geometria da ferramenta, utilização de fluidos de corte e condições operacionais da máquina-ferramenta. Por exemplo, condições inadequadas durante a usinagem podem provocar a formação de uma camada afetada pelo calor (CAC), frequentemente denominada "camada branca", caracterizada

por alterações microestruturais capazes de comprometer o desempenho funcional e a vida útil do componente [110].

A integridade superficial desempenha um papel crucial no desempenho em serviço de componentes usinados. Alterações superficiais ou subsuperficiais podem comprometer propriedades críticas, como resistência à fadiga, resistência ao desgaste e à corrosão, além de influenciar o comportamento tribológico e a estabilidade dimensional do componente. Dessa forma, o controle rigoroso dos parâmetros de usinagem, aliado à compreensão aprofundada dos fenômenos físicos envolvidos, é essencial para garantir a qualidade e a confiabilidade operacional dos produtos finais [111].

2.3.1. Formação de Rebarba

A formação de rebarbas representa um desafio significativo no contexto da microusinagem, especialmente durante o processo de microfresamento. Por essa razão, é essencial realizar uma avaliação empírica minuciosa dos diversos parâmetros de corte, visando à minimização da ocorrência dessas imperfeições, que podem comprometer tanto a precisão dimensional quanto a qualidade superficial das peças usinadas [112].

A formação de rebarbas é especialmente crítica na fabricação de componentes em escala micrométrica, uma vez que compromete diretamente a integridade superficial e a qualidade dimensional das peças, podendo inclusive inviabilizar o uso prático de muitos componentes microusinados. Além disso, a remoção dessas rebarbas frequentemente é impraticável, tanto por razões técnicas—devido à fragilidade intrínseca das peças miniaturizadas—quanto por razões econômicas, já que operações adicionais de acabamento implicam custos extras significativos ao processo produtivo [113].

A formação de rebarbas é um dos principais desafios na microusinagem, representando um fenômeno crítico que compromete tanto a integridade superficial quanto a precisão dimensional da peça usinada. A presença de rebarbas pode gerar dificuldades em processos subsequentes, como montagem de componentes, usinagens complementares e aplicação de tratamentos superficiais, além de impactar negativamente o desempenho mecânico da peça, especialmente em componentes de alta precisão [113].

As rebarbas formadas durante o microfresamento podem ser classificadas com base em três critérios principais: forma, localização e mecanismo de formação. A forma das rebarbas

pode variar desde perfis regulares e uniformes até configurações altamente irregulares e fragmentadas, dependendo das condições de corte e das propriedades do material usinado. A localização das rebarbas pode ser identificada em regiões específicas da peça, como bordas de entrada e saída da ferramenta, laterais da trilha de corte e regiões superiores ou inferiores da superfície usinada. Já os mecanismos de formação estão diretamente relacionados aos fenômenos envolvidos no corte, incluindo recuperação elástica, adesão de material à ferramenta, efeito *plowing* e encruamento localizado [67].

Do ponto de vista dos fenômenos envolvidos, a geração de rebarbas decorre fundamentalmente da deformação plástica superficial resultante do cisalhamento incompleto do material pela ferramenta cortante. Kiswanto *et al.* [67] definem as rebarbas como projeções ou saliências indesejadas de material que resultam diretamente das forças e das tensões residuais geradas pelo corte, agravadas ainda mais pela presença de fenômenos como o efeito *plowing*.

A presença dessas rebarbas compromete não apenas a funcionalidade das peças microusinadas destinadas a aplicações de alta precisão, mas também implica custos adicionais decorrentes do retrabalho ou descarte das peças afetadas. Em escala micrométrica, métodos convencionais de remoção manual ou mecânica de rebarbas frequentemente se tornam impraticáveis, pois podem causar danos ou deformações nas peças delicadas. Ademais, esses procedimentos geram um aumento substancial no tempo de produção, comprometendo significativamente a viabilidade econômica da fabricação dos componentes [114].

De acordo com a literatura especializada, as rebarbas podem ser classificadas com base em suas características geométricas ou localização na peça usinada. Quanto à forma geométrica específica, Kiswanto *et al*. [67] propuseram a categorização das rebarbas em cinco tipos principais: (1) rebarba tipo faca, (2) rebarba ondulada, (3) rebarba laminar, (4) rebarba aderente e (5) rebarba fragmentada. Cada tipo de rebarba possui características morfológicas próprias, associadas diretamente aos parâmetros de usinagem utilizados, ao tipo de ferramenta e à interação específica ferramenta-peça.

Em relação à posição de ocorrência das rebarbas durante o fresamento, a literatura técnica sugere classificá-las de acordo com sua localização relativa à trajetória da ferramenta na peça usinada. Assim, essas rebarbas podem ser classificadas em rebarba de entrada, originada quando a ferramenta penetra no material; rebarba de saída, formada no ponto em que a ferramenta deixa o material; rebarbas laterais, formadas ao longo das bordas paralelas ao movimento principal de avanço; e ainda, rebarbas superiores e inferiores, que surgem nas

regiões superior e inferior das superfícies usinadas, respectivamente, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 2.9 [67].

É importante salientar que a minimização efetiva das rebarbas no microfresamento requer não apenas o domínio técnico dos fenômenos físicos envolvidos, mas também uma análise criteriosa das propriedades do material, dos parâmetros de corte aplicados e das ferramentas empregadas no processo. Pesquisas recentes destacam que avanços reduzidos, profundidades de corte otimizadas, ferramentas com geometria e revestimento adequados e velocidades de corte elevadas, aliadas a uma eficiente refrigeração, são estratégias eficazes para minimizar a geração dessas imperfeições. Portanto, a compreensão detalhada desses aspectos e a correta seleção dos parâmetros operacionais são fundamentais para garantir um processo de microusinagem eficiente, com resultados satisfatórios e economicamente viáveis, especialmente em aplicações tecnológicas avançadas.

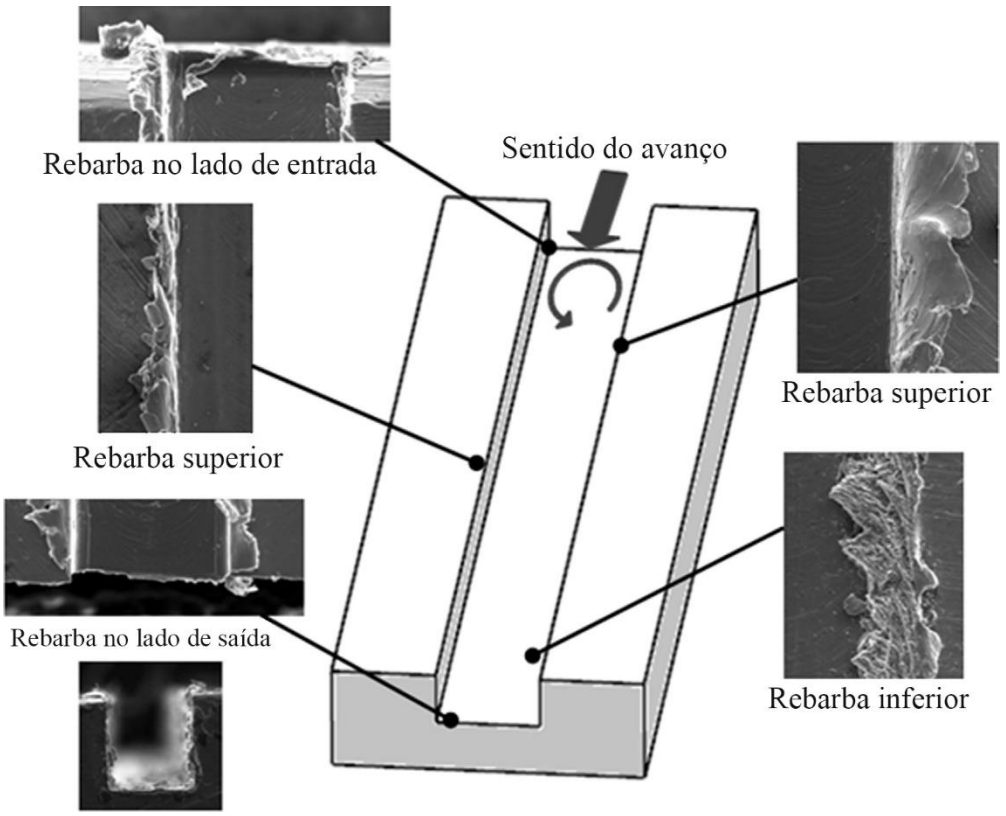


Figura 2.9: Principais classificações das rebarbas encontradas no fresamento [67].

Kiswanto *et al.* [67] realizaram um estudo detalhado sobre a formação de rebarbas durante o processo de microfresamento de topo aplicado à liga de alumínio AA1100. Neste trabalho, os autores identificaram a ocorrência de diferentes tipos de rebarbas, incluindo rebarba

superior, inferior, lateral de entrada e lateral de saída. De acordo com os resultados apresentados, não foi observada a formação significativa de rebarbas no lado concordante ao sentido do avanço da ferramenta, indicando que o sentido de avanço desempenha um papel relevante na geração dessas imperfeições superficiais.

Os pesquisadores [67] observaram também que a formação da rebarba inferior esteve diretamente relacionada ao desgaste progressivo da ferramenta. Inicialmente ausente, a rebarba inferior passou a surgir e tornar-se expressiva apenas após a ferramenta atingir um estágio mais avançado de desgaste. Dessa forma, ficou evidente que o desgaste das arestas de corte é um fator determinante na formação das rebarbas durante a operação de microfresamento. A perda gradual da afiação da ferramenta promove maior deformação plástica, gerando condições desfavoráveis ao cisalhamento efetivo do material e, consequentemente, resultando em maior incidência e severidade das rebarbas formadas.

2.3.2. Principais Parâmetros de Rugosidade

A rugosidade superficial é uma das características mais relevantes para avaliar a qualidade de uma superfície usinada. Ela se refere às pequenas irregularidades presentes no perfil da superfície, geradas por efeitos diretos do processo de corte, como vibrações, deformações plásticas, fratura do cavaco e desgaste da ferramenta. Em processos de usinagem de precisão e, especialmente, em microusinagem, a rugosidade é um parâmetro crítico, pois impacta diretamente o comportamento tribológico, a resistência à fadiga, a adesão de revestimentos e o desempenho funcional de componentes em serviço [115,116].

Entre os parâmetros mais utilizados para quantificar a rugosidade estão o Ra, Rt e Rz, exibidos na Figura 2.9, cada um oferecendo uma perspectiva diferente sobre o perfil da superfície usinada. A escolha adequada desses parâmetros é essencial para a correta caracterização da integridade superficial e para a avaliação comparativa entre diferentes condições de corte.

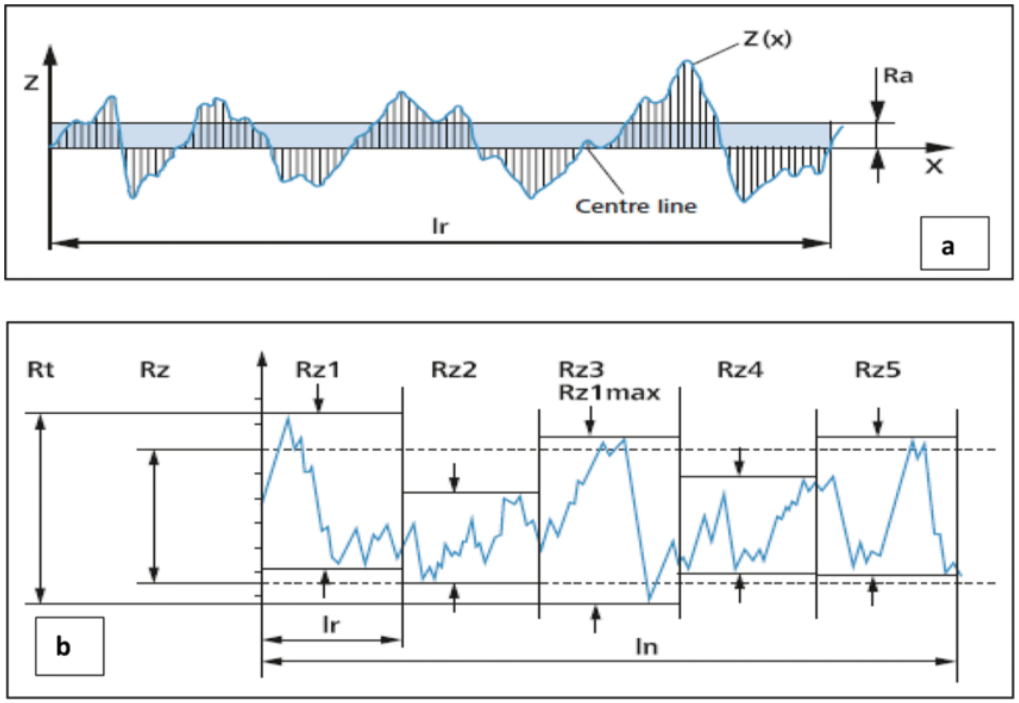


Figura 2.10: Representação esquemática dos principais parâmetros de rugosidade: Ra, Rt e Rz.

O parâmetro Ra (*Roughness Average*) representa a média aritmética dos desvios absolutos do perfil da superfície em relação à linha média, ao longo de um comprimento de avaliação definido. É o parâmetro mais amplamente utilizado na indústria devido à sua simplicidade e representatividade estatística. No contexto da usinagem, o Ra permite comparar diferentes processos ou condições de corte em termos gerais de acabamento superficial. No entanto, por ser uma média, o Ra não fornece informações sobre picos ou vales extremos da superfície, podendo mascarar imperfeições localizadas que são críticas em aplicações de alta exigência, como selagens, acoplamentos de precisão e componentes aeroespaciais [117].

O parâmetro Rt (*Total Roughness Height*) corresponde à distância vertical entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo do perfil da rugosidade dentro do comprimento de medição. Diferentemente do Ra, o Rt fornece uma visão do extremo absoluto da topografia da superfície, sendo sensível a defeitos pontuais, como riscos profundos ou rebarbas residuais. Em processos de usinagem, o Rt é relevante para a detecção de falhas no corte, vibrações intermitentes ou problemas relacionados ao desgaste da ferramenta. No entanto, sua sensibilidade a pontos isolados também pode gerar variações significativas entre medições sucessivas [118].

Já o parâmetro Rz (*Average Maximum Height of the Profile*) representa a média aritmética das alturas máximas dos cinco maiores picos ao longo de cinco comprimentos de amostragem consecutivos. Ele é menos sensível a variações pontuais do que o Rt e oferece uma

representação mais robusta da rugosidade funcional. No contexto da usinagem, o Rz é amplamente utilizado para avaliar a consistência do acabamento superficial, especialmente em componentes que operam sob carga cíclica ou em contato com outras superfícies. Seu uso complementa o Ra e permite detectar padrões de usinagem que não seriam perceptíveis apenas pela média dos desvios [119].

Portanto, a análise conjunta de Ra, Rt e Rz fornece uma avaliação abrangente da superfície usinada, permitindo interpretar a qualidade do processo e suas consequências sobre a funcionalidade da peça. Em microusinagem, onde pequenas variações geométricas podem comprometer o desempenho do componente, o uso criterioso desses parâmetros é indispensável para o controle do processo e a validação dos resultados obtidos.

2.3.3. Rugosidade produzidas através da microusinagem

A rugosidade superficial constitui uma das principais características avaliadas em superfícies usinadas, representando um parâmetro crítico de qualidade, especialmente em processos de microusinagem. Ela é diretamente influenciada pelos parâmetros de corte utilizados, propriedades do material da peça, características geométricas e materiais da ferramenta, além da estabilidade dinâmica do sistema ferramenta-máquina-peça. Especificamente no contexto do microfresamento, as superfícies geradas frequentemente exibem padrões irregulares, sendo a avaliação rigorosa desses padrões essencial para verificar a eficácia do processo e assegurar o atendimento às especificações dimensionais e superficiais [120].

Devido às particularidades da microusinagem, a escala reduzida das ferramentas e das espessuras de cavaco altera significativamente os mecanismos convencionais de formação de rugosidade. O fenômeno da espessura mínima do cavaco não removido MUCT leva ao efeito *plowing*, que acarreta deformações plásticas na superfície, causando um aumento significativo da rugosidade superficial e, em muitos casos, resultando em valores imprevisíveis. Essas deformações plásticas superficiais estão diretamente relacionadas à interação da ferramenta com a peça, especialmente quando são utilizados parâmetros inadequados, como avanço por dente excessivamente baixo ou velocidades de corte inadequadas [121].

Outro fator crítico para a rugosidade na microusinagem é a geometria e o material das ferramentas empregadas. Ferramentas com arestas cortantes arredondadas ou desgastadas

tendem a elevar a rugosidade superficial devido ao aumento das forças envolvidas no processo e da deformação plástica do material usinado. Além disso, materiais da ferramenta com baixa resistência ao desgaste, como certos tipos de carbeto não revestido, podem levar ao rápido desgaste das arestas cortantes, resultando em superfícies altamente irregulares e com rugosidade excessiva. Por isso, a seleção cuidadosa e otimizada das ferramentas é essencial para garantir superfícies usinadas com baixa rugosidade e alta qualidade [122].

Finalmente, o controle da estabilidade dinâmica do sistema máquina-ferramenta-peça desempenha papel decisivo na determinação da rugosidade superficial durante a microusinagem. Vibrações excessivas do sistema provocam oscilações indesejáveis da ferramenta, criando padrões periódicos e não uniformes sobre a superfície usinada, além de aumentar o desgaste da ferramenta e o risco de falhas prematuras. Portanto, a utilização de equipamentos com elevada rigidez estrutural, juntamente com o ajuste apropriado dos parâmetros operacionais, como a profundidade de corte e a velocidade de avanço, torna-se imprescindível para assegurar a integridade superficial e reduzir ao máximo a rugosidade das superfícies microusinadas [123].

2.4. Corrosão em ligas de Alumínio

As ligas de alumínio são amplamente empregadas em aplicações industriais avançadas, especialmente na indústria aeroespacial, devido à combinação singular de baixo peso específico, elevada resistência mecânica e boa resistência à corrosão. Essas ligas obtêm suas propriedades mecânicas superiores por meio do fenômeno conhecido como endurecimento por precipitação, resultado da adição de elementos de liga como cobre, zinco, magnésio e manganês, que formam soluções sólidas supersaturadas em alumínio quando submetidas a altas temperaturas. Mediante tratamentos térmicos adequados, ocorre a precipitação de partículas intermetálicas dispersas na matriz de alumínio, que fortalecem significativamente o material por meio do mecanismo de endurecimento por precipitação [124].

Apesar dos benefícios mecânicos obtidos com a adição de certos elementos, algumas ligas de alumínio têm sua resistência à corrosão comprometida. Elementos como cobre, ferro, chumbo e cobalto geralmente afetam negativamente a resistência à corrosão do alumínio, elevando a sua suscetibilidade a mecanismos corrosivos localizados, tais como corrosão por pites e corrosão em frestas. Em particular, ligas contendo cobre, como a AA2024, são

reconhecidas por apresentar menor resistência à corrosão quando comparadas a ligas que não contêm esse elemento. Essa vulnerabilidade está associada principalmente à presença de partículas intermetálicas ricas em cobre dispersas na matriz do alumínio, que levam à formação de regiões anódicas, intensificando a corrosão localizada [125].

A corrosão por pites, especificamente, é uma forma agressiva e localizada de deterioração que se inicia preferencialmente em áreas expostas da superfície metálica, resultando na formação de cavidades profundas. Já a corrosão em frestas ocorre em regiões confinadas, nas quais a circulação limitada de oxigênio leva à formação de células eletroquímicas, acelerando significativamente o ataque corrosivo. Ambas as formas de corrosão afetam negativamente a integridade superficial e estrutural, reduzindo de maneira significativa a vida útil e o desempenho dos componentes produzidos a partir dessas ligas [126].

No contexto da microusinagem, o fenômeno da corrosão está intimamente ligado à integridade superficial resultante do processo. Durante o microfresamento, a elevada taxa de deformação plástica, associada à interação prolongada entre ferramenta e peça, gera uma quantidade significativa de calor localizado. Esse aquecimento superficial intenso, embora em escala reduzida, pode causar mudanças importantes nas propriedades superficiais e subsuperficiais do material, favorecendo a formação de óxidos metálicos superficiais. Em ligas como a AA2024, o aumento da temperatura durante o microfresamento pode promover a formação heterogênea de óxidos de alumínio e de cobre, comprometendo a uniformidade da camada protetora superficial e aumentando a suscetibilidade aos fenômenos corrosivos [127].

Além disso, o aumento de temperatura provocado por condições inadequadas dos parâmetros de corte potencializa fenômenos indesejáveis, como o efeito *plowing*, que acentua as deformações plásticas superficiais e favorece a formação irregular de arestas postiças de corte. Essas deformações superficiais induzem elevadas tensões residuais e estimulam a formação de microtrincas superficiais. A presença dessas microtrincas cria caminhos preferenciais para o ataque corrosivo, facilitando a penetração de agentes corrosivos no material. Além disso, o aquecimento excessivo e localizado pode resultar na formação de fases intermetálicas prejudiciais à resistência à corrosão, especialmente em ligas contendo alto teor de cobre, como a AA2024 [127].

2.5. Monitoramento dos processos de microusinagem

A microusinagem possui particularidades fundamentais que a distinguem substancialmente dos processos tradicionais de usinagem, indo muito além de uma simples redução das dimensões envolvidas. Essas diferenças devem-se principalmente ao chamado efeito de escala, relacionado diretamente às dimensões reduzidas das ferramentas e às pequenas espessuras do cavaco gerado. Em especial, o fenômeno da espessura mínima do cavaco não removido (*Minimum Uncut Chip Thickness* – MUCT) provoca profundas alterações no mecanismo físico de remoção do material, resultando em forças de corte significativamente diferentes e muitas vezes imprevisíveis quando comparadas aos processos convencionais de usinagem [128].

Essas forças, denominadas forças de usinagem (FU), representam variáveis essenciais, tanto na escala micrométrica quanto na macroscópica. Além de permitir uma estimativa precisa da potência exigida para o processo de corte, fornecem também informações relevantes para avaliar o desempenho operacional das ferramentas. Na prática, aumentos repentinos ou progressivos dessas forças frequentemente estão associados à deterioração da integridade das arestas cortantes, representando claros indicadores de desgaste ou mesmo sinais de falhas iminentes na ferramenta utilizada.

Nesse contexto, a utilização de dinamômetros específicos é indispensável para o monitoramento contínuo e preciso das forças envolvidas no processo de microusinagem. O dinamômetro empregado neste estudo é um equipamento sensível e robusto, apto a fornecer dados em tempo real referentes às forças atuantes, tradicionalmente decompostas em força de corte, força de avanço e força passiva. Além dessas componentes comuns aos processos convencionais, a microusinagem apresenta forças adicionais associadas ao efeito *plowing*, fenômeno no qual o material é deformado plasticamente sem remoção efetiva. Esse efeito gera forças adicionais consideráveis na ponta da ferramenta, aumentando significativamente a energia específica de corte [19].

Outro aspecto crítico monitorado pelo dinamômetro é a ocorrência da aresta postiça de corte (APC). A formação de APC é um fenômeno frequente na microusinagem, particularmente em ligas de alumínio, sendo caracterizado pela adesão do material usinado à superfície da ferramenta, resultando em uma modificação significativa da geometria efetiva de corte. Esse fenômeno causa um aumento acentuado das forças de usinagem, intensificando o desgaste prematuro das arestas cortantes e comprometendo a qualidade superficial das peças produzidas. Portanto, a detecção precoce da APC através das medições fornecidas pelo dinamômetro

permite a realização de ajustes imediatos nos parâmetros operacionais, prevenindo falhas e garantindo resultados otimizados [129].

2.6. Alumínio e suas Ligas

O alumínio puro apresenta diversas propriedades físicas e mecânicas que o tornam particularmente atrativo para aplicações industriais. Destaca-se sua baixa densidade, aproximadamente 2,7 g/cm³, valor que corresponde a cerca de um terço da densidade do aço. Além disso, exibe excelente resistência à corrosão em diversos ambientes, tais como atmosferas salinas, ambientes industriais e em contato com compostos petroquímicos. Contudo, apesar dessas propriedades vantajosas, o alumínio puro possui limitações consideráveis relacionadas à resistência mecânica, restringindo significativamente seu uso prático na forma elementar e exigindo frequentemente sua combinação com outros elementos para melhorar tais propriedades [130].

Em 1903, Alfred Wilm desenvolveu um marco importante na metalurgia do alumínio ao descobrir o fenômeno conhecido como endurecimento por envelhecimento. Wilm observou que a adição de aproximadamente 4% de cobre ao alumínio resultava em um aumento significativo da resistência mecânica após tratamentos térmicos específicos. Com base nessa descoberta, foi desenvolvida a liga Al-Cu-Mg-Mn, inicialmente denominada duralumínio, que estabeleceu as bases para as modernas ligas da série 2xxx, amplamente empregadas atualmente nas indústrias aeronáutica, automotiva e aeroespacial devido às suas propriedades mecânicas excepcionais [131].

Uma importante característica das ligas de alumínio reside em sua capacidade de ter suas propriedades modificadas através da adição criteriosa de elementos de liga e da aplicação de tratamentos térmicos específicos durante o processo de fabricação. Dessa forma, torna-se possível adequar as propriedades mecânicas e físicas das ligas às demandas específicas das aplicações finais.

As ligas de alumínio podem ser classificadas em dois grupos principais, dependendo de seus processos de fabricação: ligas fundidas (*Casting Aluminum Alloys*) e ligas trabalháveis ou conformadas (*Wrought Aluminum Alloys*). As ligas trabalháveis são inicialmente produzidas sob a forma de tarugos ou lingotes e, em etapas subsequentes, são submetidas a processos de

conformação plástica realizados a quente ou a frio, incluindo métodos como extrusão, laminação e forjamento, visando alcançar as propriedades mecânicas e dimensões desejadas [131].

Por outro lado, as ligas fundidas destacam-se pela sua excelente capacidade de preencher cavidades complexas em moldes, propriedade conhecida como colabilidade, atribuída principalmente à presença significativa de silício em sua composição química. Essas ligas também apresentam um ponto de fusão relativamente baixo, o que simplifica o processo de fundição e possibilita rápidas transferências de calor entre a peça fundida e o molde, resultando em ciclos de produção mais curtos e maior eficiência produtiva [132].

Para ambos os grupos, há uma subdivisão adicional, distinguindo as ligas que respondem positivamente aos tratamentos térmicos das que não apresentam melhorias significativas quando submetidas a esses processos. Os principais tratamentos térmicos empregados nas ligas de alumínio incluem a solubilização, têmpera, envelhecimento (precipitação) e o encruamento. Frequentemente, as ligas trabalháveis são submetidas à combinação desses tratamentos térmicos com processos de deformação plástica, com o intuito de aprimorar suas propriedades mecânicas e melhorar o desempenho em serviço.

Quanto à nomenclatura das ligas, a *Aluminum Association* (AA) estabeleceu um sistema padronizado para identificar ligas fundidas e trabalháveis. No caso específico das ligas trabalháveis, foi adotado um sistema composto por quatro dígitos que permite identificar claramente as séries com base na composição química predominante, conforme ilustrado na Tabela 2.1 [132].

Tabela 2.1: Principal composicão das ligas de alumínio trabalháveis [132].

Série	Principal elemento de Liga
1xxx	Composição não ligada - alumínio puro
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silício
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio e o silício
7xxx	Zinco

8xxx	Estanho e algumas composições de lítio
9xxx	Reservado para uso futuro

O primeiro dígito indica o principal elemento de liga presente na composição química. Assim, as séries 2xxx (Al-Cu), 6xxx (Al-Mg-Si), 7xxx (Al-Zn) e grande parte da série 8xxx possuem capacidade de elevar significativamente suas propriedades mecânicas através de tratamentos térmicos específicos. Em contrapartida, as séries 1xxx (alumínio puro), 3xxx (Al-Mn), 4xxx (Al-Si) e 5xxx (Al-Mg) apresentam melhorias de resistência principalmente através de processos de deformação a frio, apresentando pouca ou nenhuma resposta significativa ao endurecimento por precipitação.

A compreensão profunda dessas características, aliada à seleção adequada dos elementos de liga e à correta aplicação dos tratamentos térmicos, constitui o caminho fundamental para otimizar as propriedades mecânicas e garantir a performance superior das ligas de alumínio em diversas aplicações industriais avançadas.

A nomenclatura utilizada para as ligas de alumínio fundidas foi estabelecida pela AA por meio de um sistema padronizado composto por três dígitos principais, seguidos por um dígito decimal adicional, conforme apresentado na Tabela 2.2. Esse sistema fornece uma maneira clara e objetiva para identificar as ligas fundidas com base na sua composição química e forma específica de fornecimento.

O primeiro dígito da nomenclatura tem como função indicar o principal elemento de liga presente em maior concentração na composição da liga fundida. Dessa maneira, é possível identificar rapidamente a família ou grupo ao qual determinada liga pertence, facilitando a escolha adequada para uma aplicação específica.

Os dígitos subsequentes, segundo e terceiro, são utilizados para diferenciar ligas individuais dentro da mesma série ou família, permitindo uma identificação precisa das variações de composição química e propriedades específicas. Assim, dentro de uma mesma série de ligas fundidas, pode haver diversas combinações e proporções diferentes dos elementos de liga secundários, resultando em diferentes propriedades mecânicas, físicas e de fundição, que exigem uma classificação numérica detalhada para serem claramente diferenciadas.

O dígito decimal adicional, posicionado após os três dígitos principais, indica especificamente a forma em que a liga de alumínio fundida é fornecida ao mercado ou à indústria para uso posterior. O valor decimal "0" representa peças já fundidas e solidificadas,

indicando componentes finais moldados em suas formas definitivas. Por outro lado, o valor decimal "1" identifica a liga fornecida na forma bruta de lingote, geralmente destinada a processos secundários ou de refundição, enquanto o dígito decimal "3" indica ligas fornecidas também na forma de lingotes, porém com uma faixa mais restrita e rigorosamente controlada quanto à sua composição química, garantindo assim propriedades consistentes e previsíveis nas aplicações industriais subsequentes.

Dessa forma, a nomenclatura proposta pela AA assegura um método prático, sistemático e eficaz para diferenciar e selecionar as ligas fundidas de alumínio mais adequadas para aplicações específicas, facilitando a comunicação técnica entre fornecedores, engenheiros e usuários finais. O entendimento correto dessa nomenclatura permite que fabricantes e projetistas façam escolhas mais precisas e informadas, resultando em maior desempenho, confiabilidade e adequação técnica das peças fundidas produzidas em ligas de alumínio.

Tabela 2.2: Principal composição das ligas fundidas [132]

Série	Principal elemento de Liga
1xx.x	Composição não ligada - alumínio puro
2 xx.x	Cobre
3 xx.x	Silício e pode conter Cobre e/ou Magnésio
4 xx.x	Silício
5 xx.x	Magnésio
6 xx.x	Magnésio e Silício
7 xx.x	Zinco
8 xx.x	Estanho
9 xx.x	Não utilizado

2.6.1. Tratamentos térmicos

A importância dos tratamentos térmicos aplicados às ligas de alumínio reside na capacidade desses procedimentos em modificar significativamente a microestrutura do

material. Esses tratamentos promovem variações substanciais em propriedades mecânicas essenciais, como resistência à tração, dureza, ductilidade e resistência à corrosão, permitindo ajustar tais ligas de maneira precisa às exigências específicas de diversas aplicações tecnológicas e industriais [133].

Nesse contexto, torna-se fundamental compreender as nomenclaturas associadas aos tratamentos térmicos em ligas de alumínio, uma vez que tais designações descrevem precisamente as operações térmicas executadas e suas sequências, facilitando a seleção e especificação dos materiais para aplicações específicas. Conforme apresentado na Tabela 2.3, a *Aluminum Association* (AA) estabelece uma classificação detalhada e sistemática para indicar o tipo e a sequência de tratamentos térmicos empregados nas ligas trabalháveis de alumínio. Essa classificação possibilita aos engenheiros e projetistas uma compreensão clara dos processos térmicos e mecânicos aplicados, garantindo maior eficiência e confiabilidade na escolha das ligas para aplicações estruturais e industriais avançadas.

Tabela 2.3: Nomeclatura para Tratamentos térmicos [132]

F	**Como recebido:** liga fornecida sem tratamento térmico ou controle específico de encruamento. Propriedades mecânicas não são garantidas para ligas trabalháveis nessa condição.
O	**Recozido:** liga submetida ao tratamento térmico de recozimento, visando aumento da ductilidade e estabilidade dimensional. Pode ser acompanhada por um dígito adicional diferente de zero.
W	**Solubilizada:** liga submetida à solubilização seguida por revenimento, cujas propriedades mecânicas variam naturalmente à temperatura ambiente ao longo do tempo (meses a anos).
H	**Encruada**: ligas trabalháveis, indica ligas submetidas a encruamento, podendo ou não incluir tratamento térmico adicional.
H1	**Encruada**: liga submetida exclusivamente ao encruamento, sem tratamento térmico posterior.
H2	**Encruada e parcialmente recozida**: liga submetida a encruamento com dureza excessiva, seguida por recozimento parcial para redução controlada da dureza.

H3	**Encruada e estabilizada**: liga submetida a encruamento seguido por tratamento térmico de estabilização, realizado com o intuito de preservar as propriedades mecânicas adquiridas e evitar alterações estruturais em temperatura ambiente.

As ligas de alumínio submetidas ao tratamento térmico por solubilização apresentam uma etapa crítica no processo térmico, na qual os elementos de liga são dissolvidos na matriz do alumínio, formando soluções sólidas supersaturadas. Após essa etapa, a liga é rapidamente resfriada, visando reter os elementos em solução sólida na temperatura ambiente, etapa denominada têmpera. A forma e velocidade do resfriamento após a solubilização exercem influência decisiva sobre as propriedades finais obtidas, determinando diretamente a resposta da liga ao envelhecimento subsequente. Conforme detalhado na Tabela 2.4, essas ligas ainda podem ser classificadas conforme o método de resfriamento utilizado após o tratamento térmico de solubilização, seja por têmpera em água, óleo ou ar, com velocidades específicas que promovem distintas microestruturas finais e, consequentemente, diferentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão das ligas processadas [132]

Dessa forma, compreender profundamente os processos de tratamentos térmicos aplicados às ligas de alumínio, incluindo as etapas de solubilização, têmpera e envelhecimento, bem como as nomenclaturas associadas, torna-se essencial para garantir a obtenção de propriedades desejadas e a utilização adequada dessas ligas em setores industriais críticos, como o aeroespacial, automobilístico e naval, assegurando desempenho estrutural e integridade em serviço.

Tabela 2.4: Nomeclatura utilizada para Ligas com TT por Solubilização [132].

Classificação T, para Solubilizadas por TT. Aplicável às ligas submetidas ao tratamento térmico de solubilização. Essa categoria pode ser subdividida em:	
T1	**Resfriamento após conformação a quente com envelhecimento natural**: Liga submetida a um tratamento térmico no qual ocorre resfriamento diretamente após um processo de conformação realizado em temperaturas elevadas, seguido por um período de envelhecimento natural em temperatura ambiente. Esse tratamento resulta em propriedades mecânicas estáveis adquiridas sem a necessidade de etapas adicionais de têmpera ou envelhecimento artificial. O objetivo principal é estabilizar as propriedades mecânicas obtidas durante a conformação a quente, aproveitando os efeitos da precipitação natural durante o resfriamento subsequente.
T2	**Resfriamento após conformação a quente e envelhecimento natural estável**: Liga submetida a resfriamento após processo de conformação a quente, seguida por trabalho mecânico a frio e subsequente envelhecimento natural até atingir condição substancialmente estável, com propriedades mecânicas uniformes e previsíveis. Essa

	nomenclatura é aplicada especificamente às ligas que, após conformação a quente, sofreram trabalho mecânico adicional antes do envelhecimento espontâneo em temperatura ambiente.
T3	**Solubilização seguida de encruamento e envelhecimento natural:** Liga submetida a tratamento térmico inicial de solubilização, seguida por deformação plástica a frio (encruamento) e subsequente envelhecimento natural até atingir uma condição substancialmente estável das propriedades mecânicas. Essa condição combina os efeitos do endurecimento por precipitação natural com os benefícios do encruamento, resultando em resistência mecânica aumentada e melhor estabilidade dimensional ao longo do tempo..
T4	**Solubilizado e envelhecido naturalmente**: Liga submetida ao tratamento térmico de solubilização seguido diretamente por envelhecimento natural em temperatura ambiente até que sejam alcançadas condições substancialmente estáveis das propriedades mecânicas, sem qualquer etapa intermediária de trabalho mecânico (encruamento).
T5	**Resfriado após conformação a quente e envelhecido naturalmente**: Liga submetida a resfriamento diretamente após processo de conformação realizado a elevadas temperaturas, seguido por envelhecimento natural em temperatura ambiente, até alcançar propriedades estáveis. Esta designação aplica-se especificamente a materiais que não sofreram qualquer tipo de trabalho mecânico a frio subsequente à conformação a quente.
T6	**Solubilizado e envelhecido artificialmente**: Liga submetida a um tratamento térmico inicial de solubilização, seguida imediatamente por têmpera rápida e subsequente envelhecimento artificial, realizado em temperaturas controladas. Este processo promove a precipitação controlada de fases intermetálicas, resultando em propriedades mecânicas superiores, estáveis e previsíveis.
T7	**Solubilizado e Sobreenvelhecido**: Liga submetida ao processo de solubilização seguido por um envelhecimento prolongado (sobreenvelhecimento) ou estabilização térmica. Esse tratamento visa melhorar propriedades específicas, particularmente a resistência à corrosão e estabilidade estrutural, proporcionando propriedades mecânicas desejáveis, porém com resistência ligeiramente reduzida em relação ao estado T6.
T8	**Solubilizado, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente**: Liga submetida inicialmente à solubilização, seguida por uma etapa intermediária de trabalho mecânico a frio, com objetivo de incrementar a resistência mecânica. Posteriormente, a liga é submetida ao envelhecimento artificial controlado, alcançando propriedades estáveis e elevadas, superiores às obtidas apenas pelo tratamento térmico convencional.
T9	**Solubilizado, envelhecido artificialmente e trabalhado a frio**: Liga submetida ao tratamento térmico de solubilização, seguida por envelhecimento artificial para fortalecimento da matriz e, posteriormente, por uma etapa de trabalho mecânico a frio, que confere um aumento adicional na resistência mecânica e estabilidade estrutural.
T10	**Resfriado, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente**: Liga resfriada a partir de uma temperatura elevada, seguida por trabalho mecânico a frio para aumento da resistência e, posteriormente, submetida ao envelhecimento artificial para estabilização das propriedades mecânicas.

Para mitigar tensões residuais geradas por esforços de tração, compressão ou pela combinação desses esforços, determinadas designações são atribuídas aos materiais, especificando os processos de alívio de tensão aplicados. Esses processos podem ser realizados tanto durante o tratamento térmico quanto imediatamente após o resfriamento a partir de uma temperatura elevada, conforme apresentado na Tabela 2.5. Além disso, designações específicas para alívio de tensão por compressão são detalhadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.5: Designação das Ligas que passaram por TT após Processo de Fabricação [132].

Tx51	Aplica-se especificamente a chapas, barras e barras laminadas ou acabadas a frio
Tx510	Aplica-se a hastes extrudadas, barras, formas e tubos e tubos trefilados
Tx511	Refere-se a produtos que podem receber pequenos tracionamentos após o deformações para atender tolerâncias de norma.

Tabela 2.6: Designação adicional para Ligas que passaram por TT após Processo de Fabricação [132].

Tx52	Aplica-se a produtos que são aliviados por compressão após tratamento térmico de solubilização ou após resfriamento de um processo de trabalho a quente
Tx54	Aplica-se a materiais trabalhados em matriz que passam por alívio de tensão em matrizes de acabamento a frio
T42	Solução tratada termicamente a partir de TT O ou F para demonstrar a resposta ao tratamento
T62	Solução tratada termicamente a partir do temperamento O ou F para demonstrar a resposta ao tratamento térmico e envelhecido artificialmente

2.7. Liga de Alumínio AA2024

As ligas de alumínio-cobre-magnésio foram as primeiras a demonstrar a capacidade de endurecimento por precipitação, constituindo um marco significativo na metalurgia dos metais leves. A primeira liga desse grupo foi a AA2017, composta por aproximadamente 4% de cobre, 0,6% de magnésio e 0,7% de manganês. Posteriormente, foi desenvolvida a liga AA2024, que se tornou amplamente utilizada na indústria devido à sua excelente relação resistência-peso, combinada com boas propriedades de conformabilidade e desempenho estrutural, sendo especialmente valorizada nas aplicações aeroespaciais e aeronáuticas [134].

Como apresentado na Tabela 2, o cobre é o principal elemento de liga da série 2XXX, seguido pelo magnésio em menor proporção. Essas ligas necessitam de tratamentos térmicos específicos, como a solubilização e o envelhecimento, para aprimorar suas propriedades mecânicas por meio da formação e dispersão homogênea de precipitados endurecedores na matriz metálica. Esses precipitados atuam como barreiras ao movimento das discordâncias, aumentando a resistência mecânica sem comprometer significativamente a ductilidade do material.

A série 2XXX pode ser subdividida em dois grupos principais, dependendo do teor de magnésio presente. Ligas como AA2017, AA2025 e AA2219 apresentam teores relativamente baixos de magnésio, enquanto ligas que possuem concentrações superiores a 1,0% em peso, como AA2024 e AA2618, contêm cerca de 1,5% e 1,6% de magnésio, respectivamente. A diferença fundamental entre as ligas AA2024 e AA2618 reside na fase responsável pelo endurecimento por precipitação. Na liga AA2024, a fase predominante é a θ-(Al_2Cu), enquanto na liga AA2618, devido ao maior teor de magnésio, a fase endurecedora predominante é a S-(Al_2CuMg), promovendo diferentes propriedades mecânicas [134].

Nas últimas décadas, a segurança e a durabilidade estrutural das aeronaves tornaram-se fatores críticos, demandando ligas metálicas com características específicas, tais como elevada tenacidade à fratura, alta resistência à fadiga, resistência ao dano e maior durabilidade operacional. Apesar do aumento no uso de materiais compósitos nos últimos anos, liga AA2024 continua sendo extensivamente utilizada na fabricação de estruturas externas de fuselagens aeronáuticas e aeroespaciais. Suas principais vantagens incluem uma elevada resistência mecânica, uma excelente relação resistência-peso e a capacidade de formar uma camada

passivadora natural de óxido, com espessura típica entre 2 e 10 nm, que proporciona proteção eficiente contra agentes oxidantes, aumentando a vida útil dos componentes estruturais [135].

A liga AA2024 emprega o mecanismo de endurecimento por solução sólida, um dos métodos mais eficazes para aumentar a resistência mecânica das ligas metálicas. Esse mecanismo envolve a adição de elementos de liga estrategicamente selecionados, cujos átomos solutos interagem com a rede cristalina do alumínio, provocando distorções locais que dificultam a movimentação das discordâncias. Quando os átomos de soluto possuem raio atômico menor que o dos átomos da matriz, a deformação gerada é predominantemente trativa; quando os átomos de soluto são maiores, ocorre uma deformação compressiva da rede cristalina. Esse efeito contribui diretamente para o aumento da resistência do material.

O diagrama de fases do sistema binário Al-Cu, representado na Figura 2.10, ilustra a solubilidade do cobre na matriz de alumínio, demonstrando que sua solubilidade diminui progressivamente com a redução da temperatura, até a formação da segunda fase θ-(Al_2Cu). Para maximizar a resistência mecânica da liga AA2024, é essencial seguir três etapas no tratamento térmico. A solubilização ocorre em alta temperatura no campo monofásico $\propto$, onde o cobre é dissolvido na matriz de alumínio, formando uma solução sólida homogênea. Em seguida, a têmpera é caracterizada pelo resfriamento rápido da liga, promovendo a retenção da solução supersaturada de cobre em temperatura ambiente. Esse processo inibe a precipitação imediata da fase endurecedora θ-(Al_2Cu), mantendo a liga em um estado metaestável. Durante o envelhecimento, ocorre a precipitação controlada da fase θ-(Al_2Cu), promovendo um aumento significativo da resistência mecânica da liga [134].

Além das suas excelentes propriedades mecânicas e estruturais, a liga AA2024 apresenta desafios significativos relacionados à usinabilidade. A presença de cobre em sua composição química aumenta a tendência de formação de aresta postiça de corte (APC), fenômeno em que fragmentos do material usinado aderem à superfície da ferramenta, modificando a geometria efetiva do corte e prejudicando a precisão dimensional e a qualidade superficial da peça produzida. Adicionalmente, a elevada ductilidade dessa liga promove a geração de cavacos longos e contínuos, dificultando a evacuação eficaz do material removido durante o processo de usinagem e aumentando o risco de danos às ferramentas de corte [136].

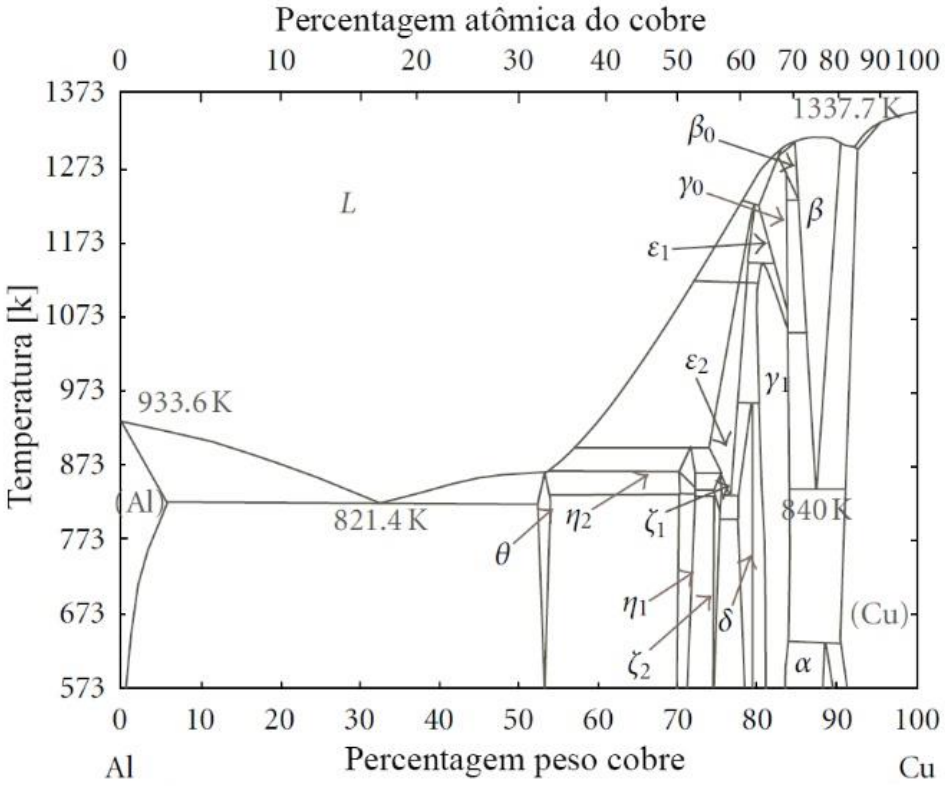


Figura 2.11: Diagrama do sistema binário Al-Cu [192].

De acordo com Asato [137], a formação e a natureza dos precipitados em ligas da classe Al-Cu-Mg são diretamente influenciadas pela relação entre os teores de cobre e magnésio. Quando o teor de magnésio é reduzido ou a razão Cu/Mg é elevada, a fase predominante no endurecimento da liga é a θ-(Al_2Cu). No caso de uma relação Cu/Mg igual ou superior a 8, os precipitados endurecedores dominantes pertencem exclusivamente à fase θ. Para valores intermediários, compreendidos entre 4 e 8, observa-se a coexistência das fases θ e S-(Al_2CuMg). Já quando a razão Cu/Mg varia entre 1,5 e 4, a fase S torna-se predominante, sendo esta caracterizada por sua elevada resistência a altas temperaturas.

O comportamento de precipitação dessas fases obedece a sequências distintas, conforme descrito nas Equações 2.14 e 2.15:

Precipitação da fase θ-(Al_2Cu): SSS → GP → θ" → θ' → θ-(Al_2Cu) (2.14)

Precipitação da fase S-(Al_2CuMg): SSS → GPB → S" → S' → S-(Al_2CuMg) (2.15)

Onde SSS refere-se à solução sólida supersaturada, GP e GPB representam zonas de Guinier-Preston, enquanto os estágios intermediários θ", θ', S" e S' correspondem a fases metaestáveis que precedem a formação dos precipitados finais θ-(Al_2Cu) e S-(Al_2CuMg).

Conforme estabelecido pela norma ASTM-B221-14, a razão Cu/Mg nas ligas da série 2XXX deve estar dentro do intervalo de 2,1 a 4,0, garantindo um equilíbrio adequado entre resistência mecânica e estabilidade estrutural [138].

Durante o tratamento térmico de envelhecimento artificial, os átomos de soluto inicialmente permanecem coerentes com a matriz de alumínio, formando as zonas de Guinier-Preston (GP). Essas zonas atuam como precursoras dos precipitados metaestáveis e desempenham um papel essencial no aumento da resistência mecânica da liga. Com o avanço do envelhecimento, as zonas GP são progressivamente convertidas em precipitados intermediários, como as fases θ″ e θ′, que mantêm coerência com a matriz e induzem intensa distorção na rede cristalina, contribuindo para o endurecimento do material [139].

Essa distorção dificulta significativamente o movimento das discordâncias, promovendo o endurecimento da liga. De forma análoga, as fases S" e S' apresentam comportamento coerente com a matriz, contribuindo para o aumento da resistência mecânica por meio do mesmo mecanismo de obstrução da movimentação das discordâncias. Entretanto, com o tempo de envelhecimento prolongado, as fases θ' e S' evoluem e gradualmente perdem coerência com a matriz, levando à formação dos precipitados termodinamicamente estáveis θ-(Al_2Cu) e S-(Al_2CuMg), que apresentam menor eficiência no endurecimento da liga [140].

A microestrutura da liga AA2024 é altamente complexa, consistindo em uma matriz de alumínio e uma variedade de fases intermetálicas. Aproximadamente 60% dessas fases correspondem a partículas da fase S-(Al_2CuMg), além de compostos intermetálicos contendo Al-Cu-Fe-Mg. Além dessas partículas secundárias desejáveis, a liga também apresenta partículas primárias de maiores dimensões, que são consideradas indesejáveis, pois podem crescer excessivamente e apresentar dificuldades na dissolução completa durante o processo de solubilização. Esse fenômeno compromete a homogeneidade microestrutural e pode impactar negativamente o desempenho mecânico do material [140].

A liga AA2024 também forma compostos intermetálicos insolúveis sobretudo devido a presença dos elementos, como ferro (Fe) e silício (Si), os quais, ao se combinarem com outros elementos de liga, formam fases intermetálicas estáveis, tais como o composto Al_7Cu_2Fe. Essas fases insolúveis não sofrem transformações de fase e sua morfologia, distribuição e tamanho são determinados por fatores como taxa de solidificação, composição química e processos de

deformação termomecânica. Por não apresentarem coerência com a matriz, essas partículas não contribuem para o endurecimento por precipitação e, em alguns casos, podem comprometer a resistência da liga. Em particular, a presença dessas fases insolúveis pode reduzir a resistência à fadiga, pois atuam como sítios preferenciais para a nucleação e propagação de trincas devido à sua baixa energia interfacial, favorecendo o processo de fratura [140].

Além dos precipitados e das fases insolúveis, os dispersoides desempenham um papel fundamental na estabilidade microestrutural da liga AA2024. Esses dispersoides consistem em precipitados finos, com dimensões inferiores a 1 μm, que têm a capacidade de retardar ou até mesmo inibir a recristalização estática. Sua formação ocorre predominantemente durante os processos de solidificação e recozimento, sendo resultado da interação do alumínio com elementos como cromo (Cr), manganês (Mn) e zircônio (Zr), os quais apresentam baixa solubilidade na matriz. Devido ao seu efeito na estabilização microestrutural, os dispersoides são de extrema importância para o controle do tamanho de grão, melhorando a resistência da liga ao crescimento de grãos durante os ciclos térmicos e contribuindo para a manutenção da coerência da matriz [140].

3. Materiais e Métodos

3.1. Material da Amostra

As amostras utilizadas neste estudo foram extraídas de uma barra cilíndrica de liga de alumínio AA2024, com diâmetro nominal de ¾ de polegada. A caracterização da composição química do material foi realizada por meio de análise espectroscópica utilizando uma pistola de fluorescência de raios X. Os resultados dessa análise, detalhados na Tabela 7, possibilitaram a identificação precisa dos elementos de liga presentes, garantindo a conformidade do material

com as especificações normativas. A composição química de acordo com a norma ASTM B209 [141] está descrita na Tabela 3.1

Tabela 3.1: Tabela de composição química.

Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Pb	Zn	Si	Ni	Cr	Zr	V
89.05	5.66	2.91	1.16	0.34	0.27	0.16	0.11	0.07	0.06	0.06	0.04

A composição química padrão da liga de alumínio AA2024 (em % em peso), conforme especificado pela norma ASTM B209, é apresentada na Tabela 3.2:

Tabela 3.2: Composição química padrão da liga de alumínio AA2024 (em % em peso), conforme especificado pela norma ASTM B209

Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Pb	Zn	Si	Ni	Cr	Zr	V
Balanço	3.8 – 4.9	1.2 – 1.8	0.3 – 0.9	≤ 0.50	≤ 0.05	≤ 0.25	≤ 0.50	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.25	≤ 0.15

Foi realizada uma análise metalográfica da amostra com o objetivo de examinar sua microestrutura e caracterizar a distribuição das fases intermetálicas e os contornos de grão. O procedimento seguiu uma sequência padronizada, incluindo as etapas de lixamento, utilizando lixas de carbeto de silício de granulometrias progressivas, seguido de polimento com suspensão de alumina e óxido de cério, visando obter uma superfície com baixo nível de rugosidade e livre de deformações mecânicas residuais.

Para a revelação da microestrutura, foi aplicado o ataque químico utilizando o reagente Kroll's, cuja composição consiste em 92 mL de água destilada, 6 mL de ácido nítrico e 2 mL de ácido hidrofluorídrico. A amostra foi imersa na solução por um tempo controlado de 15 segundos, garantindo a revelação adequada das características microestruturais sem promover super ataque ou dissolução excessiva das fases intermetálicas.

A microestrutura resultante foi analisada por microscopia óptica e está apresentada na Figura 3.1, onde se pode observar a condição da liga AA2024 no estado como recebido, evidenciando a influência dos tratamentos térmicos prévios e da composição química na

formação das fases secundárias. Não foram observadas deformações decorrentes de processos de fabricação.

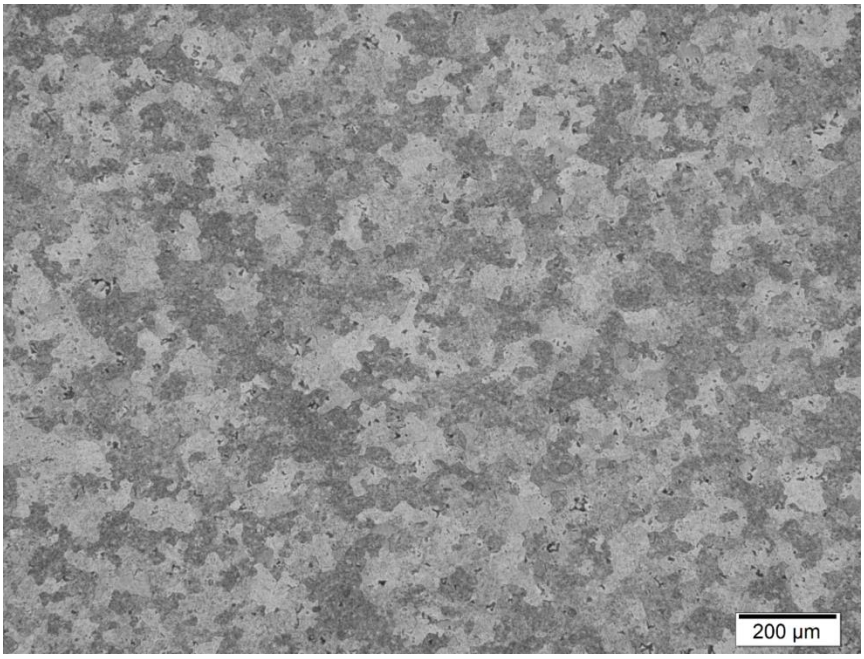


Figura 3.1: Microestrutura da Liga AA2024, com aumento de 100x.

3.2. Microdureza Vickers (HV)

Com o objetivo de caracterizar a liga AA2024 na condição como recebida, foi realizado um ensaio de Microdureza Vickers (HV), utilizando uma carga de 200 g, partindo do centro da seção transversal da amostra em direção à superfície. A motivação para esse ensaio foi avaliar possíveis variações na microdureza ao longo da espessura do material, uma vez que diferenças nos valores medidos podem ocorrer devido ao processo de conformação a quente, como a trefilação, que pode introduzir gradientes de encruamento e variações microestruturais entre a superfície e o interior da amostra.

A análise de microdureza foi realizada ao longo de uma linha transversal na seção da amostra, com o objetivo de avaliar a variação das propriedades mecânicas em função da distância do centro da amostra até a superfície. As medições foram feitas ponto a ponto, iniciando-se no centro da amostra e avançando progressivamente até a região mais superficial da peça.

A Tabela 3.3 apresenta os valores obtidos para cada ponto de indentação, sendo a primeira linha correspondente à medição no centro da amostra e a última linha referente à medição mais próxima da superfície externa. Os resultados obtidos nos ensaios de microdureza Vickers (HV), indicam uma distribuição homogênea da dureza ao longo da seção transversal da amostra, evidenciando a uniformidade microestrutural do material. No entanto, observou-se que a medida realizada mais próxima à superfície apresentou um valor de 161,3 HV, correspondendo a um aumento de aproximadamente 6 a 7% em relação à média dos demais valores registrados.

Tabela 3.3: Perfil de microdureza Vickers.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	σ
152,4	143,5	147,7	155,3	145,0	155,3	158,1	153,2	153,5	161,3	152,5	5,6

Essa análise é essencial para verificar a homogeneidade das propriedades mecânicas do material, garantindo que possíveis variações na dureza não comprometam o desempenho durante o processo de usinagem. Os valores de microdureza obtidos estão detalhados na Tabela 8, servindo como referência para posterior comparação com os valores medidos após a realização do microfresamento, permitindo avaliar o impacto do processo de usinagem na dureza do material.

3.3. Ensaios de Microusinagem

O procedimento experimental de microusinagem foi conduzido no Laboratório de Microusinagem Mecânica e Análise de Superfície (CEFCON), pertencente ao Centro de Estudos em Fabricação e Comando Numérico (CEFCON) da COPPE/UFRJ. Esse laboratório é dedicado ao estudo avançado de processos de microusinagem, com ênfase na caracterização de materiais, análise de integridade superficial e otimização de parâmetros de usinagem para aplicações de alta precisão.

A máquina-ferramenta utilizada para a realização dos ensaios foi a microfresadora CNC Mini-Mill/GX, fabricada pela Minitech Machinery Corporation, conforme ilustrado na

Figura3.2. Esse equipamento foi selecionado devido à sua alta precisão e estabilidade, características essenciais para garantir a confiabilidade dos resultados experimentais.



Figura 3.2: Microfresadora CNC Mini- Mill/GX (CEFCON)

Segundo as especificações do fabricante, a Mini-Mill/GX é equipada com componentes de elevada qualidade, incluindo rolamentos lineares de esferas e fusos de esferas de precisão, que permitem deslocamentos controlados com mínima folga mecânica, garantindo elevada repetibilidade e exatidão nos movimentos da ferramenta de corte. A estrutura do equipamento foi projetada para minimizar efeitos adversos, como vibrações e desvios térmicos, assegurando um controle dimensional rigoroso durante a microusinagem.

Um dos principais diferenciais estruturais dessa microfresadora é a composição da sua base, fabricada em granito natural. O uso desse material se justifica por suas propriedades intrínsecas, que combinam elevada rigidez mecânica e excelente capacidade de amortecimento de vibrações. Essa característica é essencial para a microusinagem, uma vez que processos nessa escala são altamente sensíveis a vibrações e flutuações térmicas, que podem comprometer a qualidade dimensional das peças usinadas e a vida útil das microferramentas. Além disso, a base horizontal e vertical da máquina passa por um rigoroso processo de retificação e polimento

de alta precisão, atingindo tolerâncias micrométricas, o que contribui para a estabilidade operacional e a precisão do posicionamento da ferramenta.

A combinação desses fatores torna a Mini-Mill/GX uma plataforma altamente confiável para a realização de experimentos de microusinagem de alta precisão, permitindo a obtenção de superfícies usinadas com qualidade superior e garantindo a reprodutibilidade dos ensaios.

A programação do Comando Numérico Computadorizado (CNC) foi realizada por meio do software Mach3Mill, amplamente utilizado na indústria para o controle de máquinas-ferramenta. Esse software permite a programação e execução de trajetórias de usinagem com elevada precisão e pode ser instalado em computadores convencionais que atendam aos requisitos mínimos de hardware definidos pelo fabricante, operando em plataforma Windows. A interface do Mach3Mill possibilita a configuração detalhada dos parâmetros de corte e controle do deslocamento dos eixos da máquina-ferramenta, garantindo a execução precisa dos percursos programados.

A medição das forças de corte durante o microfresamento foi realizada utilizando um sistema de aquisição de dados altamente sensível, composto por um dinamômetro piezoelétrico Kistler modelo 9256C2, um amplificador de carga Kistler 5070A10100, uma placa de aquisição de dados National Instruments NI USB-6551 e um microcomputador equipado com o software LabView Signal Express 2012, responsável pelo registro e processamento dos sinais adquiridos.

O dinamômetro Kistler 9256C2 foi rigidamente fixado à mesa da máquina-ferramenta por meio de parafusos Allen M4, garantindo estabilidade e minimizando possíveis influências de vibrações no sinal medido. Esse equipamento é projetado para a medição simultânea das três componentes ortogonais de força (Fx, Fy e Fz), com uma faixa de medição de -250 N a 250 N em cada direção, alta sensibilidade e dimensões compactas de 80 x 91 x 25 mm, características que o tornam ideal para aplicações em microusinagem. A peça a ser usinada foi fixada diretamente sobre a superfície superior do dinamômetro, utilizando os furos roscados M3, garantindo uma montagem robusta e precisa.

Os sinais de carga gerados pelos sensores piezoelétricos do dinamômetro foram transmitidos ao amplificador de carga Kistler 5070A10100 por meio de um cabo de conexão modelo Kistler 1697A5. O amplificador tem a função de converter os sinais de carga elétrica em sinais de tensão proporcionalmente ajustados, permitindo que sejam processados digitalmente. Antes do início da aquisição dos dados, o amplificador foi configurado de acordo com as sensibilidades específicas do dinamômetro para cada componente de força, conforme indicado na carta de calibração fornecida pelo fabricante. Além disso, foi definida a faixa de

amplificação adequada, assegurando que os sinais obtidos permanecessem dentro dos limites operacionais do equipamento e não sofressem distorções.

Após a amplificação, os sinais analógicos foram encaminhados para a placa de aquisição de dados NI USB-6551, que realizou a conversão analógico-digital com alta resolução e transmitiu os dados ao microcomputador em tempo real. A configuração do sistema de aquisição foi realizada por meio do software LabView Signal Express 2012, que permitiu o ajuste da frequência de amostragem e a organização dos dados adquiridos em formato matricial. Cada registro continha três colunas, representando as componentes ortogonais de força (Fx, Fy e Fz), permitindo uma análise detalhada do comportamento dinâmico do processo de corte. Para garantir elevada resolução temporal e capturar com precisão as flutuações das forças de usinagem, a frequência de aquisição foi ajustada para 40.000 Hz, um valor adequado para detectar variações rápidas e capturar fenômenos transitórios com alta fidelidade.

Esse sistema de aquisição de dados viabilizou medições altamente precisas e confiáveis das forças de corte ao longo de todo o processo de microfresamento, fornecendo informações fundamentais para a análise da interação ferramenta-peça e para a avaliação do impacto dos parâmetros de corte na dinâmica do processo. A correta medição das forças é essencial para compreender fenômenos como a formação de APC, a degradação da ferramenta e os efeitos do efeito *plowing*, aspectos que influenciam diretamente a qualidade da superfície usinada e a vida útil da ferramenta.

A fixação da amostra sobre o dinamômetro foi projetada de forma a garantir estabilidade e minimizar deslocamentos indesejados durante a usinagem. Para isso, foram utilizados parafusos M3x14 distribuídos estrategicamente nas extremidades e no centro da amostra, conforme esquematizado na Figura 3.3. Essa configuração foi adotada para assegurar um

contato homogêneo entre a peça e o dinamômetro, evitando interferências que pudessem comprometer a precisão das medições das forças de corte.

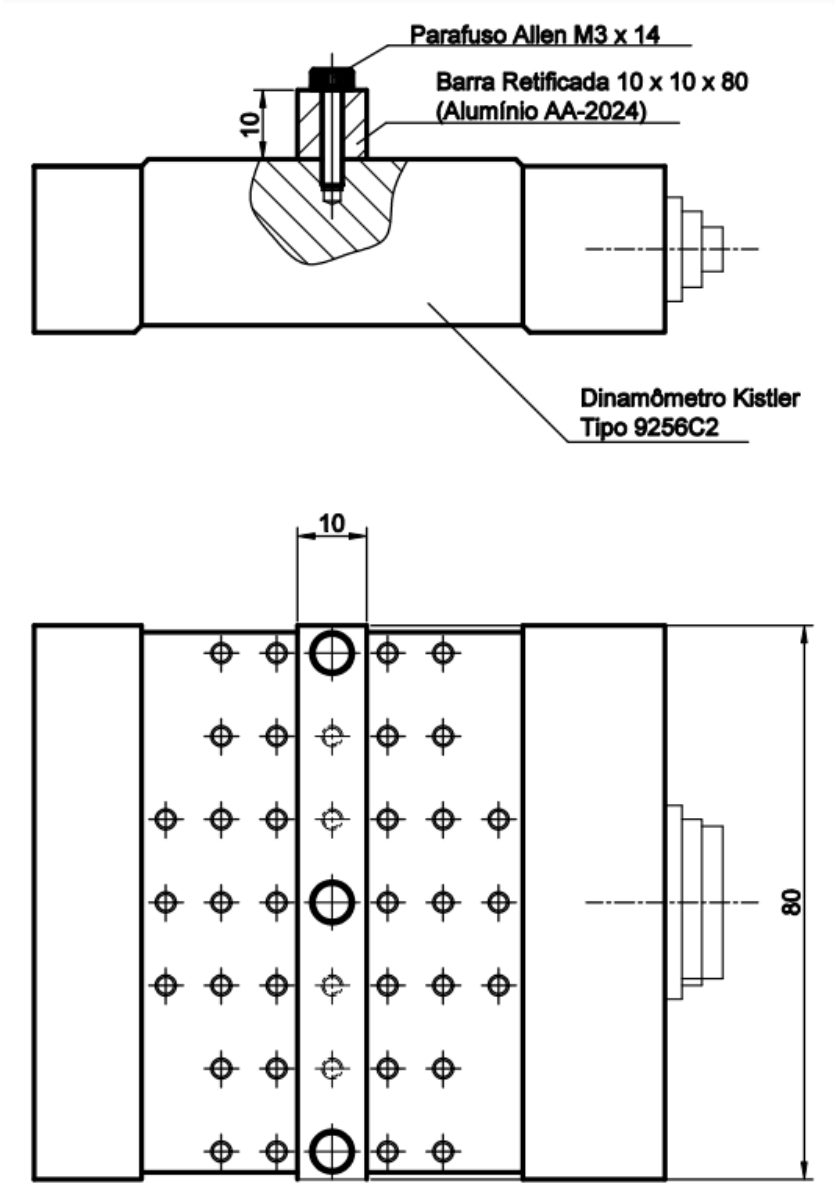


Figura 3.3: Montagem da amostra sobre o dinamômetro, unidade: mm.

A Figura 3.4 ilustra a configuração experimental utilizada no estudo, permitindo a visualização detalhada da mesa da microfresadora, bem como da fixação do dinamômetro sobre

sua superfície. O dinamômetro, rigidamente montado à mesa por meio de parafusos de fixação, garante a estabilidade necessária para medições precisas das forças de corte.

Sobre o dinamômetro, observa-se a amostra devidamente fixada por meio de parafusos rosqueados, assegurando um posicionamento estável e evitando deslocamentos durante a usinagem. Além disso, a imagem evidencia a microfresa de 0,8 mm de diâmetro, posicionada corretamente para a realização dos ensaios, destacando a precisão necessária para o processo de microfresamento. A configuração adotada visa minimizar interferências externas e garantir a confiabilidade dos dados adquiridos durante o monitoramento das forças de corte.

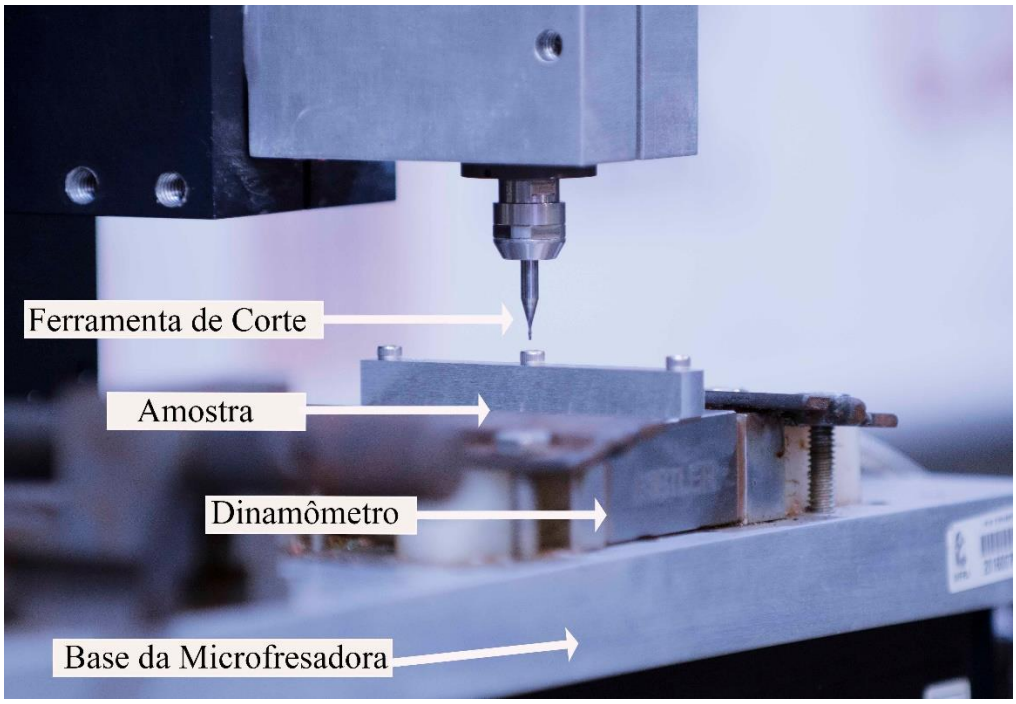


Figura 3.4: Montagem da amostra sobre o dinamômetro

3.4. Ferramenta de Corte

As ferramentas de corte empregadas neste estudo foram microfresas inteiriças de metal duro, modelo MS2JSD0080, fabricadas pela *Mitsubishi Materials Corporation*. Esse modelo foi escolhido devido à sua elevada precisão e resistência ao desgaste, características essenciais para a microusinagem de ligas metálicas de alta performance, como a liga AA2024.

A microfresa possui um diâmetro de corte de 0,8 mm, sendo projetada especificamente para operações de microfresamento de alta precisão. O revestimento aplicado à ferramenta é de Nitreto de alumínio titânio (TiAlN), identificado pelo código F no catálogo do fabricante. Esse

revestimento, depositado por meio do processo PVD (*Physical Vapor Deposition*) em multicamadas, proporciona significativa resistência ao desgaste, elevada dureza superficial e excelente estabilidade térmica, tornando a ferramenta altamente eficaz em condições de corte severas e sob altas temperaturas.

3.5. Parâmetros de corte utilizados

A definição dos parâmetros de corte para este estudo foi baseada em referências da literatura que utilizaram materiais e ferramentas compatíveis com as condições experimentais adotadas [197, 198]. Os valores selecionados estão apresentados na Tabela 3.4, sendo estabelecidos com o objetivo de investigar as condições mais adequadas para otimizar a integridade superficial da peça usinada, tanto em relação à rugosidade quanto à formação de rebarbas.

Tabela 3.4: Parâmetros de corte.

RPM	v_c (m/min)	a_p (mm)	f_z(µm/z)	v_f(mm/min)
30.000	75	0,1	0,3	20
30.000	75	0,1	0,5	30
30.000	75	0,1	1	60
30.000	75	0,1	1,5	90
30.000	75	0,1	2	120
30.000	75	0,12	2	120
30.000	75	0,15	2	120
20.000	50	0,1	2	80
10.000	25	0,1	2	40

A escolha criteriosa dos parâmetros de corte é essencial na microusinagem, uma vez que esse processo é caracterizado por fenômenos específicos em escala reduzida, como o efeito *plowing*, o efeito de escala e a influência da relação entre o raio da ponta da ferramenta e a espessura mínima de formação do cavaco. Dessa forma, os parâmetros adotados foram planejados para permitir a avaliação da transição entre remoção de material por cisalhamento e deformação plástica, possibilitando a análise detalhada das condições que favorecem uma usinagem eficiente e precisa da liga AA2024.

Além disso, a seleção dos parâmetros de corte considerou a necessidade de se estabelecer uma correlação entre a espessura mínima de formação do cavaco e o raio da ponta da ferramenta, uma relação fundamental para compreender o comportamento do material em

processos de microfresamento. A determinação dessa relação é crucial para prever o desempenho da ferramenta, reduzir o desgaste prematuro e minimizar efeitos indesejáveis na qualidade superficial da peça usinada.

Dessa forma, os valores selecionados na Tabela 8 foram definidos para garantir a confiabilidade dos resultados experimentais, permitindo uma análise quantitativa da influência dos parâmetros de corte na integridade superficial da liga AA2024, com enfoque na melhoria da qualidade final da usinagem e na otimização do desempenho do processo.

3.6. Integridade Superficial

Neste estudo, a análise da integridade superficial será realizada por meio de dois critérios principais: a rugosidade média (Ra) e a formação de rebarbas de topo. A rugosidade média será utilizada como parâmetro quantitativo para avaliar a qualidade do acabamento superficial, refletindo a interação entre os parâmetros de corte e a resposta do material durante o microfresamento. Já a formação de rebarbas será analisada qualitativamente, uma vez que a geração de rebarbas é um dos principais desafios em microusinagem e pode comprometer tanto a funcionalidade quanto a precisão dimensional da peça.

A relação entre efeito *plowing* e espessura mínima de formação do cavaco será considerada na análise da integridade superficial, buscando estabelecer correlações que permitam compreender os mecanismos envolvidos na geração de irregularidades superficiais e na formação de rebarbas. Além disso, a influência do desgaste da ferramenta sobre a qualidade da superfície usinada será investigada, uma vez que a degradação progressiva da aresta cortante pode impactar diretamente os valores de rugosidade e a morfologia das rebarbas.

Os resultados obtidos nesta etapa permitirão identificar as condições ótimas de corte para minimizar defeitos superficiais e aprimorar a qualidade da usinagem da liga AA2024, contribuindo para a definição de estratégias mais eficazes para o controle da integridade superficial em processos de microfresamento.

3.6.1. Análise de Rugosidade

A análise da rugosidade superficial foi realizada utilizando um Rugosímetro Portátil Mitutoyo Surftest SJ-210, um equipamento de alta precisão amplamente empregado para

medições de acabamento superficial. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Usinagem (LABUS) do CEFET/RJ, garantindo a rastreabilidade dos dados e a obtenção de medições confiáveis. O rugosímetro permitiu a quantificação dos parâmetros de rugosidade, como Ra (rugosidade média), Rt (altura total do perfil) e Rz (rugosidade média das cinco alturas mais altas e mais baixas do perfil), proporcionando uma análise detalhada da qualidade superficial da peça microusinada.

3.6.2. Formação de Rebarbas

Para a avaliação qualitativa das rebarbas, foi utilizado um microscópio óptico Olympus modelo BX60M, pertencente ao Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ. Esse equipamento permitiu a inspeção detalhada da morfologia das rebarbas, possibilitando a identificação de padrões de formação e a comparação entre diferentes condições de corte. As imagens obtidas foram analisadas para correlacionar a influência dos parâmetros de usinagem na geração das rebarbas e compreender os mecanismos predominantes na sua formação.

3.7. Ensaio de Microdureza Vickers

Os ensaios de microdureza Vickers (HV) foram conduzidos em temperatura ambiente (25°C) com o objetivo de caracterizar o material no estado como recebido, avaliando sua homogeneidade microestrutural e resistência mecânica superficial. A microdureza Vickers é um dos métodos mais utilizados para a caracterização de ligas metálicas, permitindo a determinação da dureza em regiões localizadas da amostra por meio da aplicação de uma carga controlada sobre um penetrador piramidal de diamante.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ, utilizando um Microdurômetro Vickers/Knoop da marca Instron-Wilson. A configuração experimental adotada incluiu a aplicação de uma carga de 200 g sobre a superfície da amostra, com um tempo de carregamento de 15 segundos, garantindo uma penetração estável do indentador e a formação de impressões bem definidas para posterior análise.

A escolha dessa carga e tempo de aplicação foi baseada na necessidade de obter medições confiáveis da dureza do material, minimizando possíveis influências de recuperação elástica ou variações superficiais que pudessem comprometer a precisão dos resultados. A

medição das diagonais das impressões geradas pelo indentador permitiu a determinação do valor da dureza Vickers, possibilitando uma análise detalhada da resposta mecânica da liga AA2024 antes da realização dos processos de microfresamento.

Os dados obtidos a partir desses ensaios foram posteriormente comparados com os valores medidos após a usinagem, permitindo a avaliação dos possíveis efeitos do microfresamento sobre a dureza do material e sua integridade superficial.

4. Resultados e Discussão

4.1. Ferramenta de Corte

A geometria da ferramenta é composta por duas arestas de corte helicoidais, com um ângulo de hélice de 30°, que favorece a evacuação eficiente dos cavacos e contribui para a redução das vibrações durante o corte. Esse design geométrico é essencial para minimizar forças excessivas na interface ferramenta-peça, melhorar a qualidade da superfície usinada e evitar falhas prematuras da ferramenta.

O diâmetro da haste da microfresa é de 4 mm, o que possibilita uma fixação estável e segura no porta-ferramentas, reduzindo a deflexão e garantindo maior precisão dimensional durante a usinagem. O comprimento total da ferramenta é de 40 mm, enquanto o comprimento de corte útil é de 2,2 mm, parâmetros que a tornam adequada para operações em geometrias reduzidas e componentes micrométricos.

A Figura 3.5 ilustra a configuração da microfresa utilizada no estudo, evidenciando sua geometria e dimensões. Essas características tornam a ferramenta particularmente apropriada para aplicações de microfresamento de alta precisão em ligas de alumínio, garantindo um desempenho otimizado na usinagem da liga AA2024, objeto de análise deste estudo.

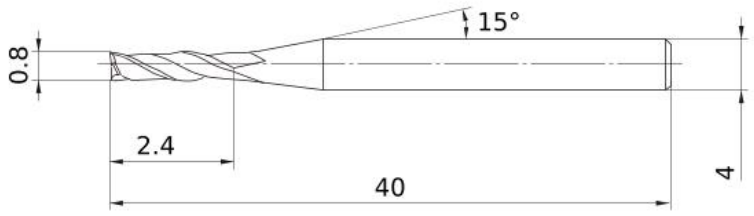


Figura 4.1: Dimensões da microfresa, unidade: mm [142] .

A composição químicas das microfresas utilizadas no estudo foram inicialmente fornecidas pelo fabricante e posteriormente verificadas através de EDS, a fim de garantir a

conformidade dos materiais empregados e a precisão dos dados experimentais. Para essa caracterização, foram utilizadas técnicas de MEV associadas à Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), permitindo uma avaliação detalhada da composição elementar tanto do substrato de metal duro quanto do revestimento protetor aplicado à ferramenta.

As análises foram conduzidas no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ, utilizando um MEV de alta resolução, equipado com um sistema de EDS para mapeamento dos elementos presentes na superfície da ferramenta. Essa abordagem possibilitou a identificação dos constituintes do substrato de metal duro, bem como a validação da composição do revestimento de Nitreto de Alumínio Titânio (TiAlN), cuja estrutura multicamada é projetada para aumentar a resistência ao desgaste, reduzir a adesão de material da peça à ferramenta e proporcionar maior estabilidade térmica durante o processo de microusinagem.

A Figura 3.6 apresenta o espectro obtido por EDS, evidenciando os elementos presentes na camada de revestimento, permitindo a confirmação da homogeneidade química e da integridade do filme protetor aplicado à ferramenta de corte.

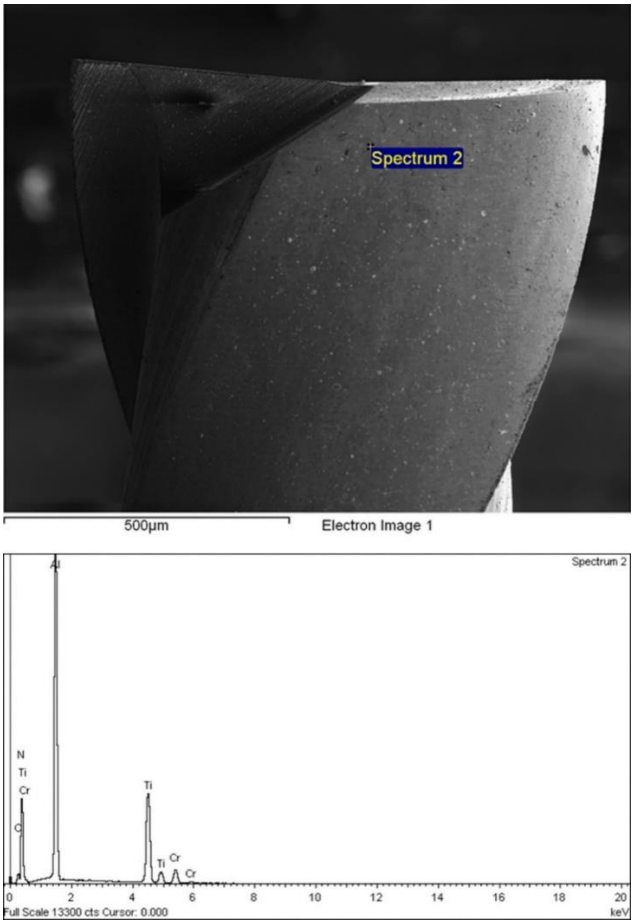


Figura 4.2: EDS realizado na microfresa diâmetro de 0.8 mm.

Adicionalmente, foi realizada a medição do raio da ponta da ferramenta, Figura 3.7, uma vez que esse parâmetro influencia diretamente na espessura mínima de corte e, consequentemente, no comportamento do material durante o microfresamento. O raio da ponta da ferramenta tem papel fundamental na transição entre a remoção de material por cisalhamento e o efeito *plowing*, impactando diretamente na integridade superficial da peça usinada e na eficiência do processo.

As medições foram conduzidas em microfresas de 0,8 mm de diâmetro, utilizando técnicas de metrologia avançada para garantir precisão nos valores obtidos. Os resultados indicaram que o raio de ponta médio medido foi de 2,20 μm, um valor condizente com especificações típicas para microferramentas desta categoria. A análise desses valores permite avaliar a influência da relação entre o raio da ponta da ferramenta e a espessura do cavaco não removido, auxiliando na interpretação dos efeitos gerados pela microusinagem em escala reduzida.

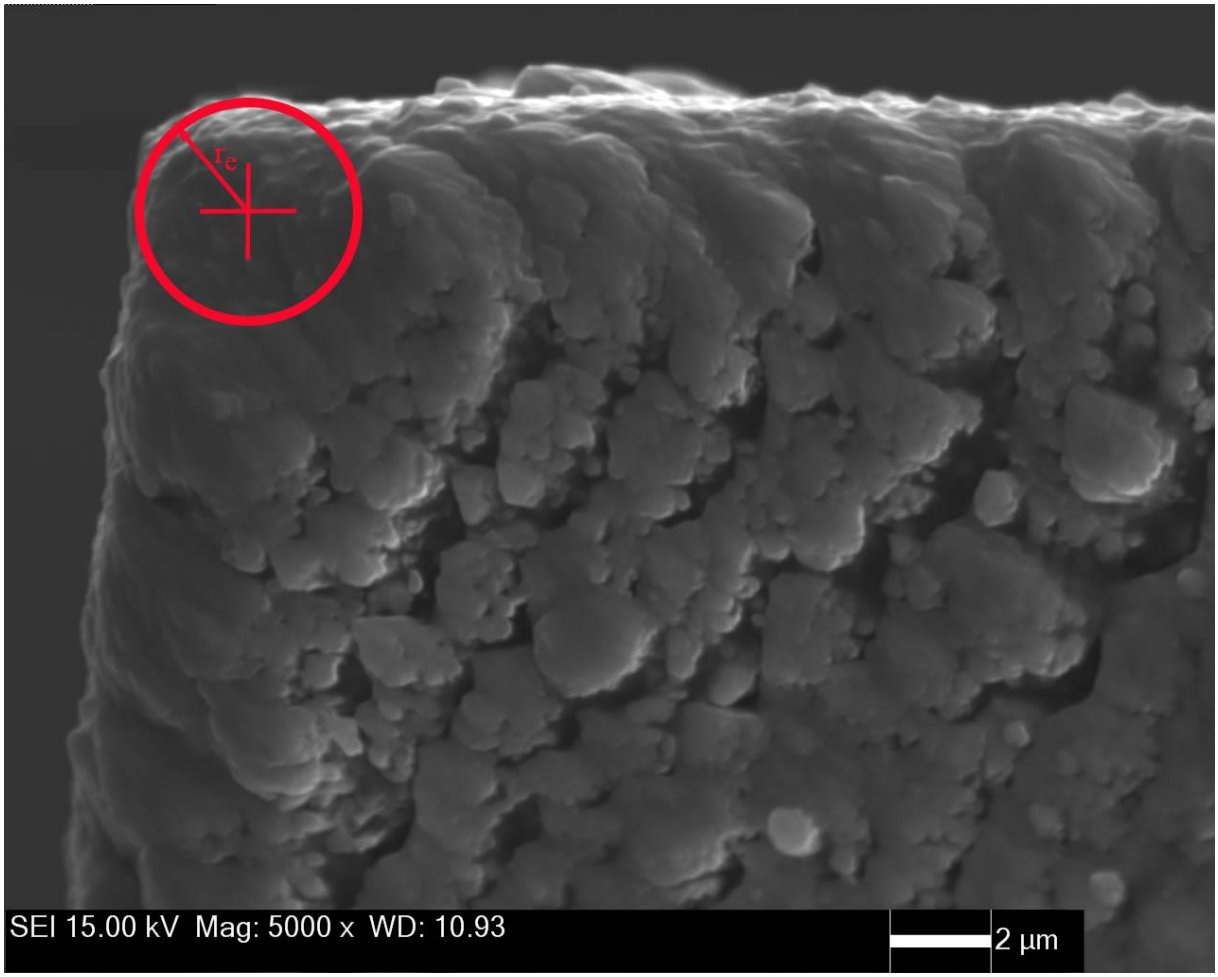


Figura 4.3: Medição do raio de ponta na ferramenta de 0.8mm

4.2. Forças de Usinagem

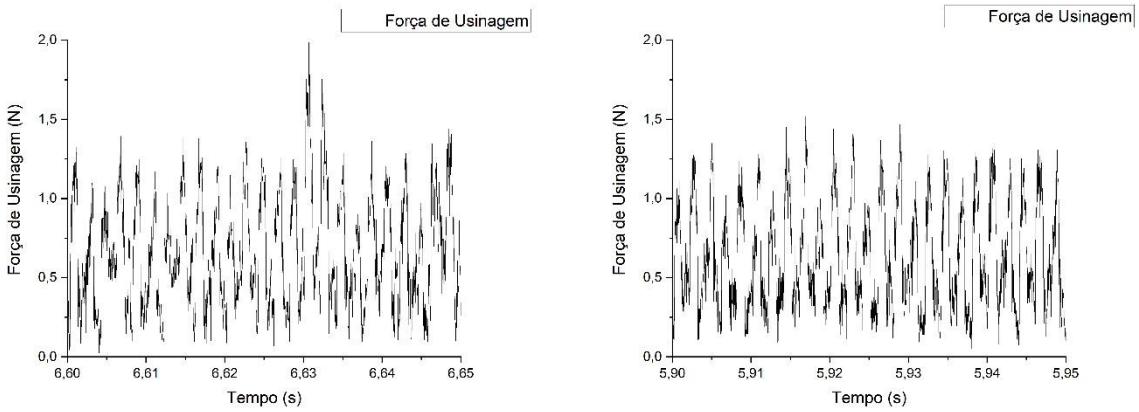
A análise das Forças de Usinagem (FU) foi conduzida com o objetivo de investigar a influência dos parâmetros de corte no microfresamento da liga AA2024, com ênfase na avaliação do comportamento dessas forças na presença do efeito *plowing*. Esse efeito ocorre quando a espessura do cavaco não removido é inferior ao valor crítico necessário para o cisalhamento efetivo do material, resultando em um aumento expressivo das forças de corte devido à predominância da deformação plástica sobre a remoção eficiente do cavaco.

A aquisição das forças de usinagem foi realizada utilizando o dinamômetro piezoelétrico Kistler 9256C2, que permitiu a medição simultânea das três componentes ortogonais de força (Fx, Fy e Fz). Os valores obtidos foram posteriormente processados e utilizados para o cálculo da força resultante, a Força de Usinagem (FU), a partir da Equação 2.13, que combina as

contribuições das três componentes de força medidas pelo dinamômetro. Essa abordagem permitiu uma análise detalhada das variações na intensidade das forças em função dos diferentes parâmetros de corte aplicados.

Para uma avaliação mais precisa do comportamento dinâmico das forças de usinagem, as médias das forças foram calculadas considerando a ampliação dos gráficos de força em 20 picos consecutivos, conforme ilustrado na Figura 4.1. Esse procedimento foi adotado para minimizar flutuações momentâneas e assegurar que os valores analisados representassem o comportamento médio do processo de microfresamento em condições estáveis.

A interpretação dos dados obtidos possibilitou identificar correlações entre os parâmetros de corte aplicados e as forças resultantes, fornecendo subsídios para compreender os mecanismos dominantes na formação do cavaco e na dissipação de energia durante a usinagem da liga AA2024. Além disso, a análise das forças permitiu avaliar a influência do desgaste progressivo da ferramenta e da adesão de material na interface ferramenta-peça, fatores que podem contribuir para a elevação das forças de corte e comprometer a qualidade superficial da peça usinada.



(a) $f_z = 1{,}5$ (μm/z) (b) $f_z = 2$ (μm/z)

Figura 4.4: Ampliação das Forças de Usinagem

4.2.1. Forças de usinagem com diferentes velocidades de avanço

A análise das forças de usinagem foi realizada considerando diferentes valores de velocidade de avanço (f), conforme ilustrado na Figura 4.2. A variação desse parâmetro impacta diretamente o comportamento do processo de microfresamento, influenciando não apenas a

magnitude das forças de corte, mas também a formação do cavaco, a interação ferramenta-peça e a integridade superficial da amostra usinada.

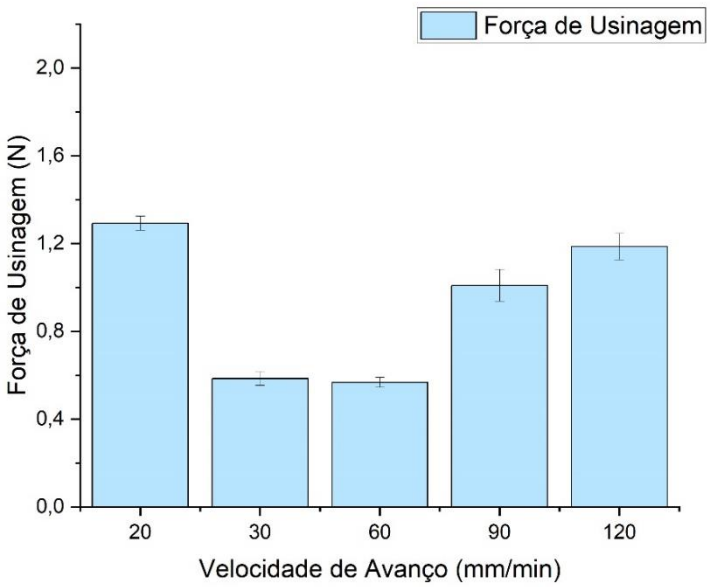


Figura 4.5: Forças de Usinagem em função de diferentes velocidades de avanço.

O aumento da velocidade de avanço está diretamente relacionado a uma maior taxa de remoção de material por unidade de tempo, o que demanda forças de usinagem mais elevadas para garantir a eficiência do corte. Em condições de microfresamento, essa relação torna-se ainda mais crítica, uma vez que pequenas variações no avanço por dente podem provocar mudanças expressivas na espessura do cavaco removido e na energia específica de corte. Quando a espessura do cavaco indeformado se aproxima do limite crítico de cisalhamento, observa-se um aumento acentuado do efeito *plowing*, intensificando as forças de corte devido à predominância da deformação plástica sobre a remoção eficiente do material [142].

Além disso, velocidades de avanço mais elevadas intensificam a resistência do material à penetração da ferramenta, exigindo maiores forças tangenciais e axiais para manter a estabilidade do processo. Esse aumento na solicitação mecânica pode acelerar o desgaste da ferramenta, amplificando o atrito na interface ferramenta-peça e elevando a geração de calor durante o corte. Como consequência, observa-se um crescimento na formação de rebarbas e no

aumento da rugosidade superficial, fatores que comprometem a qualidade final da peça usinada [143].

Os resultados obtidos indicam que a seleção adequada da velocidade de avanço é essencial para otimizar o equilíbrio entre eficiência do corte, desgaste da ferramenta e integridade superficial. A partir dos dados analisados, é possível correlacionar os valores de avanço adotados com a variação das forças medidas, permitindo a identificação de condições que favoreçam uma usinagem mais estável e controlada da liga AA2024.

Modelos teóricos e empíricos documentados na literatura [143] demonstram que as forças de usinagem são diretamente proporcionais à velocidade de avanço. Esse comportamento ocorre porque um maior avanço por dente resulta em um aumento na espessura do cavaco removido, elevando a resistência do material à penetração da ferramenta e, consequentemente, exigindo forças mais intensas para manter a estabilidade do processo. Portanto, compreender essa relação é essencial para a otimização dos parâmetros de corte, permitindo ajustes que maximizem a eficiência da usinagem e reduzam o desgaste da ferramenta.

Essa proporcionalidade entre as forças de usinagem e a velocidade de avanço pode ser observada no gráfico de barras, que ilustra o comportamento das forças quando a velocidade de avanço varia entre 30 mm/min e 120 mm/min. À medida que a velocidade de avanço aumenta, as forças de corte apresentam uma elevação gradual, acompanhando o aumento da taxa de remoção de material.

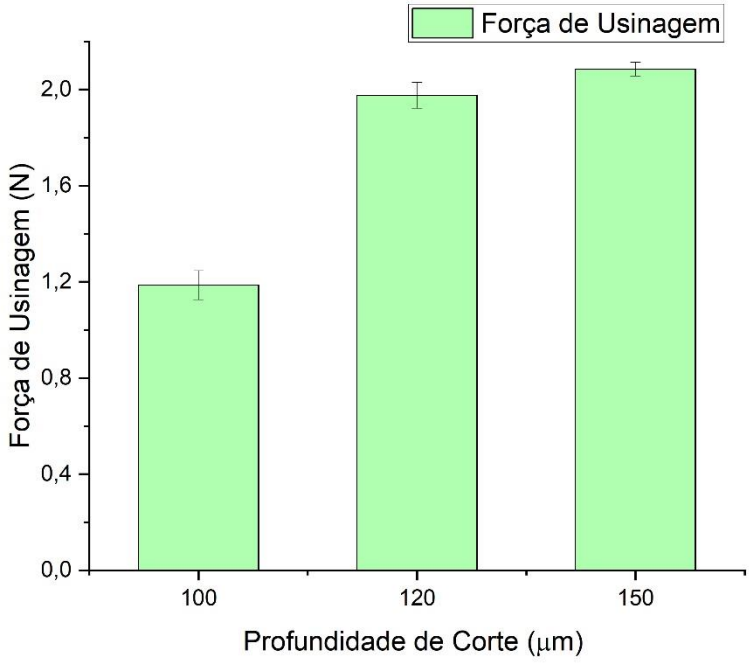
Por outro lado, em velocidades de avanço mais baixas, um fenômeno inverso pode ser observado: um aumento significativo das forças de usinagem devido à predominância do efeito *plowing*. Esse efeito ocorre quando a aresta de corte da ferramenta não consegue promover um cisalhamento eficiente do material, resultando em um deslocamento localizado da superfície usinada e intensificando a deformação plástica. Nessas condições, a ferramenta mantém contato prolongado com o material, favorecendo a recuperação elástica e levando a uma remoção ineficiente do material. Esse fenômeno eleva a energia específica de corte e aumenta a solicitação mecânica sobre a ferramenta e a peça usinada, reduzindo a eficiência do processo [144].

O aumento na resistência do material ao corte exige forças de usinagem mais elevadas para superar a ação da remoção ineficiente promovida pelo efeito *plowing* e viabilizar a remoção eficiente do material. Esse comportamento pode ser claramente observado no gráfico de barras, especialmente na coluna correspondente à velocidade de avanço de 20 mm/min, onde as forças de corte são consideravelmente superiores em relação a velocidades intermediárias.

Esse fenômeno evidencia o impacto do *plowing* no microfresamento da liga AA2024, destacando a importância de otimizar os parâmetros de corte para minimizar essa influência negativa [144].

4.2.2. Forças de usinagem em função da profundidade de corte

A análise das forças de usinagem foi conduzida considerando diferentes valores de profundidade de corte, conforme ilustrado na Figura 4.3. A profundidade de corte é um dos parâmetros mais influentes no comportamento das forças atuantes durante a usinagem, pois determina diretamente a quantidade de material removido por passagem da ferramenta, impactando tanto a estabilidade do processo quanto o desgaste da ferramenta e a integridade superficial da peça usinada [145].



A Figura 4.3 apresenta os resultados obtidos para as forças de usinagem em diferentes profundidades de corte, evidenciando a relação direta entre esse parâmetro e o aumento das forças atuantes no processo. A análise desses dados permite estabelecer correlações entre os parâmetros de corte e o desempenho da ferramenta, auxiliando na definição de condições ideais

para otimizar a estabilidade do microfresamento da liga AA2024 e minimizar desgastes prematuros da ferramenta.

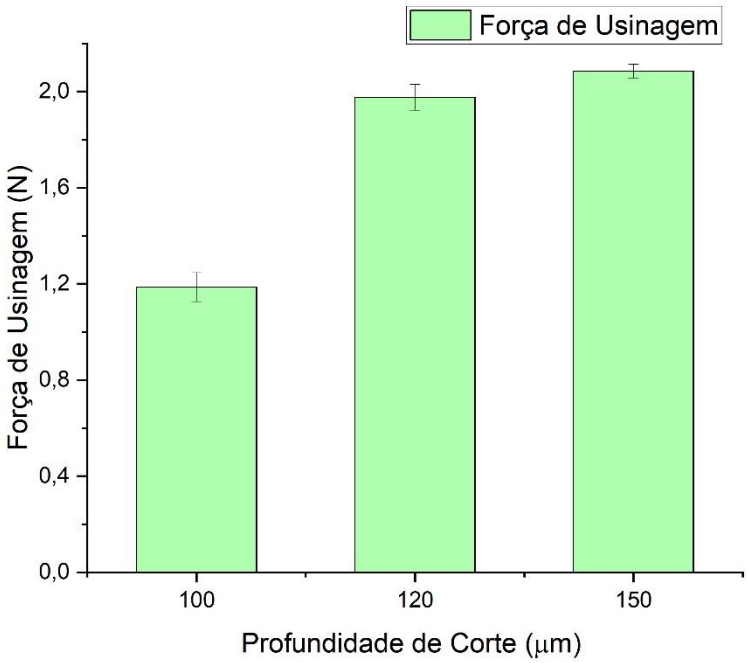


Figura 4.6: Forças de Usinagem em função da profundidade de corte.

Adicionalmente, o aumento da profundidade de corte tem um impacto significativo na camada de material submetida à zona de cisalhamento, tornando-a mais espessa e exigindo forças adicionais para promover a deformação e separação do cavaco. Esse fenômeno ocorre porque, à medida que a profundidade de corte cresce, a ferramenta interage com um maior volume de material, aumentando a resistência oposta pelo material ao avanço da ferramenta e, consequentemente, demandando maior energia para a remoção eficiente do cavaco.

Além disso, a distribuição das tensões dentro da zona de corte torna-se mais intensa à medida que a profundidade de corte aumenta, gerando forças compressivas elevadas que a ferramenta deve superar para manter a estabilidade do processo de usinagem. Esse aumento na solicitação mecânica pode resultar em uma intensificação do desgaste da ferramenta, reduzindo sua vida útil e impactando diretamente a qualidade do acabamento superficial da peça usinada [146, 147].

Modelos empíricos e teóricos validados na literatura [148, 149] confirmam a relação direta entre profundidade de corte e forças de usinagem, sendo essa correlação confirmada por

meio de diversos experimentos conduzidos sob diferentes condições operacionais. Dessa forma, a profundidade de corte se estabelece como um parâmetro crítico no processo de microfresamento, influenciando diretamente o comportamento das forças de usinagem, a integridade superficial da peça e a eficiência do processo. A correta seleção desse parâmetro é fundamental para otimizar a estabilidade da usinagem, minimizar o desgaste prematuro da ferramenta e aprimorar a precisão dimensional das peças produzidas.

4.2.3. Forças de usinagem em função das diferentes velocidades de rotação

A influência da velocidade de rotação do eixo-árvore sobre as forças de usinagem foi analisada considerando diferentes valores desse parâmetro, conforme ilustrado na Figura 4.4. A velocidade de rotação desempenha um papel fundamental na estabilidade do processo de microfresamento, pois impacta diretamente a interação entre a ferramenta de corte e o material, afetando a formação do cavaco, a dissipação de calor e a dinâmica das forças atuantes durante a usinagem.

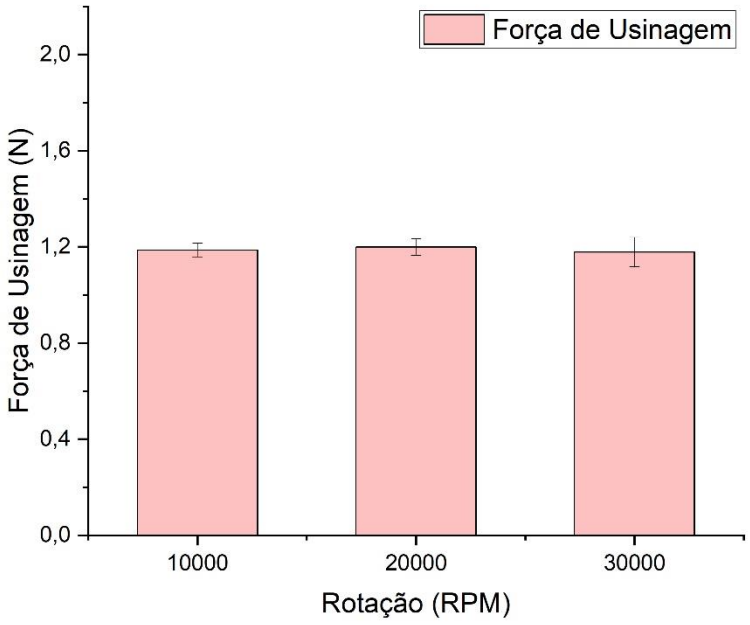
Os resultados demonstram que, embora a velocidade de rotação seja uma variável determinante no comportamento do processo de corte, as forças de usinagem tendem a apresentar uma relativa estabilidade em determinadas faixas operacionais, mesmo diante de variações na rotação do eixo-árvore. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que, em regimes de rotação mais elevados, há uma redução do tempo de contato entre a ferramenta e o material, minimizando a acumulação de calor na zona de corte e reduzindo a resistência oferecida pelo material ao avanço da ferramenta.

Além disso, a elevação da velocidade de rotação resulta em um aumento da velocidade de corte, o que pode contribuir para a melhoria da eficiência da remoção do cavaco e para a redução da energia específica de corte. No entanto, essa relação não é linear, pois velocidades excessivamente altas podem induzir efeitos térmicos adversos, como a intensificação do desgaste da ferramenta e a degradação da qualidade superficial da peça usinada.

Ao analisar a influência da rotação sobre as forças de corte, é necessário considerar a interação entre a velocidade de corte, o avanço por dente e a profundidade de corte, pois a variação de um desses parâmetros pode atenuar ou potencializar os efeitos da rotação sobre a estabilidade do processo. A Figura 4.4 apresenta os valores obtidos para as forças de usinagem

em função das diferentes velocidades de rotação, evidenciando a influência desse parâmetro sobre o comportamento dinâmico do microfresamento.

A correta seleção da velocidade de rotação é essencial para garantir um equilíbrio entre eficiência do corte, integridade superficial da peça e vida útil da ferramenta, permitindo a otimização do processo de usinagem e a obtenção de peças com melhor qualidade dimensional e acabamento superficial.



.

Figura 4.7: Forças de Usinagem em função da rotação do eixo-árvore.

A velocidade de rotação do eixo-árvore exerce um impacto direto sobre a distribuição térmica na zona de corte e o grau de deformação plástica do material durante a usinagem. No entanto, esses efeitos geralmente não resultam em variações expressivas nas forças de usinagem. Isso ocorre porque, apesar de a elevação da velocidade de corte favorecer a dissipação do calor gerado no processo, outros fatores exercem um papel mais preponderante na determinação das forças atuantes, como as propriedades mecânicas do material usinado e a geometria da ferramenta de corte [150].

A estabilidade das forças de usinagem está fortemente associada à manutenção de condições operacionais consistentes, incluindo parâmetros de corte bem definidos e materiais com propriedades mecânicas previsíveis e homogêneas. Essas condições asseguram que a remoção do cavaco ocorra de maneira controlada, minimizando a influência de variações

momentâneas no sistema e promovendo uma maior uniformidade no comportamento das forças de corte [150].

Embora mudanças na velocidade de rotação possam influenciar a pressão de corte e a energia específica de usinagem, esses efeitos raramente resultam em alterações substanciais nas forças de usinagem, devido à predominância de outros fatores determinantes. De fato, quando a velocidade de rotação aumenta dentro de certos limites operacionais, há uma redução no tempo de contato entre a ferramenta e a peça, o que pode minimizar a dissipação térmica na interface e evitar o acúmulo excessivo de calor na aresta de corte. No entanto, dentro de faixas controladas de variação, esse fator não se traduz em um aumento significativo da resistência ao corte, mantendo as forças de usinagem relativamente constantes [151].

Estudos empíricos [148, 149] confirmam essa observação, demonstrando que as forças de usinagem permanecem relativamente estáveis dentro de intervalos razoáveis de variação da velocidade de rotação. Essa estabilidade é um fator essencial para o controle preciso do processo de usinagem, pois possibilita a definição de condições de corte mais previsíveis, reduzindo oscilações indesejadas no comportamento da ferramenta e preservando a integridade superficial da peça usinada.

A análise dos dados experimentais obtidos neste estudo confirma essa tendência, mostrando que, ao variar a velocidade de rotação entre 10.000 e 30.000 r/min, as forças de usinagem não apresentaram mudanças significativas. Esse comportamento reforça a importância da seleção criteriosa de parâmetros de corte, com foco na otimização da remoção do cavaco, na redução do desgaste da ferramenta e na obtenção de peças usinadas com maior precisão dimensional e qualidade superficial.

4.3. Integridade Superficial

A análise da integridade superficial das amostras microusinadas neste estudo foi conduzida a partir de duas abordagens principais: a avaliação da formação de rebarbas superiores e a análise da rugosidade superficial. Esses aspectos desempenham um papel fundamental na caracterização da qualidade da usinagem, influenciando diretamente a precisão dimensional, a funcionalidade dos microcomponentes e a estabilidade do processo.

A formação de rebarbas é um dos desafios mais críticos na microusinagem, pois está associada à deformação plástica do material remanescente após o corte, resultando em pequenas

projeções indesejadas ao longo das bordas da peça usinada. Em processos de microfresamento, onde as dimensões das estruturas usinadas situam-se frequentemente na faixa de micrômetros ou submicrômetros, a presença de rebarbas pode comprometer severamente a precisão geométrica, dificultando o ajuste e a montagem de microcomponentes. Além disso, a remoção dessas rebarbas pode ser inviável ou tecnicamente desafiadora, tornando essencial a adoção de estratégias de otimização de parâmetros de corte para minimizar sua formação [152].

A formação das rebarbas observadas neste estudo foi fortemente influenciada pelos parâmetros de corte adotados e pelas características da liga AA2024, uma vez que materiais com alta ductilidade tendem a apresentar maior tendência à formação de rebarbas devido à intensa deformação plástica que ocorre durante o corte. A variação do avanço por dente f_z e da profundidade de corte a_p impacta diretamente a extensão e a severidade das rebarbas, sendo possível estabelecer correlações entre os valores desses parâmetros e a morfologia das rebarbas formadas.

A rugosidade superficial desempenha um papel crucial na microusinagem, pois impacta diretamente a funcionalidade e a durabilidade das peças usinadas. A qualidade do acabamento superficial afeta propriedades tribológicas, como atrito e resistência ao desgaste, influenciando a interação entre superfícies de contato e a capacidade do material de aderir a revestimentos protetores ou funcionais. Em aplicações avançadas, como dispositivos biomédicos, microestruturas ópticas e componentes aeroespaciais, a obtenção de especificações precisas de rugosidade é essencial para garantir confiabilidade operacional e longevidade dos microdispositivos [152].

No contexto da microtecnologia e da microengenharia, onde a miniaturização e a precisão dimensional são requisitos fundamentais, pequenas variações na formação de rebarbas e na rugosidade superficial podem impactar significativamente o desempenho do componente final. Dessa forma, a otimização das condições de corte, a seleção adequada dos parâmetros de usinagem e o monitoramento da integridade superficial tornam-se indispensáveis para garantir qualidade, precisão e eficiência nos processos de microusinagem [153].

A análise detalhada desses fatores permitirá uma melhor compreensão dos mecanismos de remoção de material e do comportamento da liga AA2024 sob diferentes condições de microfresamento, fornecendo subsídios para aprimorar os processos de usinagem e alcançar especificações mais rigorosas de acabamento superficial e controle de rebarbas.

4.3.1. Rebarbas de Topo

A formação de rebarbas durante a microusinagem pode ser classificada com base em sua localização na peça usinada. As principais categorias incluem rebarbas de entrada, rebarbas de topo (presentes tanto no lado de fresamento concordante quanto no lado de fresamento discordante) e rebarbas de saída. Entre essas categorias, as rebarbas de topo desempenham um papel crítico na qualidade da superfície dos microcanais, pois ocorrem em ambos os lados das trilhas de usinagem e sua formação é fortemente influenciada pelos parâmetros de corte aplicados [154].

As rebarbas de topo apresentam variações morfológicas distintas dependendo da direção do fresamento. No fresamento concordante, a morfologia da rebarba difere significativamente daquela observada no fresamento discordante, devido às variações nos mecanismos de formação e na interação entre a ferramenta e o material usinado. Essas diferenças resultam da forma como as forças de corte são aplicadas e como o material responde ao processo de remoção, influenciando diretamente a geometria e a aderência das rebarbas à superfície usinada [154].

No fresamento concordante, conforme a ferramenta entra em contato com a peça, o material sofre deformação plástica, passando inicialmente por um estágio de *plowing* (deslocamento do material sem remoção efetiva) e compressão, antes de atingir a espessura crítica necessária para o cisalhamento e remoção do cavaco. Durante essa fase, parte do material removido se fragmenta em pequenas lascas sob intensa tensão de tração, enquanto outra parte do material não completamente separada da peça é deslocada lateralmente, resultando na formação das rebarbas de topo iniciais [154].

Nos passos subsequentes da ferramenta, essas rebarbas são progressivamente deslocadas para fora da superfície usinada, sendo submetidas a um mecanismo combinado de extrusão e *plowing*. Esse efeito pode resultar no crescimento contínuo da rebarba ou na reorientação do material ao longo da superfície do microcanal, influenciando diretamente a qualidade final da peça usinada [154].

No fresamento discordante, o comportamento da rebarba difere significativamente. O processo inicia-se quando a ferramenta atinge o centro do microcanal, com a espessura do cavaco variando de um valor máximo até atingir zero. À medida que a espessura do cavaco diminui, o material pode não ser completamente cortado, resultando em sua adesão parcial à

superfície da peça. Esse material aderido é então extrudado e arrastado pela ferramenta, contribuindo para a formação da rebarba de topo final no fresamento discordante [155].

À medida que a ferramenta continua sua rotação em ciclos subsequentes, especialmente ao longo da parede lateral da peça, o material deformado pode se enrolar e se redistribuir sobre a superfície superior do microcanal. Esse efeito intensifica a formação das rebarbas de topo, resultando em uma morfologia mais pronunciada no fresamento discordante em comparação ao fresamento concordante [155].

A Figura 4.5 ilustra a formação das rebarbas de topo sob diferentes condições de fresamento. A imagem central, obtida por microscopia óptica com ampliação de 100x, apresenta a direção do avanço da ferramenta durante a usinagem. A imagem à direita, adquirida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 500x, evidencia a rebarba de topo formada no fresamento discordante, enquanto a imagem à esquerda destaca a rebarba gerada no fresamento concordante. Essa sequência de imagens permite a visualização detalhada dos mecanismos de formação das rebarbas, esclarecendo sua origem e facilitando a análise dos efeitos dos parâmetros de corte na qualidade final da superfície usinada.

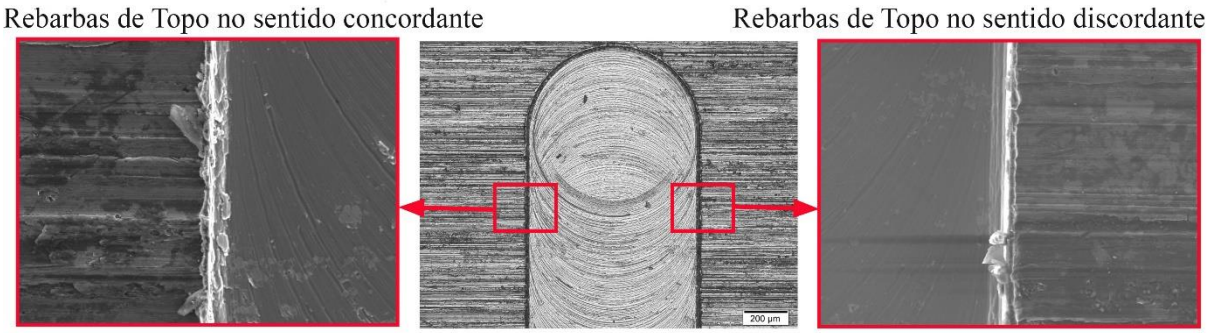


Figura 4.8: Explicação sobre a localização da aquisição das imagens das rebarbas de topo, de acordo com seu posicionamento.

4.3.1. Formação de Rebarbas de Topo em Função de Diferentes Velocidades de Avanço

A Figura 4.6 apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (SEM) com ampliação de 500x, ilustrando a formação das rebarbas de topo em superfícies usinadas sob diferentes velocidades de avanço. A análise detalhada dessas imagens permite compreender a influência desse parâmetro na morfologia e espessura das rebarbas, bem como os mecanismos subjacentes à sua formação.

Nas Figuras 4.6 (a) e 4.6 (b), correspondentes a um avanço de 120 mm/min, observam-se pequenas formações de rebarbas, sendo que as mais espessas ocorrem predominantemente na direção do sentido concordante (Figura 4.6 (a)). Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que, em avanços elevados, há uma remoção mais eficiente do material, resultando em menores deformações plásticas residuais na borda do microcanal.

Com a redução da velocidade de avanço para 90 mm/min, conforme ilustrado nas Figuras 4.6 (c) e 4.6 (d), não foi observado um aumento significativo na espessura das rebarbas. Esse comportamento sugere que, nessa faixa de avanço, a remoção do material ainda ocorre de maneira relativamente eficiente, sem uma intensificação significativa dos efeitos de deformação plástica na borda usinada.

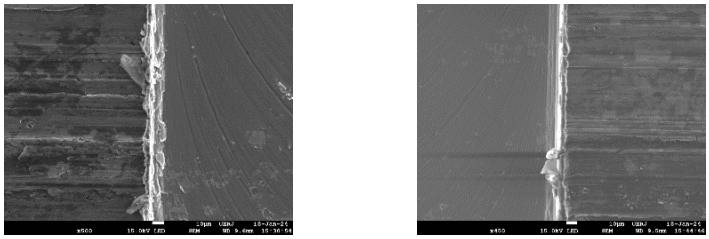
No entanto, ao reduzir o avanço para 60 mm/min, verificou-se um aumento expressivo na espessura das rebarbas na direção do fresamento concordante, conforme evidenciado na Figura 4.6 (e). Esse fenômeno pode ser associado à diminuição da taxa de remoção de material, favorecendo a deformação plástica localizada nas extremidades do microcanal. Em contrapartida, para a direção de fresamento discordante (Figura 4.6 (f)), não se observou uma formação expressiva de rebarbas, indicando que, sob essas condições, a remoção do material ainda se mantém relativamente estável, reduzindo a acumulação de material deslocado.

À medida que a velocidade de avanço foi reduzida para 30 mm/min (Figuras 4.6 (g) e 4.6 (h)), verificou-se um aumento substancial no comprimento das rebarbas em ambas as direções de fresamento. Esse comportamento está diretamente associado ao início do efeito *plowing*, no qual a ferramenta desloca o material ao invés de cortá-lo efetivamente. Como consequência, há um acúmulo progressivo de material deformado, resultando na formação de rebarbas mais pronunciadas ao longo das extremidades do microcanal.

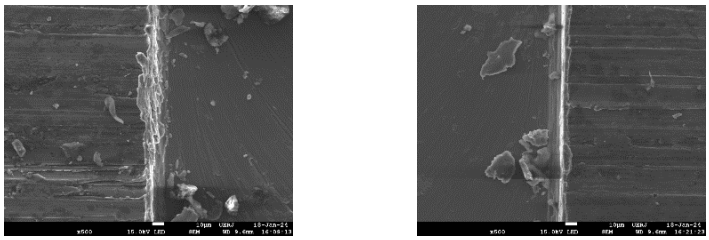
Nas Figuras 4.6 (i) e 4.6 (j), observam-se rebarbas significativamente espessas em ambas as direções de fresamento. Esse fenômeno pode ser atribuído à intensificação do efeito *plowing*, no qual o material, ao invés de ser eficientemente cisalhado, é empurrado e acumulado na borda do microcanal. Sob essas condições subótimas de corte, a interação inadequada entre a ferramenta e o material gera deformações substanciais, resultando em um crescimento volumoso das rebarbas.

A análise dessas imagens confirma que a redução excessiva da velocidade de avanço compromete a eficiência da remoção do cavaco, favorecendo o deslocamento do material e intensificando a formação de rebarbas de topo. Assim, a definição adequada dos parâmetros de

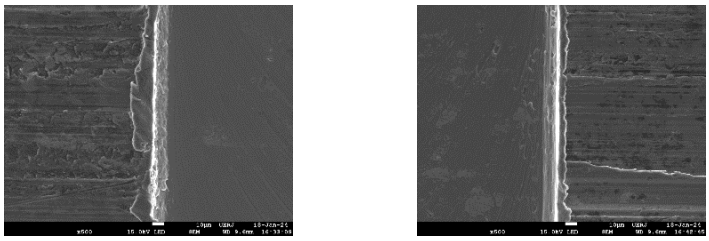
corte, especialmente no que se refere à velocidade de avanço, é essencial para minimizar a deformação plástica indesejada e melhorar a qualidade superficial da peça usinada.



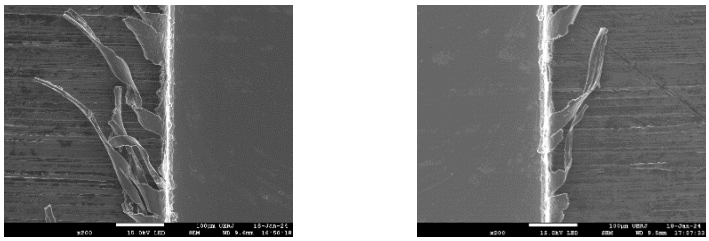
(a) 120mm/min (*b*) 120mm/min



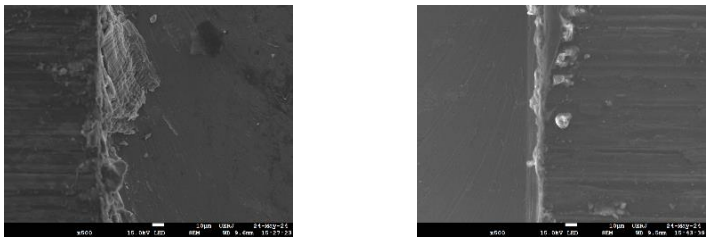
(c) 90mm/min (d) 90mm/min



(e) 60 mm/min (f) 60 mm/min



(g) 30 mm/min (*h*)) 30 mm/min



(i) 20 mm/min (j) 20 mm/min

Figura 4.9: MEV exibindo a superfície usinada para diferentes velocidades de avanço.

4.3.2. Formação de Rebarbas de Topo em Função de Diferentes Profundidades de Corte

A Figura 4.7 apresenta imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 500×, ilustrando a formação de rebarbas de topo em diferentes profundidades de corte. A coluna da esquerda exibe imagens obtidas no fresamento discordante, enquanto a coluna da direita mostra imagens referentes ao fresamento concordante. Essa análise permite compreender a relação entre a profundidade de corte e os mecanismos responsáveis pela deformação plástica e formação das rebarbas.

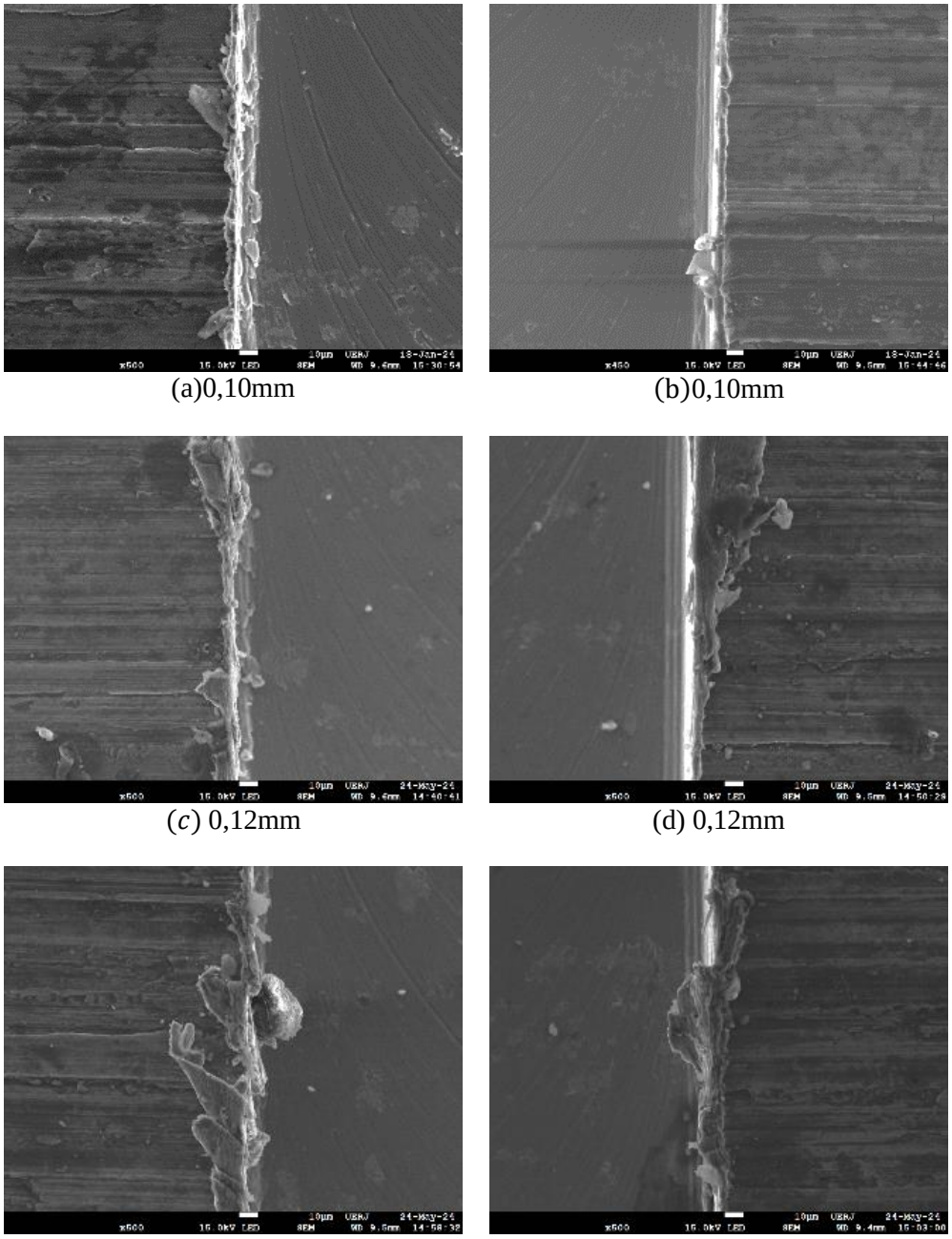
Para uma profundidade de corte de 0,10 mm, observou-se que a formação de rebarbas foi mais pronunciada no fresamento concordante, conforme ilustrado na Figura 4.7 (a), em comparação com a formação no fresamento discordante, apresentada na Figura 4.7 (b). Esse comportamento pode ser atribuído à forma como a ferramenta interage com o material durante o processo de usinagem, influenciando a direção e a magnitude das tensões residuais acumuladas na borda do microcanal.

Ao aumentar a profundidade de corte para 0,12 mm, constatou-se um crescimento expressivo da espessura das rebarbas em ambas as direções de fresamento, conforme evidenciado nas Figuras 4.7 (c) e 4.7 (d). Esse aumento pode estar associado à maior quantidade de material deslocado durante o corte, o que intensifica os efeitos de *plowing* (deslocamento do material sem remoção efetiva) e extrusão. Tais fenômenos favorecem a deformação plástica do material remanescente, resultando na formação de rebarbas mais espessas ao longo das bordas do microcanal.

Quando a profundidade de corte foi elevada para 0,15 mm, a formação de rebarbas tornou-se ainda mais acentuada, conforme ilustrado nas Figuras 4.7 (e) e 4.7 (f). Sob essas condições, houve um aumento significativo nas forças de usinagem, o que resultou em um deslocamento expressivo do material não removido pelo corte. Esse material, ao se acumular nas extremidades do microcanal, deu origem a rebarbas volumosas, intensificando o efeito indesejado de acúmulo de material deformado.

A análise dos resultados indica que os parâmetros que proporcionaram os melhores desempenhos na redução da formação de rebarbas foram aqueles que empregaram profundidades de corte mais rasas, especialmente 0,10 mm. Esse comportamento pode ser

atribuído à redução do volume de material removido por passe, o que minimiza a deformação plástica e o deslocamento do material, fatores primários na formação de rebarbas de topo [156]. Dessa forma, a otimização da profundidade de corte se mostra essencial para mitigar a geração de rebarbas, reduzindo a necessidade de processos subsequentes de acabamento e remoção.



(a)0,10mm (b)0,10mm

(*c*) 0,12mm (d) 0,12mm

(e) 0,15mm (f) 0,15mm

Figura 4.10: MEV exibindo as rebarbas para diferentes profundidades de corte.

4.3.3. Formação de Rebarbas de Topo em Função de Diferentes Velocidades de Corte

A Figura 4.8 apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 500×, ilustrando a formação de rebarbas de topo em diferentes velocidades de rotação do spindle. A coluna à esquerda exibe imagens correspondentes ao fresamento discordante, enquanto a coluna à direita apresenta imagens obtidas no fresamento concordante. Essa análise permite avaliar a influência da velocidade de corte na deformação plástica do material e na extensão da formação de rebarbas.

Nas Figuras 4.8 (a) e 4.8 (b), que representam um regime de usinagem com velocidade de rotação de 30.000 rpm, verifica-se que a formação de rebarbas foi mínima em ambas as direções de fresamento. Esse comportamento sugere que velocidades de rotação mais elevadas contribuem para um cisalhamento mais eficiente do material, reduzindo o tempo de contato entre a ferramenta e a peça e, consequentemente, minimizando a deformação plástica e o deslocamento do material remanescente.

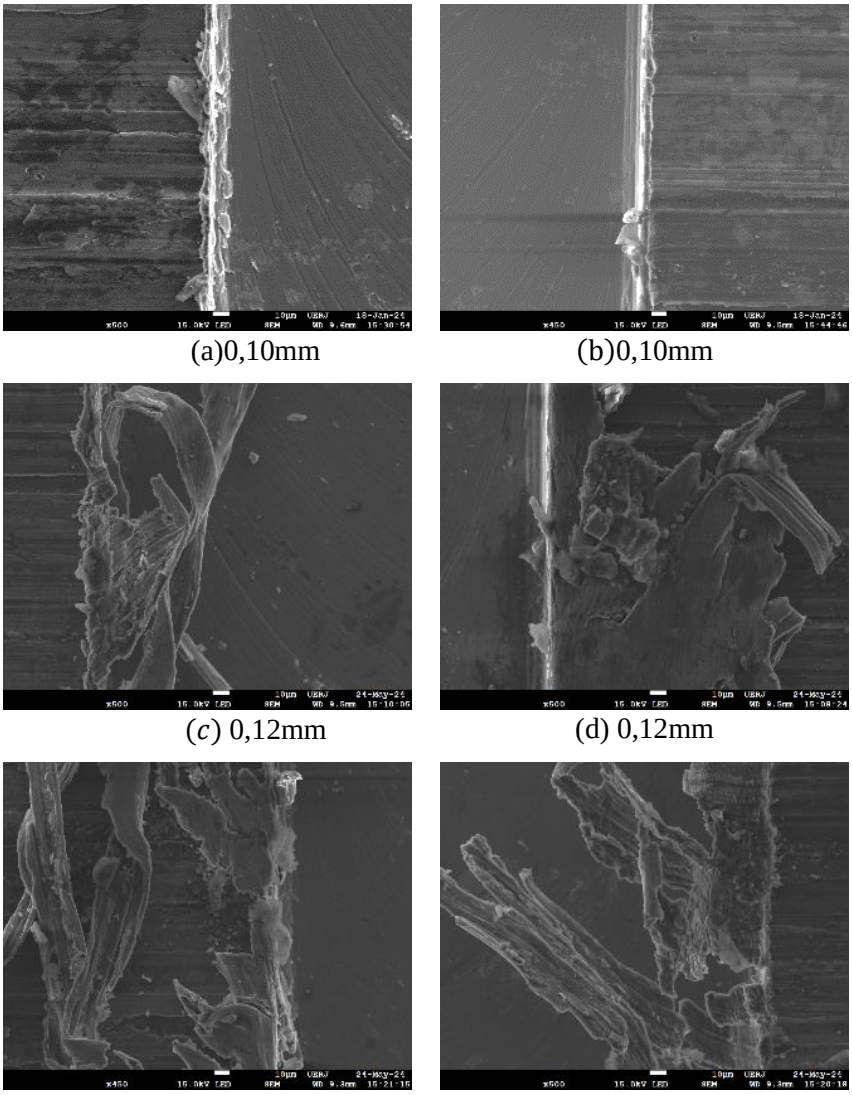
Com a redução da velocidade de rotação para 20.000 rpm, conforme ilustrado nas Figuras 4.8 (c) e 4.8 (d), observa-se um crescimento expressivo na espessura das rebarbas. Esse efeito é particularmente perceptível na direção do fresamento concordante, conforme evidenciado na Figura 11(c). A tendência de aumento da formação de rebarbas pode ser atribuída à diminuição da velocidade relativa entre a ferramenta e o material, resultando em um tempo de contato maior e em uma evacuação menos eficiente dos cavacos. Isso favorece a adesão e a extrusão do material, promovendo a formação de rebarbas mais espessas ao longo das bordas do microcanal.

Quando a velocidade de rotação do eixo árvore foi reduzida para 10.000 rpm, as imagens ilustradas nas Figuras 4.8 (e) e 4.8 (f) evidenciam uma formação substancial de rebarbas, com um comprimento de rebarba mais acentuado em comparação com as condições de corte anteriores. Esse aumento na formação de rebarbas pode ser explicado pelo fato de que velocidades mais baixas reduzem a eficiência do processo de corte, favorecendo um efeito pronunciado de *plowing*. Nessas condições, o material tende a ser empurrado e deformado em vez de ser efetivamente removido, resultando na acumulação progressiva de material na borda do microcanal.

Os resultados indicam que, sob a ótica da redução da formação de rebarbas, a seleção adequada da velocidade de rotação do spindle é um fator crítico para garantir acabamentos superiores na superfície usinada. A análise comparativa das imagens sugere que velocidades

mais elevadas, como 30.000 rpm, proporcionam os melhores resultados, resultando em formação mínima de rebarbas, conforme ilustrado nas Figuras 4.8 (a) e 4.8 (b).

Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que maiores velocidades de rotação promovem um corte mais eficiente, reduzindo o tempo de contato da ferramenta com a superfície da peça e minimizando os efeitos de deformação plástica e extrusão do material. Além disso, velocidades mais altas favorecem a evacuação do cavaco, evitando acúmulo de material na borda do microcanal e, consequentemente, reduzindo a formação de rebarbas. Assim, o controle preciso da velocidade de corte emerge como um fator essencial para otimizar a integridade superficial da peça, garantindo maior qualidade dimensional e funcionalidade dos microcanais usinados.



(a)0,10mm (b)0,10mm

(*c*) 0,12mm (d) 0,12mm

(e) 0,15mm (f) 0,15mm

Figura 4.11: MEV cexibindo as rebarbas para diferentes rotações do eixo-árvore.

4.4. Rugosidade da Superfície

4.4.1. Efeitos das Velocidades de Avanço na Rugosidade da Superfície

Na usinagem convencional, a obtenção de um acabamento superficial de alta qualidade geralmente está associada ao uso de taxas de avanço mais baixas. A redução do avanço permite que a ferramenta de corte interaja com a peça de forma mais controlada, minimizando vibrações indesejadas e favorecendo um cisalhamento mais uniforme do material, o que resulta em uma superfície com menor irregularidade. Além disso, taxas de avanço reduzidas tendem a diminuir as forças de corte, reduzindo a influência de fenômenos como a deflexão da ferramenta e o desgaste prematuro da aresta de corte. Como consequência, a aplicação de menores velocidades de avanço tem sido amplamente empregada na usinagem convencional para garantir acabamentos superficiais refinados e consistentes.

No entanto, no contexto da microusinagem, o comportamento da rugosidade superficial em função do avanço se apresenta de maneira significativamente distinta. Diferentemente da usinagem convencional, onde a redução da taxa de avanço melhora o acabamento superficial, na microusinagem esse efeito não é linear, sendo influenciado por fatores como a espessura mínima de corte, o efeito *plowing* e a interação entre a ferramenta e o material em escala microscópica. Pesquisas recentes indicam que a redução excessiva da taxa de avanço pode, paradoxalmente, aumentar a rugosidade da superfície.

Esse comportamento é evidenciado na Figura 4.9, que apresenta um gráfico de barras comparando diferentes velocidades de avanço e seus efeitos sobre os parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz. Observa-se que, para taxas de avanço moderadas a elevadas, a rugosidade superficial mantém-se em níveis relativamente baixos. No entanto, quando a taxa de avanço é reduzida para valores muito baixos, como 30 mm/min e 20 mm/min, verifica-se um aumento expressivo da rugosidade superficial.

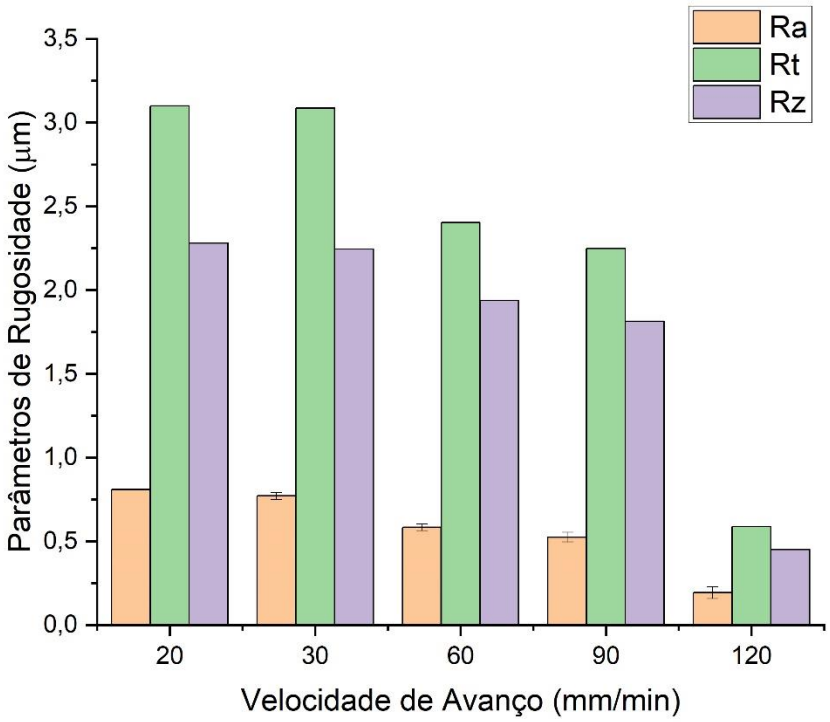


Figura 4.12: Rugosidade em função das velocidades de avanço.

Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que, em velocidades de avanço reduzidas, a espessura do cavaco não removido pode se tornar menor do que a espessura mínima de cisalhamento. Nessas condições, o efeito *plowing* se intensifica, fazendo com que a ferramenta não remova o material de maneira eficiente, mas sim o desloque e provoque sua deformação plástica na superfície da peça. Como resultado, ocorre um acúmulo de tensões residuais e uma deterioração na qualidade do acabamento superficial [157].

Além disso, em avanços reduzidos, a relação entre o raio da ponta da ferramenta e a espessura do cavaco indeformado torna-se crítica, podendo levar a desgastes irregulares na ferramenta, adesão de material e até mesmo à formação de arestas postiças de corte. Esses efeitos impactam diretamente a regularidade do acabamento superficial, resultando em um aumento da rugosidade para as menores taxas de avanço [158].

Dessa forma, enquanto na usinagem convencional a redução da taxa de avanço é uma estratégia eficiente para melhorar a qualidade superficial, na microusinagem é necessário encontrar um equilíbrio, pois avanços muito baixos podem aumentar a rugosidade devido à intensificação dos efeitos de *plowing*. Assim, a seleção do avanço ideal deve considerar não

apenas a busca por menor rugosidade, mas também a integridade da ferramenta e a eficiência da remoção do material.

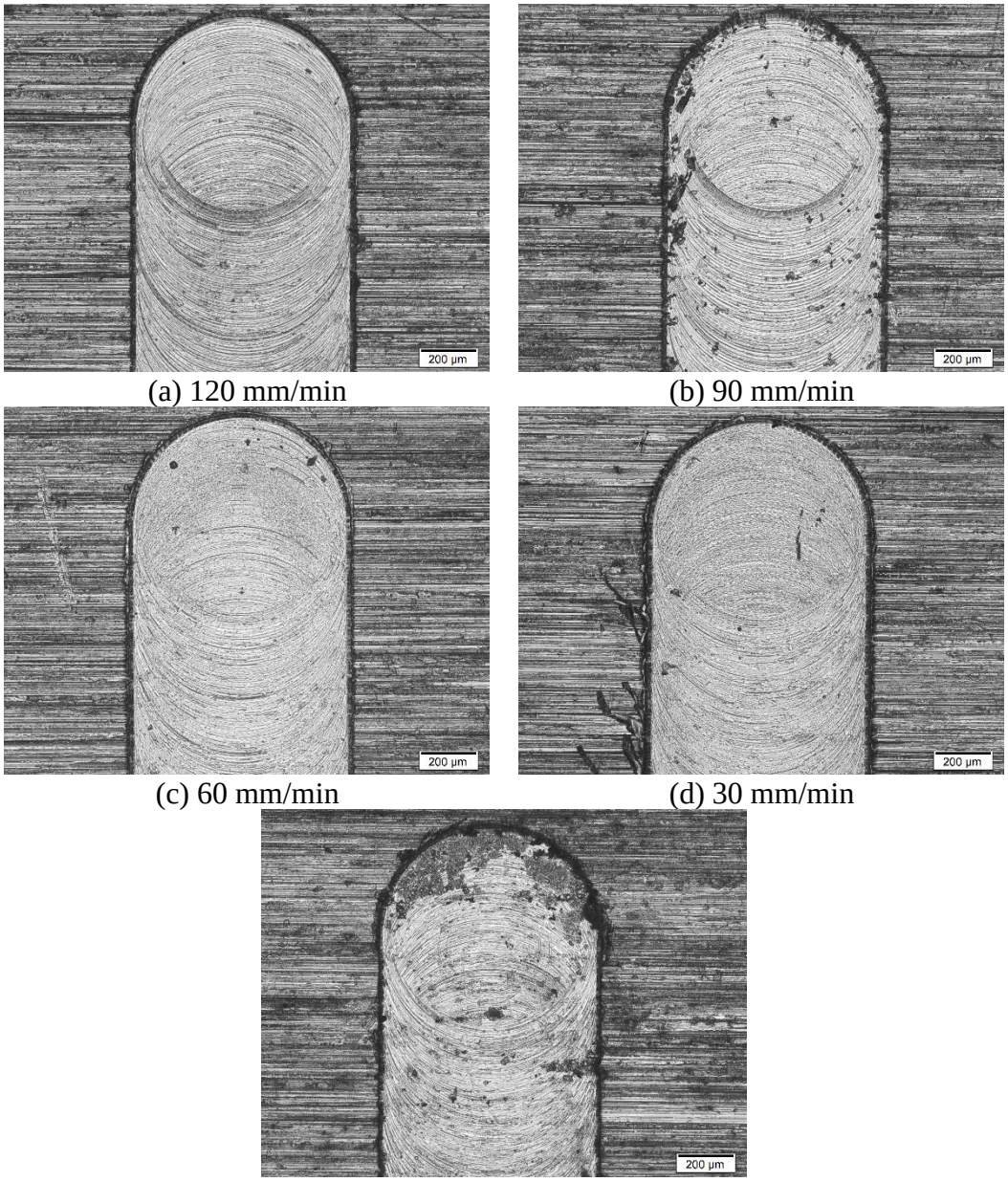
A análise do gráfico apresentado na Figura 4.9 revela resultados que contrastam significativamente com os observados na usinagem convencional. Enquanto na usinagem em macroescala a redução da taxa de avanço tende a melhorar a qualidade superficial, na microusinagem esse comportamento não é diretamente aplicável devido à influência do efeito *plowing* e das características de remoção do cavaco em escala reduzida. Dessa forma, a avaliação dos cavacos gerados durante a usinagem se torna um fator determinante para compreender o mecanismo de interação entre a ferramenta e o material, fornecendo informações essenciais para caracterizar a influência do efeito *plowing* na rugosidade superficial.

A microusinagem envolve a remoção de material em dimensões extremamente reduzidas, onde até mesmo pequenos ajustes na taxa de avanço podem impactar significativamente a dinâmica do processo de corte. Em particular, a redução excessiva da taxa de avanço pode intensificar a ocorrência do efeito *plowing*, que se manifesta quando a ferramenta de corte não remove efetivamente o material, mas o desloca lateralmente sem gerar cavacos claramente definidos. Esse fenômeno é mais acentuado em baixas taxas de avanço, pois a espessura do cavaco não removido pode se tornar menor do que a espessura mínima necessária para o cisalhamento, resultando em deslocamento irregular do material e degradação da rugosidade superficial [159].

Os resultados obtidos indicam que a melhor condição para redução da rugosidade Ra foi alcançada com a maior taxa de avanço testada, de 120 mm/min. Essa observação destaca a importância de otimizar a taxa de avanço para minimizar o efeito *plowing*, garantindo uma remoção de material mais eficiente e um acabamento superficial de maior qualidade. A obtenção de superfícies com baixa rugosidade é um fator crítico, especialmente em materiais sujeitos a tensões cíclicas, uma vez que superfícies mais lisas contribuem para a melhoria da resistência à fadiga e o desempenho global do material. Esse aspecto é particularmente relevante para a liga de alumínio AA2024, amplamente utilizada na indústria aeroespacial e em aplicações estruturais sujeitas a carregamentos cíclicos, onde a minimização da rugosidade superficial desempenha um papel fundamental na extensão da vida útil do componente por fadiga.

Complementando essa análise, a Figura 4.10 apresenta micrografias obtidas por microscopia óptica com aumento de 100×, ilustrando a influência das diferentes taxas de avanço

na morfologia da superfície usinada. Enquanto a 4.9 representa os valores quantitativos de rugosidade obtidos pelo rugosímetro, a Figura 4.10 possibilita uma avaliação visual detalhada, permitindo a observação das marcas de usinagem, da formação de rebarbas de topo e, principalmente, da manifestação do efeito *plowing* na superfície das amostras. Essa abordagem combinada fortalece a compreensão dos mecanismos que influenciam a rugosidade na microusinagem, auxiliando na seleção otimizada dos parâmetros de corte para melhorar a integridade superficial das peças usinadas.



(a) 120 mm/min (b) 90 mm/min

(c) 60 mm/min (d) 30 mm/min

(e) 20 mm/min

Figura 4.13: MO (aumento de 100x) mostrando os microcanais em diferentes velocidades de avanço, ilustrando o acabamento superficial.

A aplicação de taxas de avanço mais elevadas, como 120 mm/min, apresentou os melhores resultados em termos de formação de rebarbas de topo e rugosidade superficial, conforme ilustrado na Figura 4.10(a). Essa condição de corte minimizou os efeitos indesejáveis do efeito *plowing*, promovendo uma remoção de material mais eficiente e reduzindo a deformação plástica residual da superfície. À medida que a taxa de avanço foi reduzida, observou-se um aumento progressivo da rugosidade da superfície e da formação de rebarbas, fenômeno associado à diminuição da espessura do cavaco não removido, que leva à intensificação dos efeitos de extrusão e recuperação elástica.

No contexto do microfresamento, o efeito de escala torna-se um fator determinante para a qualidade do acabamento superficial. Quando a taxa de avanço por dente (fz) se torna menor do que o raio da aresta de corte da ferramenta (re), ocorre um aumento do ângulo de saída negativo da ferramenta, intensificando a ação de *plowing*. Nessas condições, em vez de promover um cisalhamento eficiente do material, a ferramenta empurra e deforma o material lateralmente, resultando na acumulação de material ao longo das bordas do microcanal. Esse efeito é particularmente evidente na Figura 4.10(d), correspondente a uma taxa de avanço de 30 mm/min (1 μm/z), onde a formação de rebarbas de topo se torna mais expressiva.

Com a redução ainda maior da taxa de avanço para 20 mm/min (Figura 4.10(e)), verificou-se um comportamento atípico, caracterizado por uma redução na formação de rebarbas de topo. Essa diminuição está diretamente relacionada à formação inadequada dos cavacos, uma vez que, sob essas condições de corte, o material não é removido de maneira eficiente. Em vez disso, há fragmentação irregular dos cavacos e falha na conformação geométrica da fresagem, resultando em uma superfície altamente comprometida. Além disso, essa condição intensifica a influência do efeito *plowing*, aumentando significativamente as forças de usinagem e provocando um incremento na temperatura na zona de corte. Como consequência direta, foi observada a formação de óxidos de alumínio na superfície usinada, um indicativo de que as condições térmicas atingiram níveis críticos durante o processo.

A análise das imagens obtidas confirma que a redução da taxa de avanço aumenta a rugosidade superficial, embora esse efeito não seja imediatamente perceptível na inspeção visual das Figuras 4.10(b), 4.10(c) e 4.10(d). Entretanto, as medições realizadas com o rugosímetro evidenciaram esse incremento na rugosidade, corroborando que parâmetros de corte inadequados intensificam a ação de *plowing* e a degradação da integridade superficial. Além disso, a inspeção visual das micrografias revelou uma tendência crescente na formação

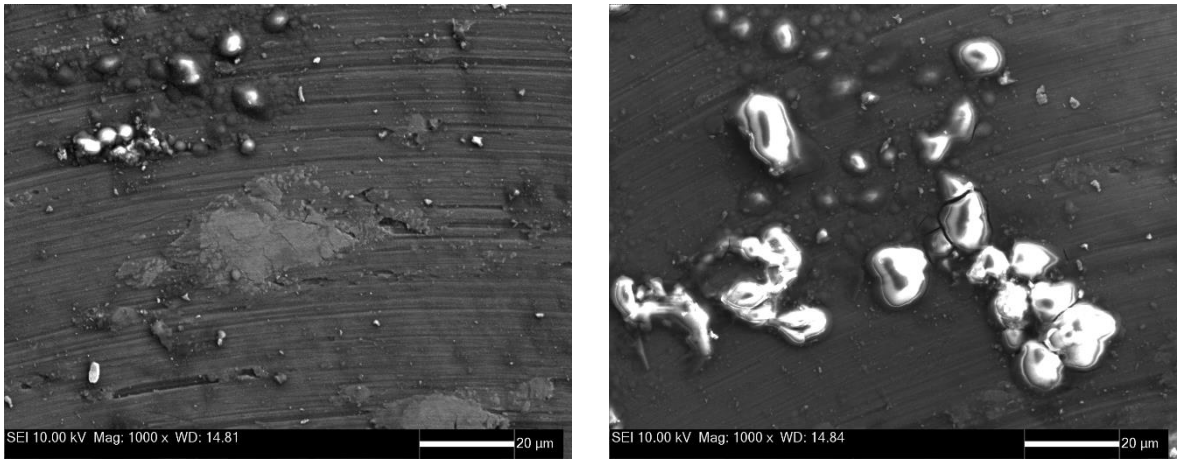
de rebarbas à medida que a taxa de avanço diminui, reforçando a relação entre o mecanismo de remoção de material e os efeitos térmicos e mecânicos na superfície usinada.

A Figura 4.10(e) é um elemento-chave para a compreensão do microfresamento, uma vez que poucos estudos na literatura abordam os impactos do efeito *plowing* na integridade superficial. Essa figura demonstra claramente a presença de óxidos de alumínio na superfície usinada, um fenômeno altamente indesejado que compromete significativamente a qualidade do acabamento e a resistência mecânica da peça. A formação de óxidos é diretamente associada ao aumento das forças de usinagem, fato que pode ser confirmado através da análise dos gráficos de força apresentados na Figura 4.9.

O aumento da temperatura durante a usinagem da liga AA2024 pode desencadear mudanças microestruturais indesejadas, comprometendo o desempenho mecânico e a confiabilidade estrutural dos componentes fabricados. Esse fenômeno pode resultar em recristalização localizada ou até mesmo na formação de fases indesejadas, alterando propriedades mecânicas essenciais, como dureza e resistência à fadiga. Esses efeitos são particularmente críticos em aplicações aeroespaciais, onde a liga AA2024 é amplamente empregada em estruturas submetidas a tensões cíclicas, exigindo rigoroso controle térmico para garantir sua integridade ao longo do tempo [160].

Com base na observação da Figura 4.10(e), verificou-se uma alteração significativa na superfície do microcanal nas condições de menor taxa de avanço, exigindo a realização de ensaios complementares para caracterizar a natureza dessa alteração. Para determinar se o material observado na superfície era proveniente da amostra de alumínio ou se resultava de deposição da ferramenta de microfresamento, foram conduzidos testes adicionais de caracterização química.

A Figura 4.11(a) apresenta uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 1000×, evidenciando danos superficiais severos causados pelo efeito *plowing*. Uma característica notável nessa micrografia é a presença de cavacos que foram aderidos sobre a superfície durante o processo de microfresamento. Além disso, na região superior esquerda da imagem, observa-se a formação de óxidos de alumínio, indicando que as temperaturas alcançadas durante a usinagem ultrapassaram o limiar de estabilidade da liga, favorecendo a oxidação do material. A Figura 4.11(b) destaca regiões onde a presença de óxidos de alumínio torna-se mais evidente.



(a) (b)

Figura 4.14: MEV realizado na região dos óxidos (a) Imagem com aumento de 1000x, demonstrando adesão de cavaco sobre a superfície (b) Nódulos de óxido de alumínio.

A Figura 4.11(b) fornece uma visão ampliada da região do óxido, ilustrando ainda mais o impacto prejudicial do efeito de *plowing* quando os parâmetros de corte não são aplicados de forma otimizada. Foram realizadas análises complementares por espectroscopia de dispersão de energia (EDS), uma técnica analítica usada para análise elemental ou caracterização química de uma amostra. Os resultados da EDS indicaram picos de oxigênio, que, em conjunto com o alumínio, confirmaram que a deterioração da superfície usinada nas menores taxas de avanço resultou na formação de óxidos de alumínio, conforme verificado na Figura 4.10(e).

A Figura 4.11 fornece uma ampliação detalhada da região contendo os óxidos, permitindo uma análise mais aprofundada sobre a influência do efeito *plowing* na degradação da superfície usinada. Para confirmar a composição desses depósitos, foi conduzida uma análise por espectroscopia de dispersão de energia (EDS), uma técnica analítica utilizada para a identificação da composição química da amostra. Os resultados da EDS, Figura 4.12, revelaram a presença de picos significativos de oxigênio, que, combinados com a elevada concentração de alumínio, confirmaram que a formação dos óxidos de alumínio foi consequência direta do aquecimento excessivo da superfície durante a usinagem sob baixas taxas de avanço.

Dentre os parâmetros de corte avaliados, a taxa de avanço de 120 mm/min apresentou os melhores resultados em termos de integridade superficial, promovendo uma remoção eficiente do material e reduzindo a rugosidade da superfície. Já as menores taxas de avanço, em especial 20 mm/min, resultaram em condições térmicas adversas, levando ao aumento das forças de usinagem, intensificação do efeito *plowing* e formação de óxidos de alumínio.

A Figura 4.11 enfatiza a importância da seleção adequada da taxa de avanço, demonstrando os efeitos prejudiciais do efeito *plowing* na qualidade da peça usinada. Considerando que a liga AA2024 é amplamente empregada em aplicações sujeitas a tensões cíclicas, a obtenção de baixa rugosidade superficial torna-se essencial para garantir maior resistência à fadiga e maior confiabilidade estrutural.

A Figura 4.11 (a) apresenta uma imagem obtida por meio de microscopia eletrônica de varredura a uma ampliação de 1000x, revelando características cruciais que ilustram os danos à superfície causados pelo efeito de *plowing*. Uma característica notável é a formação de APC, que ocorre quando o material da peça se adere à ferramenta, depois se solta e se redeposita na superfície usinada devido à pressão e temperatura. Além disso, a formação de óxidos de alumínio é visível no terço superior esquerdo da imagem.

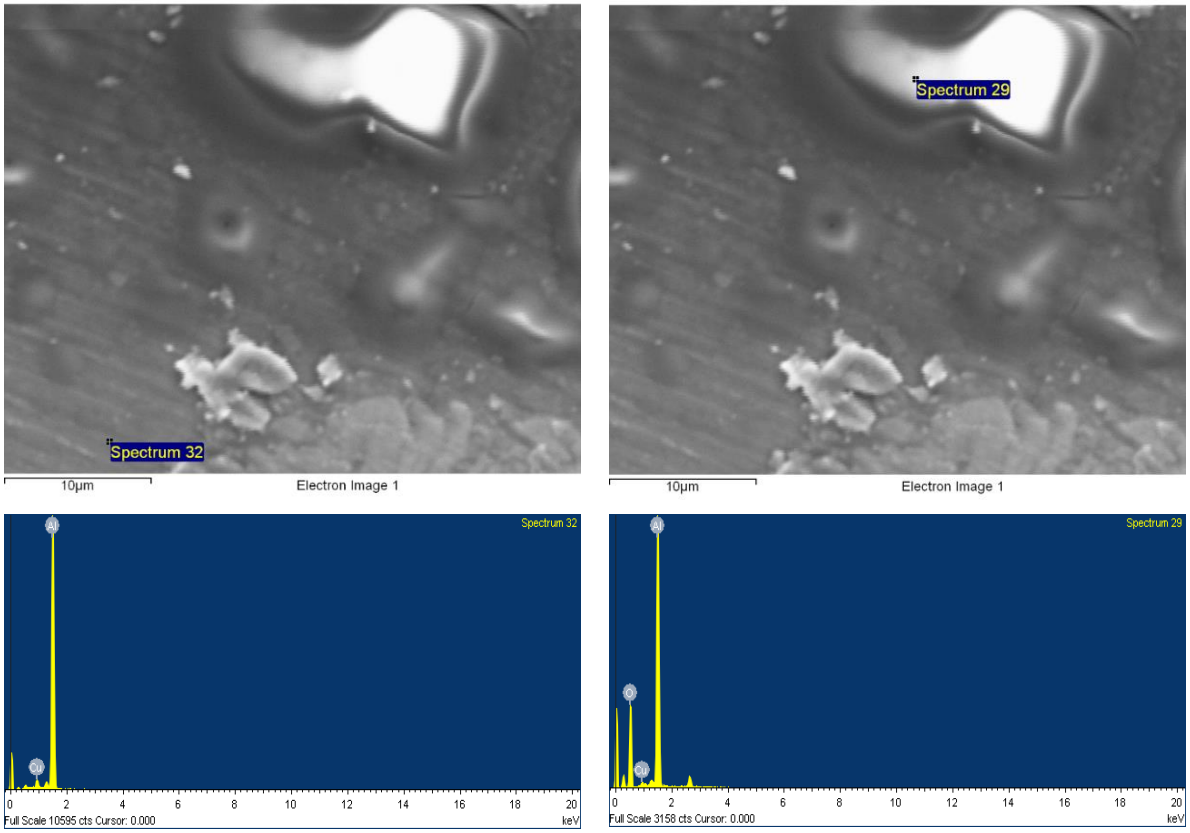
A formação de óxidos em metais está diretamente associada ao aumento da temperatura durante o processo de usinagem. No caso específico da liga de alumínio AA2024, esse efeito torna-se particularmente relevante devido à sua suscetibilidade à corrosão e ao seu uso em aplicações aeronáuticas, onde a integridade superficial e a resistência mecânica são fatores críticos. Apesar da excelente relação resistência/peso e da boa usinabilidade, a liga AA2024 apresenta vulnerabilidades quando submetida a condições térmicas adversas. O aquecimento excessivo gerado durante a microusinagem pode acelerar processos de degradação da superfície, resultando na formação de óxidos de alumínio, o que compromete a qualidade do acabamento superficial e a durabilidade do material em longo prazo [159].

A análise das superfícies dos microcanais usinados em diferentes velocidades de avanço evidencia a necessidade de otimizar os parâmetros de corte para evitar o efeito *plowing*. O impacto desse efeito no aumento da temperatura da peça durante o microfresamento não pode ser subestimado, pois a geração excessiva de calor induz a oxidação localizada, promovendo variações indesejadas na microestrutura e alterando as propriedades mecânicas do material. Embora a liga AA2024 seja amplamente empregada em atmosferas corrosivas, como em aeronaves expostas à névoa salina, há poucos estudos na literatura que detalham o impacto do efeito *plowing* e a formação de óxidos microscópicos. Esse tipo de deterioração superficial pode ser um gatilho para falhas estruturais, especialmente em componentes sujeitos a ciclos de fadiga. A ocorrência de óxidos pode acelerar a nucleação e propagação de trincas, reduzindo a vida útil do material e comprometendo a segurança em aplicações aeronáuticas e aeroespaciais.

Os ensaios experimentais realizados neste estudo permitiram identificar parâmetros de corte capazes de minimizar os efeitos prejudiciais do *plowing* e, consequentemente, a formação

de óxidos. Os resultados demonstraram que a velocidade de avanço de 120 mm/min proporcionou a melhor integridade superficial, com uma redução significativa na rugosidade e na formação de rebarbas. Por outro lado, à medida que a velocidade de avanço foi reduzida, os efeitos indesejáveis começaram a se tornar evidentes. Os primeiros sinais do efeito *plowing* surgiram a partir de 30 mm/min, intensificando-se drasticamente quando o avanço foi reduzido para 20 mm/min, conforme ilustrado na Figura 4.10(e).

A Figura 4.12 apresenta os resultados da análise EDS, realizada sobre as superfícies dos microcanais usinados. Essa figura está organizada em duas colunas distintas: a coluna esquerda (Figura 4.12(a)) exibe a análise EDS na região da superfície onde são observadas marcas de usinagem, permitindo avaliar a composição química da área afetada pela remoção de material, enquanto a coluna direita (Figura 4.12(b)) apresenta a análise EDS na região onde ocorreu a formação de óxidos de alumínio, evidenciando a presença de elementos químicos associados à oxidação do material. Os espectros obtidos demonstram um aumento significativo no teor de oxigênio na área afetada, confirmando a ocorrência de reações de oxidação durante o microfresamento sob baixas velocidades de avanço. Essa elevação na concentração de oxigênio, combinada com a presença predominante de alumínio, corrobora a hipótese de que a intensificação do efeito *plowing* resultou na formação de óxidos de alumínio sobre a superfície usinada.



(a) (b)

Figura 4.15: EDS da amostra usinada. (a) Região sobre marcas de usinagem (b) Região sobre nódulos de óxido.

Com base nos resultados obtidos, ficou evidente que a seleção inadequada dos parâmetros de corte pode gerar temperaturas excessivas durante o microfresamento, favorecendo processos de oxidação que deterioram a superfície usinada. A presença de óxidos metálicos não apenas compromete a rugosidade superficial, mas também pode atuar como um ponto de nucleação para falhas estruturais, reduzindo a vida útil do componente. A determinação da velocidade de avanço ideal foi um fator crucial neste estudo.

Os resultados indicam que avaliações empíricas, combinadas com técnicas de caracterização avançadas, são essenciais para estabelecer condições de corte otimizadas. O uso de 120 mm/min como velocidade de avanço permitiu evitar a formação de óxidos e minimizar os efeitos do *plowing*, garantindo melhor acabamento superficial e maior durabilidade da peça usinada. Portanto, este estudo reforça a necessidade de estratégias de usinagem bem fundamentadas, especialmente em materiais de alta aplicação tecnológica, como a liga AA2024 em ambientes aeroespaciais, onde qualquer falha na integridade superficial pode comprometer seriamente a confiabilidade estrutural do componente.

4.4.2. Efeitos da profundidade de corte na rugosidade da superfície

Na usinagem convencional, é amplamente aceito que a obtenção de superfícies com acabamentos superiores está diretamente relacionada ao uso de profundidades de corte menores, geralmente aplicadas em operações de acabamento. Em contrapartida, processos de desbaste, que envolvem a remoção de maiores volumes de material, tendem a resultar em superfícies de qualidade inferior devido à maior geração de esforços de usinagem e vibrações. No entanto, quando se trata de microfresamento, esse conceito nem sempre se aplica diretamente. Devido ao efeito escala e à influência do efeito *plowing*, a relação entre profundidade de corte e rugosidade superficial apresenta comportamentos distintos dos observados na usinagem convencional [39].

A Figura 4.13 apresenta um gráfico de barras ilustrando a variação dos parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz em função das diferentes profundidades de corte adotadas no microfresamento dos microcanais. Os resultados demonstram que, ao aumentar a profundidade de corte de 0,1 mm para 0,12 mm, não há uma mudança significativa no valor do parâmetro Ra. No entanto, nota-se uma redução nos valores de Rt e Rz, indicando um acabamento mais homogêneo e menos irregular. Como Rt representa a altura máxima entre os picos e os vales da superfície usinada, e Rz corresponde à altura média dos cinco maiores picos e vales do perfil, a diminuição desses parâmetros sugere uma superfície com menores variações topográficas, favorecendo uma integridade superficial aprimorada.

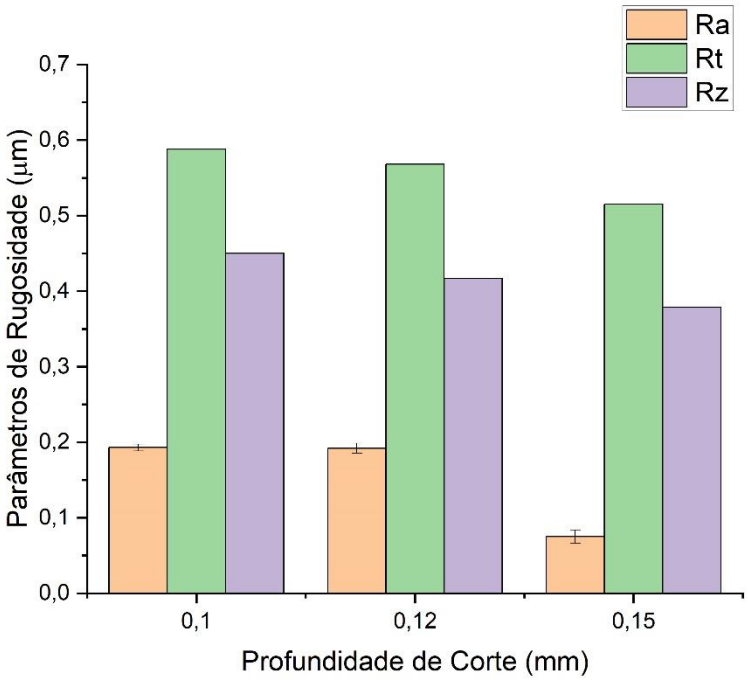


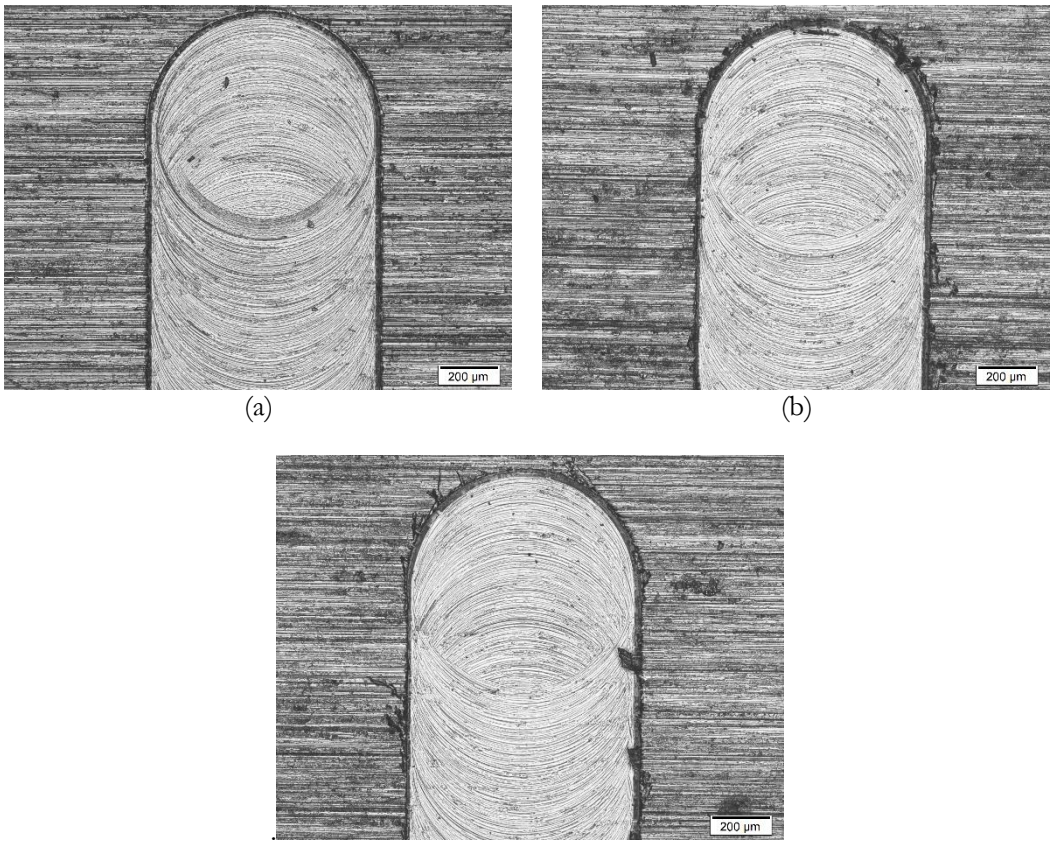
Figura 4.16: Rugosidade em função da profundidade de corte.

Além disso, à medida que a profundidade de corte é aumentada de 0,12 mm para 0,15 mm, observa-se uma redução significativa nos valores de Ra, Rt e Rz, indicando uma melhoria adicional na qualidade do acabamento superficial sob essa condição. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que, em profundidades de corte menores, a aresta de corte principal da ferramenta se aproxima da espessura mínima do material não cortado. Quando essa espessura não atinge o valor crítico necessário para a formação do cavaco, ocorre o efeito *plowing*, no qual a ferramenta desloca o material em vez de removê-lo de forma eficiente. Esse fenômeno resulta na intensificação das deformações plásticas na superfície usinada, levando a um aumento na rugosidade superficial.

Portanto, essa análise reforça a necessidade de reconsiderar abordagens convencionais ao definir os parâmetros de corte no microfresamento. Enquanto na usinagem convencional profundidades de corte menores são frequentemente associadas a melhores acabamentos, no microfresamento, profundidades de corte ligeiramente maiores podem contribuir para a obtenção de superfícies mais homogêneas, minimizando os efeitos do *plowing* e melhorando a integridade superficial da peça usinada [160].

A rugosidade da superfície, tanto no fundo quanto nas paredes laterais dos microcanais usinados, está ilustrada na Figura 4.14, de acordo com diferentes profundidades de corte.

Conforme discutido na Figura 4.13, observa-se uma tendência consistente de redução dos valores de Ra à medida que a profundidade de corte aumenta. Esse comportamento pode ser explicado por diversos fatores intrínsecos ao processo de microfresamento.



(a) (b)

(c)

Figura 4.17: Imagens de microscopia óptica (aumento de 100x) mostrando os microcanais em diferentes profundidades de corte, ilustrando o acabamento superficial. (a) 0,10 mm, (b) 0,12 mm, (c) 0,15 mm.

Em primeiro lugar, profundidades de corte mais elevadas favorecem uma maior estabilidade no contato entre a ferramenta e o material usinado, reduzindo vibrações e oscilações indesejadas durante o processo de remoção de material. Esse fator é crucial, pois vibrações excessivas podem resultar em irregularidades na superfície usinada, contribuindo para um aumento na rugosidade. Com cortes mais profundos, a interação entre a ferramenta e a peça torna-se mais estável, proporcionando um corte mais uniforme e previsível, resultando em um acabamento superficial mais refinado [161].

Além disso, um aumento na profundidade de corte também resulta em uma melhoria na área de contato entre a ferramenta e o material, bem como na zona de deformação plástica. Esse

fator é essencial para minimizar a ocorrência do efeito *plowing*, fenômeno caracterizado pelo deslocamento lateral do material em vez de sua remoção eficiente por cisalhamento. Quando a profundidade de corte é insuficiente, a ferramenta pode não penetrar o suficiente no material, favorecendo a formação de rebarbas e aumentando a rugosidade da superfície usinada. Por outro lado, profundidades de corte mais elevadas garantem que a ferramenta opere em uma condição de corte mais eficiente, reduzindo o efeito *plowing* e contribuindo para um acabamento superficial mais homogêneo [161].

Outro fator relevante a ser considerado é a influência da profundidade de corte na precisão dimensional do microfresamento. Em processos de usinagem em escala micrométrica, onde as tolerâncias dimensionais são extremamente rigorosas, a profundidade de corte pode desempenhar um papel fundamental na mitigação de deflexões da ferramenta e variações no dispositivo de fixação. Deflexões excessivas podem comprometer a precisão do microcanal e resultar em variações na rugosidade da superfície. Dessa forma, profundidades de corte mais elevadas podem contribuir para uma maior previsibilidade dimensional, reduzindo as incertezas associadas ao processo e garantindo uma qualidade superior da superfície usinada [161].

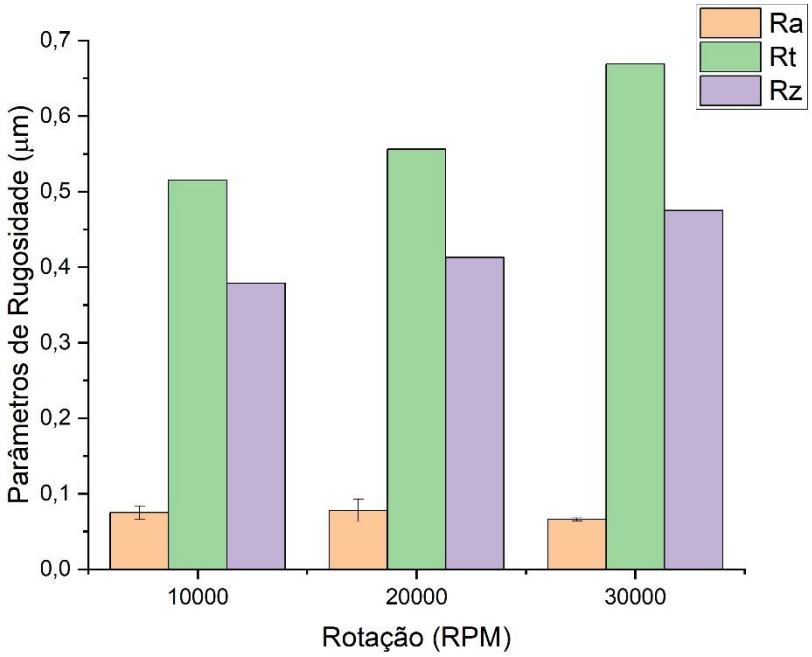
Portanto, a análise dos resultados demonstra que a otimização da profundidade de corte no microfresamento não apenas melhora a estabilidade da operação e reduz os efeitos adversos das vibrações, mas também minimiza a ocorrência do efeito de *plowing* e proporciona superfícies com menor rugosidade e maior precisão geométrica. Assim, a seleção adequada da profundidade de corte surge como um fator essencial para o controle da integridade superficial e a otimização do desempenho do processo de microfresamento de ligas de alumínio.

4.4.3. Efeitos da rotação na rugosidade da superfície

A Figura 4.15 apresenta a comparação dos valores de Ra, Rt e Rz em diferentes velocidades do eixo, evidenciando as variações na rugosidade superficial em função desse parâmetro de corte. De maneira geral, observa-se que o valor de Ra não apresenta mudanças expressivas com o aumento da velocidade do eixo.

Esse comportamento pode ser atribuído à natureza estatística do parâmetro Ra, que é menos sensível a picos isolados e variações abruptas na morfologia da superfície. Além disso, dentro das faixas moderadas de alteração da velocidade do eixo, a interação entre a ferramenta

e o material permanece relativamente estável, o que explica a ausência de variações significativas na rugosidade média [162].



..

Figura 4.18: Rugosidade em função da rotação.

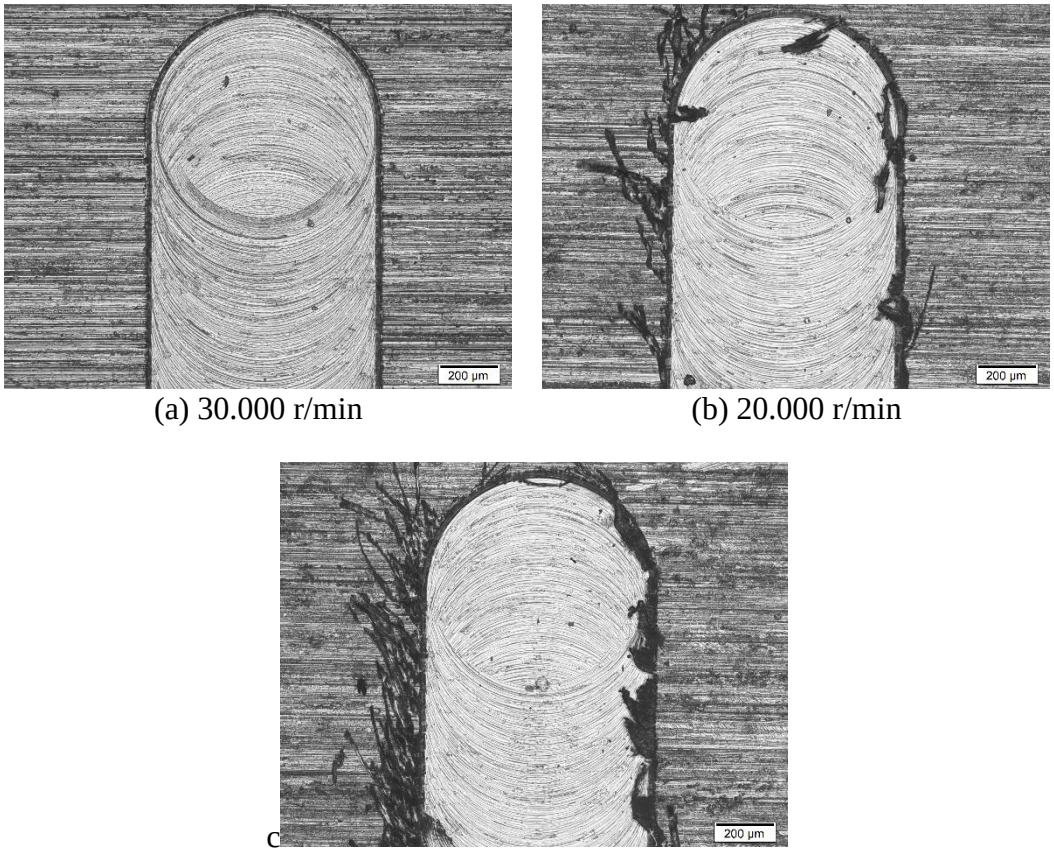
Embora Ra não apresente variações expressivas, os parâmetros Rt e Rz podem exibir tendências distintas, dependendo da faixa de velocidade do eixo analisada. Em algumas condições de corte, velocidades mais altas podem reduzir irregularidades mais severas da superfície ao minimizar a ocorrência do efeito *plowing* e melhorar a evacuação dos cavacos. No entanto, velocidades excessivamente elevadas podem, em alguns casos, intensificar vibrações indesejadas ou aumentar a taxa de desgaste da ferramenta, impactando negativamente o acabamento superficial. Dessa forma, a otimização da velocidade do eixo no microfresamento deve considerar não apenas os efeitos sobre a rugosidade da superfície, mas também a estabilidade do processo e a durabilidade da ferramenta [162].

Portanto, a análise dos efeitos da velocidade do eixo na rugosidade da superfície reforça a necessidade de uma seleção criteriosa dos parâmetros de corte no microfresamento. Ajustes inadequados podem comprometer a qualidade do acabamento superficial, enquanto a escolha otimizada da velocidade do eixo pode contribuir para a obtenção de superfícies com menor rugosidade e maior integridade.

Os parâmetros de rugosidade da superfície, Rt e Rz, apresentaram um aumento discreto à medida que a velocidade do eixo foi elevada, particularmente nas condições de 20.000 e 30.000 rpm, conforme ilustrado no gráfico de barras da Figura 18. Esse fenômeno pode ser atribuído à maior frequência de impactos da ferramenta na superfície do material, o que contribui para uma distribuição mais irregular das microgeometrias da superfície usinada. A elevação de Rt e Rz nessas condições ocorre devido à sua maior sensibilidade a variações acentuadas, destacando picos e vales que, embora pouco perceptíveis no Ra, influenciam diretamente a qualidade do acabamento superficial.

O parâmetro Ra, amplamente utilizado para caracterizar a rugosidade da superfície em processos de usinagem, não apresentou variações expressivas entre as diferentes velocidades do eixo. Embora a análise de Rt e Rz tenha indicado um leve aumento da irregularidade superficial nas condições de 20.000 e 30.000 rpm, essa alteração foi marginal e não comprometeu significativamente o padrão de acabamento obtido. Esse comportamento reforça que, apesar da influência da velocidade do eixo na dinâmica da remoção de material, sua influência sobre a rugosidade média pode ser limitada dentro da faixa de variação investigada.

A Figura 4.16 apresenta imagens obtidas por microscopia óptica com ampliação de 100x, permitindo a avaliação visual da influência da velocidade do eixo na integridade da superfície e na formação de rebarbas. A Figura 4.16(a) ilustra a condição de usinagem com velocidade do eixo de 30.000 rpm, onde observa-se a menor formação de rebarbas tanto na direção concordante quanto na discordante do fresamento. Esse resultado sugere que a maior velocidade de corte favoreceu a evacuação eficiente do cavaco e a redução do efeito *plowing*, minimizando a formação de rebarbas.



(a) 30.000 r/min (b) 20.000 r/min

C (c) 10.000 r/min

Figura 4.19: MO óptica (aumento de 100x) dos microcanais em diferentes rotações.

Por outro lado, na Figura 4.16(b), que representa a condição de usinagem a 20.000 rpm, observa-se um aumento considerável na formação de rebarbas, especialmente na direção concordante do fresamento. Esse comportamento pode ser explicado pela redução da eficiência do corte, associada ao menor efeito de cisalhamento do material e ao consequente acúmulo de deformação plástica na borda da peça usinada. Esse fenômeno é ainda mais evidente na Figura 19(c), que exibe a condição de usinagem a 10.000 rpm. Nessa velocidade, a formação de rebarbas é significativamente mais pronunciada, com rebarbas mais longas na direção concordante e rebarbas mais curtas, porém mais espessas, na direção discordante.

Dessa forma, conclui-se que a variação da velocidade do eixo desempenha um papel crítico no fresamento, afetando diretamente a formação de rebarbas. Embora as medições de rugosidade Ra, Rt e Rz não tenham apresentado mudanças significativas, a avaliação visual das micrografias indica que velocidades do eixo mais baixas favorecem a intensificação do efeito *plowing*, levando ao aumento na formação de rebarbas. Esse efeito compromete a qualidade da superfície usinada e pode impactar a funcionalidade de peças de alta precisão. Assim, a escolha

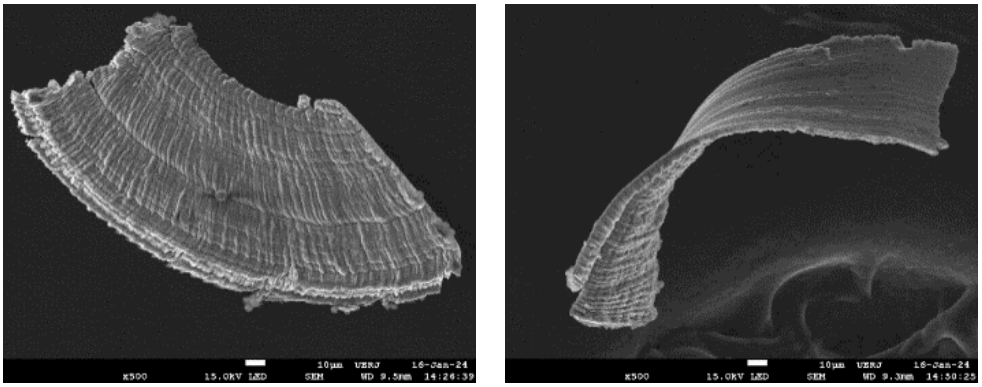
otimizada da velocidade do eixo é essencial para garantir a integridade superficial e minimizar defeitos indesejados no microfresamento da liga AA2024.

4.5. Morfologia do Cavaco

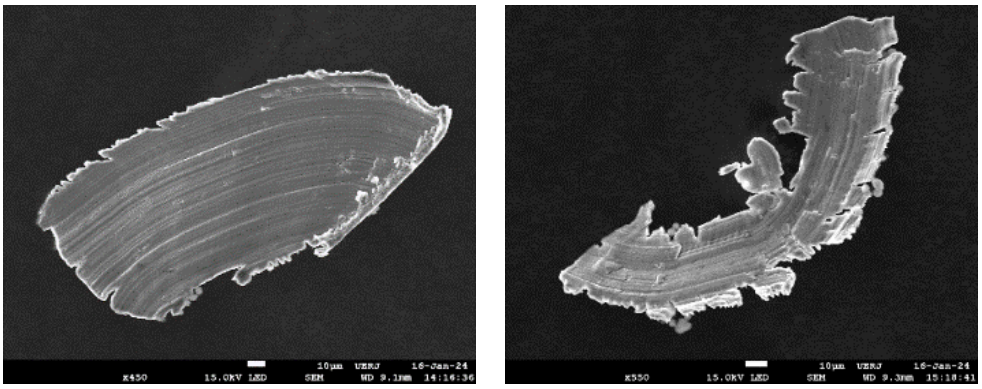
A análise dos cavacos gerados durante a microusinagem é um aspecto fundamental para compreender os mecanismos de remoção de material e avaliar a qualidade do processo. A formação do cavaco está diretamente relacionada aos parâmetros de corte aplicados, sendo influenciada, sobretudo, pela velocidade de avanço. Diferentes velocidades de avanço resultam em distintas morfologias de cavaco, impactando diretamente na integridade superficial da peça usinada e no desempenho da ferramenta. Assim, a caracterização dos cavacos permite identificar condições de corte ideais, minimizar efeitos indesejáveis, como o efeito *plowing*, e otimizar a eficiência do processo.

4.5.1. Morfologia dos cavacos em função de diferentes velocidades de avanço

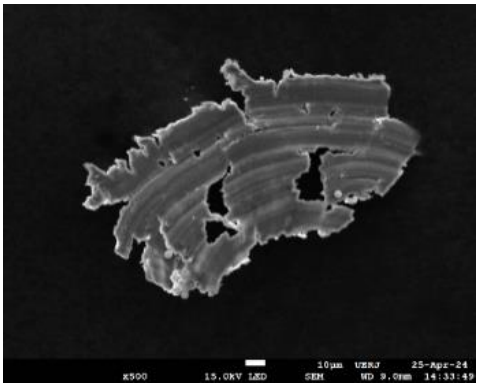
A Figura 4.17 ilustra imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (SEM) com ampliação de 500x dos cavacos formados sob diferentes velocidades de avanço. Essas imagens permitem a análise detalhada do mecanismo de formação do cavaco em função da variação desse parâmetro, evidenciando como a interação entre ferramenta e material se altera conforme a taxa de remoção de material. Essa avaliação é essencial para compreender as transições entre regimes de corte favoráveis e desfavoráveis, possibilitando a determinação de condições otimizadas para a microusinagem, garantindo melhor acabamento superficial e menor desgaste da ferramenta.



(a) 120 mm/min (b) 90 mm/min



(c) 60 mm/min (d) 30 mm/min



(e) 20 mm/min

Figura 4.20: MEV (aumento de 500x) dos cavacos, comparando a morfologia para diferentes velocidades de avanço.

Na condição de avanço de 120 mm/min, representada na Figura 4.17(a), o cavaco formado apresenta uma morfologia contínua e uniforme, alinhada à geometria esperada para um processo de microfresamento eficiente. Esse resultado sugere que a velocidade de avanço aplicada permitiu que o corte ocorresse de forma limpa e controlada, sem interferências significativas da deformação plástica ou da recuperação elástica do material. A formação de cavacos íntegros indica que a ferramenta removeu o material predominantemente por

cisalhamento, reduzindo os efeitos indesejáveis de aderência e minimizando a possibilidade de formação de rebarbas excessivas.

A morfologia dos cavacos fornece informações valiosas sobre a eficiência do corte. Cavacos uniformes e bem definidos, como os observados na velocidade de avanço de 120 mm/min, são indicativos de uma remoção de material eficiente, onde o corte ocorre dentro dos limites ideais de espessura mínima do cavaco indeformado. Além disso, a ausência de fragmentação excessiva ou cavacos longos e aderentes sugere que as forças de usinagem estão equilibradas, reduzindo o risco de desgaste prematuro da ferramenta e garantindo um acabamento superficial superior.

Dessa forma, a análise dos cavacos confirma que a escolha adequada da velocidade de avanço desempenha um papel crucial na estabilidade do processo de microfresamento. A taxa de 120 mm/min demonstrou ser um parâmetro favorável para a remoção eficiente do material, contribuindo para a obtenção de cavacos íntegros e minimizando defeitos na superfície usinada.

A redução da velocidade de avanço para 90 mm/min (Figura 4.17(b)) revelou uma degradação na qualidade do cavaco, evidenciada pela presença de descontinuidades e quebras ao longo de seus contornos. Esse fenômeno pode ser atribuído à menor disponibilidade de energia cinética no corte, resultando em uma remoção de material menos eficiente e na formação de cavacos mecanicamente frágeis. A perda de integridade estrutural dos cavacos nessas condições reflete um processo de cisalhamento menos eficaz, o que pode comprometer a qualidade da superfície usinada e a vida útil da ferramenta.

Com a redução da velocidade de avanço para 60 mm/min (Figura 4.17(c)), foi possível observar um agravamento desse comportamento, caracterizado pelo surgimento de rebarbas nos contornos do cavaco. A presença dessas rebarbas sugere que o material não está sendo completamente cortado, mas sim parcialmente extrudado e deformado. Embora essa velocidade de avanço ainda permita a geração de cavacos contínuos, a formação de rebarbas é um indicativo de que o processo está se aproximando de um regime de corte menos eficiente, com maior interferência do efeito *plowing*.

Quando a velocidade de avanço foi reduzida para 30 mm/min e 20 mm/min (Figuras 4.17(d) e 4.17(e)), a degradação na morfologia dos cavacos tornou-se ainda mais evidente. Nessas condições, foi observada uma fragmentação acentuada, acompanhada pela presença de pequenas cavidades e rachaduras. Esse comportamento está diretamente associado ao efeito *plowing*, no qual a ferramenta de corte não consegue realizar uma remoção eficiente do material, resultando em um processo dominado por deformação plástica e recuperação elástica.

A ferramenta, em vez de cisalhar o material de maneira eficiente, começa a empurrá-lo, aumentando a resistência ao corte e levando à formação de cavacos instáveis e de baixa qualidade.

A Figura 4.17(d) desempenha um papel fundamental na compreensão dessa transição para a região do efeito *plowing*. A análise dessa imagem revela a presença de rebarbas nas extremidades dos cavacos, bem como a formação de crateras e microfissuras ao longo de sua superfície. Esses defeitos estruturais indicam que o processo de remoção de material está ocorrendo de forma irregular, comprometendo tanto a integridade dos cavacos quanto a qualidade da superfície usinada. Para uma avaliação mais detalhada, foi realizada uma análise complementar por MEV com ampliação de 2500x, conforme ilustrado na Figura 4.18. Essa análise confirma a presença de deformações severas nos cavacos, características típicas do efeito *plowing*.

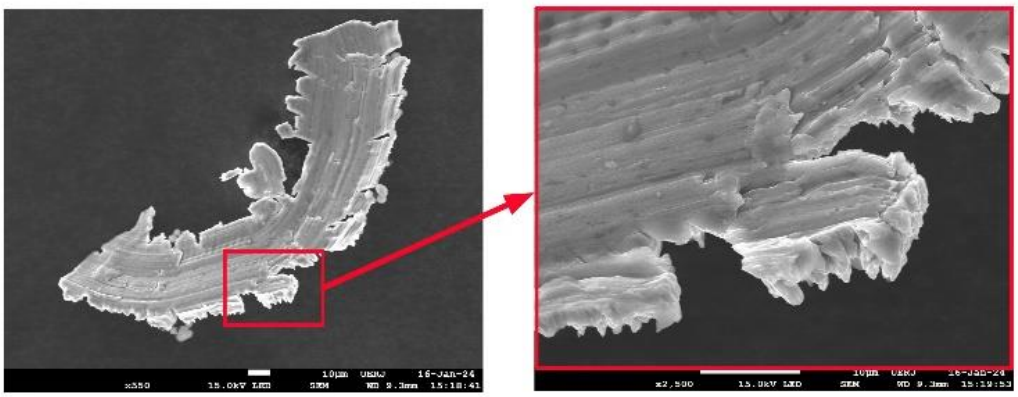


Figura 4.21: MEV do cavaco obtido sob condição de efeito *plowing*, aumento de 2500x.

Já a Figura 4.17(e) representa a condição mais crítica dentro do regime de *plowing*, onde a fragmentação dos cavacos se intensifica a ponto de dificultar sua coleta e análise. Em função da elevada fragilidade dos cavacos gerados nessa condição, muitos deles se desintegram antes mesmo de serem recuperados para caracterização. Além disso, como o sistema de microusinagem opera com ar comprimido para remoção de cavacos, uma grande quantidade desses fragmentos é dispersada, dificultando a obtenção de uma amostra representativa para análise.

Os fenômenos observados podem ser explicados pela relação entre a velocidade de avanço e a energia disponível para o corte na microusinagem. Em velocidades de avanço mais elevadas, a energia fornecida ao sistema é suficiente para garantir um corte contínuo e eficiente,

resultando na formação de cavacos íntegros e bem definidos. No entanto, à medida que a velocidade de avanço é reduzida, a quantidade de energia transmitida ao material também diminui, tornando o corte menos eficiente e levando à formação de cavacos com imperfeições, como quebras nos contornos e rebarbas [163].

Quando a velocidade de avanço atinge valores extremamente baixos, o efeito *plowing* se torna predominante, caracterizando um processo no qual a ferramenta de corte deixa de cisalhar o material de maneira efetiva e passa a empurrá-lo. Esse fenômeno resulta em um aumento significativo da deformação plástica, elevando as forças de usinagem e acelerando o desgaste da ferramenta. Como consequência, a integridade superficial da peça usinada é prejudicada, e o controle dimensional torna-se mais desafiador [163].

Portanto, a seleção adequada da velocidade de avanço é um fator crítico para a otimização da qualidade do cavaco e da eficiência do processo de microusinagem. O ajuste correto desse parâmetro permite minimizar os efeitos negativos do *plowing*, reduzir a ocorrência de defeitos nos cavacos e melhorar o desempenho geral do processo, garantindo superfícies usinadas com alta precisão e acabamento superior.

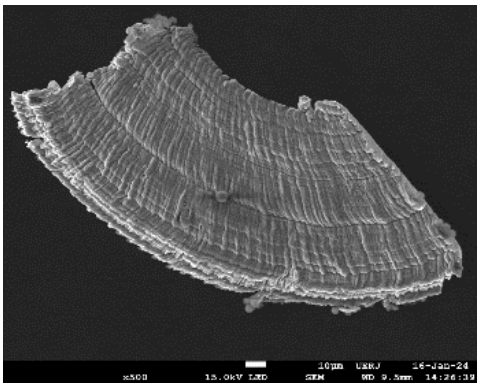
4.5.2. Morfologia dos cavacos em função de diferentes profundidades de corte

A Figura 4.19 apresenta a morfologia dos cavacos obtidos sob diferentes profundidades de corte, permitindo a análise da influência desse parâmetro na formação e conformação dos cavacos. Na Figura 4.19(a), correspondente a uma profundidade de corte de 100 micrômetros, observa-se que os cavacos foram gerados de maneira uniforme, com uma geometria bem definida e conforme o comportamento esperado para essa condição de usinagem. Esse resultado indica que a ferramenta de corte operou em um regime estável de remoção de material, onde o cisalhamento ocorreu de maneira controlada, sem sinais evidentes de deformação plástica severa ou fragmentação.

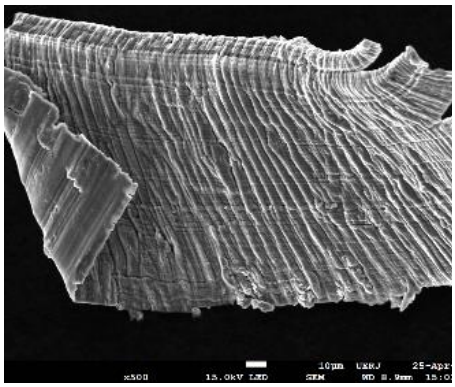
Na Figura 4.19(b), a profundidade de corte foi aumentada para 120 micrômetros. Esse aumento resultou em cavacos mais longos e espessos, refletindo a maior quantidade de material removido por unidade de tempo. Esse comportamento pode ser atribuído ao maior engajamento da ferramenta com o material, o que leva a um acréscimo na espessura do cavaco formado. A relação entre a profundidade de corte e o comprimento dos cavacos é um fenômeno esperado,

pois maiores profundidades de corte geram forças de cisalhamento mais intensas, promovendo a remoção de volumes mais significativos de material.

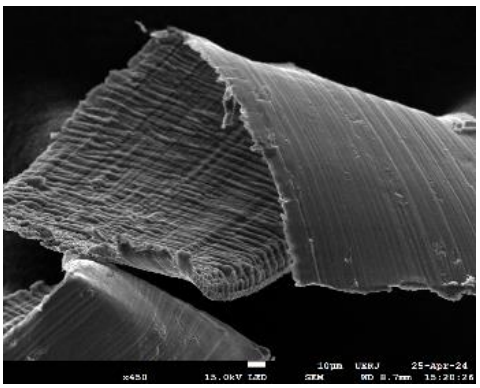
Já na Figura 4.19(c), onde a profundidade de corte foi elevada para 150 micrômetros, verificou-se um acréscimo ainda mais expressivo no comprimento e na espessura dos cavacos. Esse resultado pode ser explicado pelo aumento na energia disponível para o cisalhamento do material, que permite a formação de cavacos com seções transversais mais robustas e comprimentos superiores aos observados em profundidades menores. A intensificação da ação de corte em profundidades maiores tende a resultar em um escoamento mais eficiente do material, favorecendo a formação de cavacos contínuos e homogêneos.



(a) 0,10 mm



(b) 0,12 mm



(c) 0,15 mm

Figura 4.22: MEV dos cavacos, (500x), comparando a morfologias para diferentes profundidades de corte.

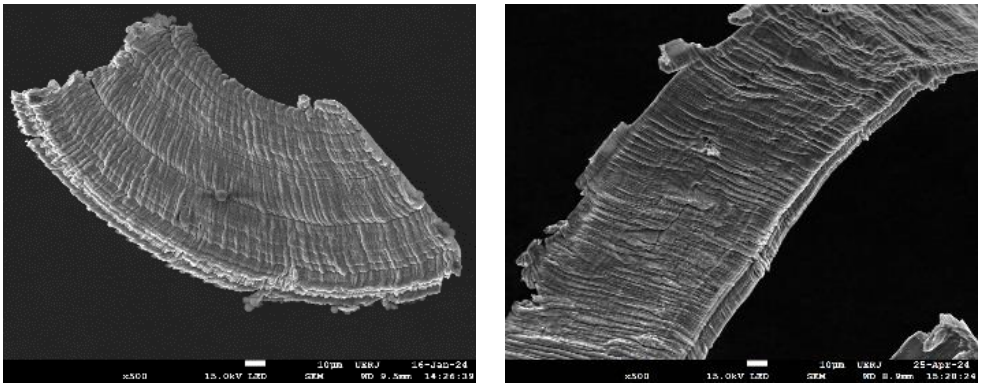
Um aspecto relevante dessa análise é que, em todas as condições de profundidade de corte avaliadas, os cavacos formaram-se de maneira homogênea, sem sinais característicos do efeito *plowing*. A ausência de fragmentação e deformação excessiva nos cavacos sugere que a energia fornecida ao sistema foi suficiente para garantir um corte predominantemente por

cisalhamento, sem que o material fosse indevidamente empurrado ou extrudado. Isso indica que a ferramenta de corte manteve uma interação estável com a superfície da peça usinada, resultando em cavacos com geometrias consistentes e sem irregularidades significativas.

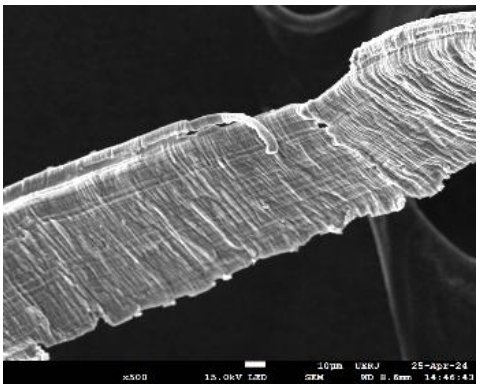
Portanto, a análise dos cavacos revela que, para as profundidades de corte avaliadas, o processo de microfresamento ocorreu em condições favoráveis, onde a remoção de material foi realizada de maneira eficiente, sem degradação significativa da integridade superficial da peça. Esses resultados destacam a importância da correta seleção da profundidade de corte no microfresamento, uma vez que esse parâmetro influencia diretamente a formação dos cavacos e, consequentemente, a qualidade final do processo de usinagem.

4.5.3. Morfologia dos cavacos em função de diferentes rotações do eixo-árvore.

A Figura 4.20 apresenta a morfologia dos cavacos formados sob diferentes velocidades de rotação do eixo-árvore, evidenciando o impacto desse parâmetro na conformação e qualidade do cavaco.



(a) 30.000 r/min (b) 20.000 r/min



(c) 10.000 r/min

Figura 4.23: MEV dos cavacos, (500x), comparando a morfologia para diferentes rotações.

Na Figura 4.20(a), correspondente a uma velocidade de rotação de 30.000 rpm, observa-se a formação de cavacos homogêneos, com bordas bem definidas e contornos regulares. Esse comportamento indica um corte eficiente, no qual a energia de cisalhamento foi aplicada de maneira otimizada, permitindo a remoção do material de forma controlada e com mínima deformação plástica residual.

Já na Figura 4.20(b), onde a velocidade de rotação foi reduzida para 20.000 rpm, nota-se um aumento no comprimento dos cavacos e a presença de fraturas nas bordas. Esse fenômeno sugere uma diminuição na eficiência do processo de cisalhamento, o que resulta em cavacos de qualidade inferior, com maior variação na espessura e contornos irregulares. A menor velocidade de corte reduz a taxa de remoção de material e favorece o aumento do atrito entre a ferramenta e a peça usinada, elevando a temperatura na zona de corte e promovendo um escoamento menos uniforme do material.

Na Figura 4.20(c), onde a velocidade do eixo-árvore foi ainda mais reduzida, observa-se uma tendência ainda mais acentuada de alongamento dos cavacos e fragmentação das bordas. Apesar de a profundidade de corte ter sido mantida constante, verifica-se uma redução

perceptível na espessura do cavaco, associada a um aumento na fragilidade e maior incidência de fraturas ao longo das bordas. Esse efeito pode ser explicado pelo prolongamento do tempo de contato entre a ferramenta e o material usinado, o que intensifica a deformação plástica e leva a um afinamento dos cavacos. Além disso, a redução da velocidade de corte pode aumentar a adesão do material à aresta de corte, o que pode interferir na remoção eficiente do cavaco e resultar em sua fragmentação.

A análise das imagens revela que a velocidade de rotação do eixo-árvore desempenha um papel fundamental na determinação da morfologia dos cavacos no microfresamento. Velocidades de rotação mais altas proporcionam condições de corte mais estáveis, favorecendo a formação de cavacos bem definidos, sem fraturas ou deformações excessivas. Em contrapartida, velocidades de rotação mais baixas comprometem a eficiência do corte, resultando em cavacos alongados, com menor espessura e bordas irregulares, indicativos de uma remoção de material menos eficiente e com maior dissipação de energia na forma de deformação plástica e atrito.

Dessa forma, a escolha adequada da velocidade de rotação do eixo-árvore é essencial para otimizar a conformação dos cavacos e, consequentemente, melhorar a qualidade do processo de microfresamento. A identificação dessas variações morfológicas é crucial para compreender os mecanismos de remoção de material e minimizar efeitos indesejáveis, como o efeito *plowing* e a formação de arestas postiça de corte, garantindo maior precisão dimensional e melhor acabamento superficial na usinagem de ligas de alumínio como a AA2024.

5. Conclusões

Este estudo apresenta uma contribuição inédita ao demonstrar, de forma integrada, os efeitos das forças de usinagem em correlação com a morfologia dos cavacos, os parâmetros de rugosidade superficial e a formação de rebarbas no microfresamento da liga AA2024. A abordagem combinada dessas análises, ainda pouco explorada na literatura, reforça o caráter inovador da pesquisa e amplia a compreensão dos mecanismos associados ao efeito plowing. Além disso, os resultados permitiram identificar os parâmetros de corte mais adequados para a aplicação eficiente da microusinagem nessa liga, contribuindo para o aprimoramento do processo em contextos industriais de alta exigência.

- As forças de usinagem aumentaram proporcionalmente com a profundidade de corte e com a taxa de avanço, tanto por maior remoção de material quanto pela intensificação do efeito plowing em avanços muito baixos. A velocidade do eixo-árvore teve influência mínima sobre essas forças.
- A profundidade de corte de 0,15 mm proporcionou melhor acabamento superficial, devido à redução do efeito plowing. A rugosidade média (Ra) mostrou pouca variação com a rotação, mas os parâmetros Rt e Rz aumentaram levemente nas maiores velocidades.
- Rebarbas mais espessas foram observadas em rotações baixas e em avanços reduzidos, enquanto 30.000 rpm resultaram em menor formação de rebarbas. Avanços baixos também favoreceram a formação de óxidos na superfície, associada a tensões térmicas e mecânicas elevadas.
- A combinação ideal para a integridade superficial foi obtida com avanço de 120 mm/min, profundidade de 0,15 mm e rotação de 30.000 rpm. Esses parâmetros minimizam o efeito plowing, melhoram a qualidade do corte e aumentam a vida útil da ferramenta, sendo especialmente relevantes para aplicações de alta exigência, como na indústria aeroespacial.

6. Propostas de trabalhos futuros

Embora este estudo tenha contribuído significativamente para a compreensão dos efeitos dos parâmetros de corte no microfresamento da liga de alumínio AA2024, diversas questões ainda permanecem em aberto e podem ser aprofundadas em investigações futuras.

- Realização de análises microestruturais das amostras usinadas, por meio de cortes transversais ao longo das regiões submetidas ao processo de microusinagem;
- Ensaios de corrosão nas amostras usinadas;
- Análise do desgaste da ferramenta de corte;
- Medição da largura dos microcanais.

Referências Bibliográficas

[1] D. Dornfeld, D. J. Min, Y. Takeuchi, “Recent Advances in Mechanical Micromachining,” CIRP Annals, vol. 55, no. 2, pp. 745-768, 2006.

[2] M. Weck, H. A. Brecher, “Process Monitoring in Micro Manufacturing,” CIRP Annals, vol. 54, no. 2, pp. 471-491, 2005.

[3] J. A. McGeough, Micromachining of Engineering Materials, CRC Press, 2001.

[4] K. Cheng, Micro-Manufacturing: Design and Manufacturing of Micro-Products, Wiley, 2007.

[5] M. Ratchev, Micro-Manufacturing Engineering and Technology, Elsevier, 2010.

[6] D. Dornfeld, S. Min, and Y. Takeuchi, “Recent advances in mechanical micromachining,” CIRP Annals, vol. 55, no. 2, pp. 745–768, 2023.

[7] J. Cao, Y. Zhao, and W. Liu, “Influence of minimum uncut chip thickness in micro-milling: A review,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 186, p. 103901, 2023.

[8] M. Masoumi, M. S. Mahdavian, and S. J. Hossain, “Scaling effects and surface integrity in micromachining of metallic materials: A comprehensive review,” Journal of Manufacturing Processes, vol. 90, pp. 134–152, 2024.

[9] M. Tiryakioğlu, “A review of precipitation strengthening in aluminum alloys,” Materials Science and Engineering: A, vol. 880, p. 144023, 2024.

[10] A. Prasad, R. D. K. Misra, and A. R. Marder, “Microstructural characteristics and mechanical properties of Al-Cu-Mg aerospace alloys,” Progress in Materials Science, vol. 135, p. 101081, 2023.

[11] X. Zhang, Z. Wang, and L. Liu, “Fatigue performance and crack growth behavior of Al 2024-T3 alloy: Influence of aging and microstructural evolution,” International Journal of Fatigue, vol. 172, p. 107556, 2024.

[12] P. Liu, Y. Wang, and J. Wang, “Oxidation and corrosion resistance of Al-Cu-Mg alloys: The role of passive oxide layers,” Corrosion Science, vol. 216, p. 110965, 2024.

[13] M. C. Pereira, C. A. M. Dutra, E. N. Codaro e R. Z. Nakazato, "Efeito do tratamento térmico na corrosão das ligas de alumínio 2024 e 7050 em meio salino," Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, vol. 20, nº 1, pp. 63-66, 2000.

[14] H. S. Kang, "Estudo da influência do teor de íons sulfato na corrosão do alumínio 2024-T3," Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

[15] M. X. Milagre et al., "Comparação do comportamento de corrosão da liga convencional AA2024-T351 e da liga Al-Li 2098-T351," in 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, 2016

[16] XU, K. et al. An experimental investigation of micro-machinability of aluminumalloy 2024 using Ti(C7N3)-based cermet micro end-mill tools. Journal of Materials Processing Technology, v. 235, p. 13-17, Abril 2016.

[17] F. B. de Oliveira, A. R. Rodrigues e S. R. da S. Moreira, "Formação de rebarba e energia específica de corte no microfresamento," in Anais do 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), Salvador, BA, 2015.

[18] M. Jin, P. Liao e Y. Zhang, “Experimental Study on the Minimum Undeformed Chip Thickness in Micro-Milling and the Mechanism of Ploughing Effect,” Micromachines, vol. 11, n.º 10, p. 924, out. 2020.

[19] A. C. Araujo, A. L. Mougo e F. O. Campos, "Microusinagem mecânica," in Usinagem para Engenharia, 1ª ed., Rio de Janeiro: CEFET/RJ, 2020, cap. 12.

[20] J. P. Davim, "Fundamentals of Metal Machining," in Machining: Fundamentals and Recent Advances, 1ª ed., Londres: Springer-Verlag, 2008, pp. 1-34.

[21] D. C. S. de Souza e E. R. da Silva, "Contribuição ao estudo da influência dos parâmetros de corte e da geometria das ferramentas na rugosidade superficial de peças torneadas," in Anais do Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica (CONNEPI), Palmas, TO, 2013.

[22] A. R. Machado, Teoria da Usinagem dos Materiais. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2015.

[23] R. C. da Silva e P. Silva, "Processos de Fabricação: Análise e Diferenciação dos Processos de Usinagem Convencional e Não Convencional," Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade Anhanguera de Pindamonhangaba, Pindamonhangaba, SP, 2021.

[24] Quimatic Tapmatic, "A influência dos fluidos de corte na usinabilidade dos metais," Quimatic Tapmatic, 2016.

[25] L. H. Constantino, "Usinagem e sustentabilidade: O uso dos fluidos de corte e seus impactos ambientais," Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Paulista, São Paulo, 2022.

[26] A. E. Diniz, F. C. Marcondes e N. L. Coppini, Tecnologia da Usinagem dos Materiais, 3ª ed., São Paulo: Artliber Editora, 2001.

[27] J. P. Davim, "Fundamentals of Metal Machining," in Machining: Fundamentals and Recent Advances, 1ª ed., Londres: Springer-Verlag, 2008, pp. 1-34.

[28] M. B. Silva, D. F. Cunha, M. Ziberov, W. N. P. Hung e M. J. Jackson, "Principais aspectos do processo de microusinagem," Revista Máquinas e Metais, fev. 2016.

[29] A. G. dos Santos, "Investigação Experimental do Microfresamento do Aço Inoxidável AISI 316L," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

[30] M. A. S. Mehrpouya, S. M. S. Mahmoudi, M. J. Jackson e M. B. Silva, "A review on micro milling: recent advances and future trends," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 114, pp. 1–26, 2021.

[31] M. A. S. Mehrpouya, S. M. S. Mahmoudi, M. J. Jackson e M. B. Silva, "A review on micro milling: recent advances and future trends," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 114, pp. 1–26, 2021.

[32] M. B. Silva, D. F. Cunha, M. Ziberov, W. N. P. Hung e M. J. Jackson, "Principais aspectos do processo de microusinagem," Revista Máquinas e Metais, fev. 2016.

[33] F. H. Manarelli, "Estudo do desgaste das ferramentas no microfresamento de aço inoxidável AISI 316L," Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2017.

[34] T. Masuzawa, "State of the art of micromachining," CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 49, no. 2, pp. 473–488, 2000.

[35] M. A. Câmara et al., "State of the art on micromilling of materials: a review," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 8, no. 28, pp. 673–685, 2012.

[36] R. Arai, "Estudo do comportamento dinâmico do processo de fresamento de topo em aço endurecido," Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

[37] D. Baldo, "Estudo do microfresamento da liga de alumínio AA 6351-T6," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, MG, 2018.

[38] G. de P. Silva, D. de Oliveira e L. Malcher, "Numerical study of the minimum uncut chip thickness in micro-machining of Inconel 718 based on Johnson–Cook isothermal model," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 127, pp. 2707–2721, 2023.

[39] D. de Oliveira, "Efeito escala e integridade superficial no microfresamento da liga de níquel Inconel 718," Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2019.

[40] E. O. Lucas, R. B. Mundin, E. S. Costa e A. M. O. Siqueira, "Estudo da topografia superficial no fresamento da liga de alumínio 6351 T6," Journal of Engineering and Exact Sciences, vol. 8, no. 3, pp. 1–9, 2022.

[41] Y. Gong, H. Ding, and T. R. Kurfess, "Investigation of strain hardening effect in micro milling of aluminum alloys," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 144, pp. 103428, 2019. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2019.103428.

[42] D. Dornfeld and S. Min, "A review of recent advances in micromachining," Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 126, no. 4, pp. 717–725, 2004. DOI: 10.1115/1.1800260.

[43] B. Denkena, A. Biermann, and D. Bertram, "Influence of micro milling process parameters on the surface integrity of aluminum alloys," Procedia CIRP, vol. 46, pp. 367–370, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.135.

[44] F. Vollertsen and H. Schulze Niehoff, "Micro machining—a new field of research," Production Engineering, vol. 2, no. 1, pp. 5–8, 2008. DOI: 10.1007/s11740-008-0092-3.

[45] K. Cheng, Micro Cutting: Fundamentals and Applications, John Wiley & Sons, 2013.

[46] X. Lu, C. Cong, and P. Hou, "Improved Cutting Force Modelling in Micro-Milling Aluminum Alloy LF 21 Considering Tool Wear," Applied Sciences, vol. 12, May 2022, DOI: 10.3390/app12115357.

[47] M. R. Bock et al., "Effect of Surface Finish and Burr Formation on the Biocompatibility of Micromachined Titanium Implants," Biomedical Engineering Online, vol. 19, no. 1, pp. 1-13, 2020.

[48] M. C. Shaw, Metal Cutting Principles, 2nd ed., Oxford University Press, 2005.

[49] K. Cheng, Micro Cutting: Fundamentals and Applications, John Wiley & Sons, 2013.

[50] A. V. Ghasemi, M. H. Azadikhah, and M. E. Omidvar, "Investigation of Tool Edge Radius Effects on Minimum Chip Thickness and Cutting Forces in Micro-Milling," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 114, no. 3, pp. 803–815, 2021.

[51] X. Liu, Y. Liu, and J. Ni, "Influence of Tool Edge Radius and Cutting Parameters on Cutting Forces in Micro Milling," Journal of Materials Processing Technology, vol. 290, p. 117002, 2021.

[52] R. A. Rahman Rashid et al., "The Role of Cutting Edge Radius and Ploughing Effect in Micromilling of Aluminum Alloys," Materials and Manufacturing Processes, vol. 34, no. 5, pp. 543–552, 2019.

[53] K. M. Park and J. W. Sutherland, "Chip Formation Mechanisms in the Micro-Endmilling of Aluminum 6061-T6," Journal of Manufacturing Processes, vol. 68, pp. 162–172, 2021.

[54] F. Aramcharoen and P. T. Mativenga, "Size Effect and Tool Geometry in Micromilling of Tool Steel," Precision Engineering, vol. 32, no. 2, pp. 83–90, 2008.

[55] Y. Xie, J. Cao, and W. Lian, "Influence of Tool Geometry on Cutting Forces and Surface Quality in Ball Nose Micromilling," Materials, vol. 15, no. 8, p. 2769, 2022.

[56] P. R. Chhapgar and S. S. Joshi, "Tool Wear and Machining Forces in Micro Ball-End Milling of Ti-6Al-4V Alloy," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 95, pp. 467–479, 2018.

[57] A. Kumar, H. Singh, and P. K. Jain, “Effect of grain size on machining characteristics in micro-cutting of polycrystalline metals,” Precision Engineering, vol. 72, pp. 384–395, 2021. doi: 10.1016/j.precisioneng.2021.08.002.

[58] X. Wang, C. Liu, and Y. Li, “Influence of grain size and crystallographic orientation on material removal mechanism in micro-cutting of aluminum alloys,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 297, p. 117265, 2022. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117265.

[59] L. Zhang, B. Guo, and M. Zhou, “Experimental investigation on micro-machining of single-crystal and polycrystalline materials: A comparative study,” CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 40, pp. 172–183, 2023. doi: 10.1016/j.cirpj.2022.10.012.

[60] T. Sun, W. Li, and K. Cheng, “Optimization of cutting parameters in micro-milling to mitigate *plowing* effect,” International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 117, no. 3-4, pp. 1135–1150, 2022. doi: 10.1007/s00170-021-07894-1.

[61] S. Gupta, R. R. Prasad, and N. M. Suri, “Effect of tool geometry and coating on *plowing* effect in micro-machining of aluminum alloys,” Precision Engineering, vol. 76, pp. 405–419, 2022. doi: 10.1016/j.precisioneng.2021.09.007.

[62] J. Kim, D. Park, and Y. Suh, “Investigation on the *plowing* effect and surface quality in micro-milling of metallic materials,” CIRP Annals, vol. 72, no. 1, pp. 141–144, 2023. doi: 10.1016/j.cirp.2023.02.009.

[63] Y. Altintas, Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design, 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.

[64] T. Uhlmann, M. Oberschmidt, M. Doll, and D. Biermann, “Recent advances in micro milling: A review,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 102, no. 9-12, pp. 3317–3341, Oct. 2019.

[65] J. Yan, A. Azarhoushang, and J. Klocke, “Recent developments in precision and ultra-precision machining of advanced materials,” CIRP Annals, vol. 69, no. 2, pp. 622–643, 2020.

[66] P. D. Jain, K. Maity, and P. R. Chaudhari, “A study on the performance of TiAlN and AlCrN-coated carbide tools in micro-milling of Ti-6Al-4V,” Journal of Manufacturing Processes, vol. 68, pp. 453–468, 2021.

[67] G. Kiswanto, D. L. Zariatin e T. J. Ko, "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, vol. 16, no. 4, pp. 435–450, Oct. 2014. [68] M. J. Jackson and J. Paulo Davim, Microfabrication and Precision Engineering. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017. DOI: 10.1201/9781315150120.

[69] S. Venkatesh and J. Paulo Davim, “Precision and micro machining: Review,” Materials Today: Proceedings, vol. 5, no. 9, pp. 19093–19102, 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.222.

[70] Y. Gong, C. J. Hernandez, and A. R. Diaz, “Surface roughness characterization using white light interferometry and atomic force microscopy,” Precision Engineering, vol. 64, pp. 243–254, 2020. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.02.003.

[71] X. Liu, A. DeVor, S. Kapoor, and K. Ehmann, “The mechanics of machining at the microscale: Assessment of the current state of the science,” Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 126, no. 4, pp. 666–678, 2004. DOI: 10.1115/1.1800267.

[72] T. Özel and Y. Karpat, “Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 45, no. 4–5, pp. 467–479, 2005. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.09.007.

[73] S. J. Zhang, J. L. Sun, and J. P. Davim, “Machining of micro/meso-scale structures on hard/brittle materials,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 49, no. 1, pp. 33–40, 2009. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.08.004.

[74] J. M. Ribeiro, J. M. C. P. Quaresma, and J. P. Davim, “Optimization of cutting parameters in turning of aluminum alloys using statistical techniques,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 209, no. 3, pp. 1709–1717, 2009. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.050.

[75] M. Aramcharoen and P. T. Mativenga, “Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel,” Precision Engineering, vol. 33, no. 4, pp. 402–407, 2009. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2008.08.003.

[76] G. Kiswanto, D. L. Zariatin, and T. J. Ko, “The effect of spindle speed, feed-rate and machining time on the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation,” Journal of Manufacturing Processes, vol. 16, no. 4, pp. 435–450, Oct. 2014. DOI: 10.1016/j.jmapro.2014.05.003.

[77] A. R. Shinge and U. A. Dabade, “The effect of process parameters on material removal rate and dimensional variation of channel width in micro-milling of Aluminium Alloy 6063 T6,” Procedia Manufacturing, vol. 20, pp. 127–133, 2018. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.018.

[78] X. Lu, C. Cong, and P. Hou, “Improved Cutting Force Modelling in Micro-Milling Aluminum Alloy LF 21 Considering Tool Wear,” Applied Sciences, vol. 12, no. 11, p. 5357, 2022. DOI: 10.3390/app12115357.

[79] K. Kadirgama, M. Ramasamy, and M. M. Noor, “Tool wear and surface roughness in micro-milling of aluminum alloy: A review,” Materials Today: Proceedings, vol. 42, pp. 3055–3060, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.927.

[80] D. Dornfeld, S. Min, and Y. Takeuchi, “Recent Advances in Mechanical Micromachining,” CIRP Annals, vol. 55, no. 2, pp. 745–768, 2006. DOI: 10.1016/j.cirp.2006.10.006.

[81] L. Bian, J. Cheng, and M. J. Zeng, “Investigation of Chip Formation Mechanisms and Surface Integrity in Micro-Milling of Aluminum Alloys,” Journal of Manufacturing Processes, vol. 60, pp. 228–239, 2020. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.033.

[82] K. Cheng, Machining Dynamics: Fundamentals, Applications and Practices. London, UK: Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5.

[83] W. Grzesik, Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling, and Applications, 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2016. DOI: 10.1016/B978-0-08-100533-3.00001-3.

[84] M. C. Shaw, Metal Cutting Principles, 2nd ed. Oxford, UK: Oxford University Press, 2005. DOI: 10.1093/oso/9780195142068.001.0001.

[85] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, Manufacturing Engineering and Technology, 7th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2014.

[86] E. M. Trent and P. K. Wright, Metal Cutting, 4th ed. Boston, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2000. DOI: 10.1016/B978-0-7506-7069-7.X5000-6.

[87] K. Kronenberg, Machining Science and Application: Theory and Practice for Operation and Development of Machining Processes, 1st ed. Oxford, UK: Pergamon Press, 1966.

[88] F. W. Kienzle, "Determination of forces in machining processes and their practical application," CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 3, no. 1, pp. 151-159, 1954. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61004-0.

[89] K. Maekawa, T. Obikawa, Y. Yamane, and T. Childs, Metal Machining: Theory and Applications, 1st ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2004. DOI: 10.1016/B978-0-7506-5606-6.X5000-2.

[90] S. M. Wu, "On the prediction of cutting forces in metal cutting processes," International Journal of Machine Tool Design and Research, vol. 8, no. 1, pp. 35-47, 1968. DOI: 10.1016/0020-7357(68)90020-2.

[91] M. Aramcharoen and P. T. Mativenga, "Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel," Precision Engineering, vol. 33, no. 4, pp. 402–407, 2009. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2008.08.003.

[92] J. J. Sun, X. L. Liu, and X. P. Li, "Modeling of the size effect on specific cutting energy in micro-end-milling," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 49, no. 10, pp. 828–836, 2009. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.04.008.

[93] B. Denkena, F. Hollmann, and J. Köhler, "Geometric, kinematic and force modelling in micromilling," CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 59, no. 1, pp. 113–116, 2010. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.025.

[94] M. Aramcharoen and P. T. Mativenga, "Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel," Precision Engineering, vol. 33, no. 4, pp. 402–407, 2009. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2008.08.003.

[95] X. Liu, R. E. DeVor, S. G. Kapoor, and K. F. Ehmann, "The mechanics of machining at the microscale: Assessment of the current state of the science," Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 126, no. 4, pp. 666–678, 2004. DOI: 10.1115/1.1813469.

[96] J. J. Sun, X. L. Liu, and X. P. Li, "Modeling of the size effect on specific cutting energy in micro-end-milling," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 49, no. 10, pp. 828–836, 2009. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.04.008.

[97] A. R. Tsukamoto, T. S. Ueda, "Micromachining of the AA2024 aluminum alloy: A review of methods and results," Journal of Aerospace Engineering, vol. 27, no. 4, pp. 100-115, 2020.

[98] F. F. Cavalcante e W. S. da Silva, "Comportamento mecânico da liga de alumínio 2024 submetida a diferentes tempos de envelhecimento," Holos, no. 8, pp. 86–100, 2017.

[99] K. Li, J. Xie, "Investigation on the micro-milling of aluminum alloy for aerospace applications," Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 139, no. 2, p. 021014, Apr. 2017. doi: 10.1115/1.4035557.

[100] M. R. S. Santos, F. M. M. Souza, "Study of cutting forces and surface integrity in micro-milling of aluminum alloys," Materials Science Forum, vol. 950, pp. 17-24, 2021. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.950.17.

[101] F. C. Carvalho, P. V. M. Pimenta, and G. M. Leal, "Wear Mechanisms in Micro-Milling of Aluminum Alloys," Wear, vol. 438, pp. 66-72, Feb. 2019.

[102] Z. Z. Liu, Y. S. Zhang, and S. T. Yue, "Tool Wear in Micro-Milling of Aluminum Alloys," Journal of Materials Processing Technology, vol. 265, pp. 254-263, May 2018.

[103] S. D. Murthy, K. K. Jain, and R. P. Patel, "Impact of Tool Wear on the Surface Integrity in Micro-Milling of Aluminum Alloys," Precision Engineering, vol. 51, pp. 75-83, Aug. 2018.

[104] A. R. Shinge, U. A. Dabade, and S. V. Desai, "Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness and Burr Formation in Micro-Milling of Aluminum Alloy AA2024," Journal of Manufacturing Processes, vol. 25, pp. 125-130, Oct. 2017.

[105] F. J. C. S. Lima, M. S. Fernandes, and D. C. L. Pereira, "Wear Mechanisms in PCD Tools during Micro-Milling of Aluminum Alloys," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 96, pp. 479-487, Aug. 2018.

[106] S. D. Murthy, S. T. Kapoor, and G. L. Sen, "Burr Formation in Micro-Milling of Aluminum Alloys," Precision Engineering, vol. 42, pp. 36-42, May 2017.

[107] Z. Liu, J. Wang, and L. Zhang, "Optimization of Cutting Parameters to Reduce Burr Formation in Micro-Milling of Aluminum Alloys," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 103, pp. 32-40, Jan. 2019.

[108] F. Brinksmeier, J. T. Cammett, W. König, P. Leskovar, J. Peters, e H. K. Tönshoff, "Residual Stresses—Measurement and Causes in Machining Processes," CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 31, no. 2, pp. 491-510, 1982, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60172-3.

[109] E. Brinksmeier, A. Walter, e R. Janssen, “Surface Integrity and Its Significance in Functional Performance of Machined Components,” Procedia CIRP, vol. 13, pp. 428-434, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.04.073.

[110] B. Griffiths, "Mechanisms of White Layer Generation with Reference to Machining and Deformation Processes," Journal of Tribology, vol. 109, no. 3, pp. 525-530, 1987, doi: 10.1115/1.3261495.

[111] E. M'Saoubi, J. C. Outeiro, H. Chandrasekaran, O. W. Dillon, e I. S. Jawahir, "A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products," International Journal of Sustainable Manufacturing, vol. 1, no. 1/2, pp. 203-236, 2008, doi: 10.1504/IJSM.2008.019234.

[112] K. S. Lee, D. A. Dornfeld, “An Experimental Study on Burr Formation in Micro-Milling Aluminum and Copper,” Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME, vol. 30, pp. 255–262, 2002.

[113] Z. Liu, J. Wang, L. Zhang e Q. An, "A review on burr formation mechanisms, prediction and control methods in micro-milling," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 125, no. 1–2, pp. 115–133, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11655-6.

[114] F. C. Carvalho, R. F. da Silva, e J. P. Davim, "Burr formation and control strategies in micro-milling operations: A comprehensive review," Journal of Manufacturing Processes, vol. 85, pp. 72–91, 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.10.024.

[115] G. Benardos and G. Vosniakos, “Predicting surface roughness in machining: a review,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, no. 8, pp. 833–844, 2003.

[116] I. Manna and B. Bhattacharyya, “Investigation for optimal parametric combination for achieving better surface finish during turning of Al/SiC-MMC,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 23, pp. 658–665, 2004.

[117] ISO 4287, *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters*, International Organization for Standardization, 1997.

[118] J. A. Ghani, I. A. Choudhury, and H. H. Masjuki, “Performance of P10 and P30 coated carbide tools when turning AISI 1045 steel,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 116, pp. 359–363, 2001.

[119] H. El-Hofy, *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes*, 2nd ed., CRC Press, 2013.

[120] T. Özel, X. Liu e A. Schubert, "Surface roughness in micro-milling: Formation mechanisms, evaluation methods and optimization strategies," Precision Engineering, vol. 83, pp. 245–262, 2024, doi: 10.1016/j.precisioneng.2023.06.008.

[121] J. Cao, Y. Zhao e W. Liu, "Influence of minimum uncut chip thickness in micro-milling: A review," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 186, p. 103901, 2023, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2023.103901.

[122] X. Lu, C. Cong e P. Hou, "Improved cutting force modelling in micro-milling aluminum alloy LF21 considering tool wear," Applied Sciences, vol. 12, no. 11, p. 5357, 2022, doi: 10.3390/app12115357.

[123] X. X. Zhang, X. R. Zhou e B. Liu, "Localized corrosion in AA2024-T351 aluminium alloy: Transition from intergranular corrosion to crystallographic pitting," Materials Characterization, vol. 130, pp. 230–236, 2017.

[124] Z. Zhang, L. Chen, C. Liu e X. Xu, "Microstructure and Its Effect on the Intergranular Corrosion Behavior of 2024 Aluminum Alloy with Varying Cu and Mg Content," Crystals, vol. 12, no. 3, p. 395, 2022.

[125] M. C. Gomes, "Estudo do processo de microfresamento em aços inoxidáveis fabricados por manufatura aditiva," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2020.

[126] T. C. P. Piccarelli, "Microfresamento: Estudo e aplicação do processo," Dissertação de Mestrado, Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, SP, 2015.

[127] J. R. Davis, Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 1999.

[128] Z. Liu, Z. Shi e Y. Wan, "Definition and determination of the minimum uncut chip thickness of microcutting," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 69, pp. 1219–1232, 2013.

[129] M. R. Souza, "Estudo do microfresamento de precisão em moldes de aço para aplicações ópticas," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2020. [130] S. K. Das, "The development of wrought alloys with improved corrosion resistance," Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 15, no. 6, pp. 652–656, Dec. 2006.

[130] S. K. Das, "The development of wrought alloys with improved corrosion resistance," Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 15, no. 6, pp. 652–656, Dec. 2006.

[131] O. H. Duparc, "Alfred Wilm and the beginnings of Duralumin," International Journal of Materials Research, vol. 96, no. 4, pp. 398–403, 2005.

[132] ASM International, ASM Handbook: Properties and Selection – Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, vol. 2, 10th ed., Materials Park, OH: ASM International, 1992.

[133] F. R. N. Nogueira, "Efeitos dos tratamentos térmicos em ligas de alumínio," Universidade de Rio Verde, 2013.

[134] Z. Xie et al., "Mechanical and Corrosion Properties of AA2024 Aluminum Alloy with Multimodal Gradient Structures," Metals, vol. 15, no. 2, p. 177, Jan. 2025.

[135] W. Aperador, J. Aperador, and G. Orozco-Hernández, "Comparative Analysis of the Corrosion and Mechanical Behavior of an Al-SiC Composite and AA2024 Alloy Fabricated by Powder Metallurgy for Aeronautical Applications," Metals, vol. 14, no. 12, p. 1462, Dec. 2024.

[136] C. A. Rodríguez, M. Batista, and D. W. Hutmacher, "Built-up edge formation and its effects in dry machining of aluminum alloy AA2024-T3," Procedia CIRP, vol. 77, pp. 379–382, 2018.

[137] G. H. Asato, Caracterização Microestrutural e Mecânica da Liga AA2024 Conformada por Spray e Processada Termomecanicamente, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

[138] ASTM B221-14, Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles, and Tubes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

[139] M. S. Shunmugam and S. Kanthababu, “Experimental Investigation and Surface Roughness Analysis on Hard Turning of AISI 4340 Steel,” *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 168–177, 2014.

[140] S. C. Wang and M. J. Starink, “Precipitates and intermetallic phases in precipitation hardening Al–Cu–Mg–(Li) based alloys,” *International Materials Reviews*, vol. 50, no. 4, pp. 193–215, 2005.

[141] Mitsubishi Materials Corporation, “Solid End Mills | MS2JS | MS2JSD0080,” *Mitsubishi Materials Official Website*, [Online]. Disponível em: https://www.mitsubishicarbide.net/mht/enuk/solid_end_mills/10000219/20060630. Acesso em: 12-fevereiro-2025.

[142] F. H. Manarelli, "Estudo do Desgaste das Ferramentas no Microfresamento de Aço Inoxidável AISI 316L Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, Brazil, 2017.

[143] J. Paulo Davim, "The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness, and tool-chip contact length during face milling," Materials & Design, vol. 28, no. 10, pp. 1379–1385, 2007.

[144] J. Sun and Y. B. Guo, "A comprehensive study on the chip formation mechanism in micro-cutting of aluminum alloy 2024-T3," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 49, no. 9, pp. 701–712, Jul. 2009.

[145] S. Patel, S. K. Patel, and P. M. George, "Prediction and optimization of machining forces using Oxley's model in turning of AISI 304 austenitic stainless steel," Materials Today: Proceedings, vol. 5, no. 9, pp. 18662–18671, 2018.

[146] H. Ijaz, M. Danish, M. Asad, and S. Rubaiee, "A three-dimensional finite element-approach to investigate the optimum cutting parameters in machining AA2024," Mechanics & Industry, vol. 21, p. 615, Dec. 2020.

[147] R. P. Zeilmann, A. Tomé, D. C. Calza, and F. M. Bordin, "Desgaste em ferramentas de aço-rápido na usinagem de material endurecido," in Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, São Paulo, Brazil, 2007, pp. 1–6.

[148] J. Sun and Y. B. Guo, "A comprehensive study on the chip formation mechanism in micro-cutting of aluminum alloy 2024-T3," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 49, no. 9, pp. 701–712, Jul. 2009.

[149] J. P. Davim, "The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness, and tool-chip contact length during face milling," Materials & Design, vol. 28, no. 10, pp. 1379–1385, 2007.

[150] O. Maurer, H. Liborius, C. Rauch, D. Bähre, and A. Schubert, "Influence of Cutting Speed in Turning and Force in Subsequent Diamond Smoothing on Magnetic Properties of Steel 100Cr6," Metals, vol. 11, no. 7, p. 1131, Jul. 2021.

[151] M. A. Elbestawi, W. Zhou, and M. S. Duflou, "Effect of cutting conditions on tool wear and wear mechanism in finish hard turning," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 44, no. 5, pp. 539–548, May 2004.

[152] K. Lee, "Micro-burr formation and minimization through process control," Precision Engineering, vol. 29, no. 2, pp. 246–252, 2005.

[153] W. Zhang, Y. Kang, and Y. Liu, "Research on Parameter Optimization of Micro-Milling Al7075 Based on Edge-Size-Effect," Micromachines, vol. 11, no. 2, p. 197, Feb. 2020.

[154] A. G. dos Santos, "Investigação experimental da microusinagem de alumínio utilizando fresas de topo esférico," M.Sc. dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brazil, 2019.

[155] T. H. Ashmawi and E. C. Bordinassi, "Estudo da rugosidade e formação de rebarbas no fresamento de stacks de fibra de carbono e titânio," M.Sc. dissertation, Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, Brazil, 2017.

[156] H. S. Imran Jaffery, M. A. Khan, and M. S. Duflou, "Analysis of Burr Formation in Low Speed Micro-milling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 28, no. 2, p. 025001, Feb. 2018.

[157] A. G. dos Santos, "Investigação experimental da microusinagem de alumínio utilizando fresas de topo esférico," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2019.

[158] T. H. Ashmawi and E. C. Bordinassi, "Estudo da rugosidade e formação de rebarbas no fresamento de stacks de fibra de carbono e titânio," Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, Brasil, 2017.

[159] J. S. Câmara, "Uma contribuição ao estudo da espessura mínima de corte na microusinagem," Revista Brasileira de Engenharia de Fabricação, vol. 29, no. 1, pp. 45–52, 2014.

[160] L. S. Lima, "Taxa de resfriamento na solidificação de ligas de alumínio fundidas sob pressão," Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2019.

[161] Y. Zhang, H. Li, L. Wang, and Y. Liu, "Effect of Milling Processing Parameters on the Surface Roughness of Micro-Milled T2 Pure Copper," Micromachines, vol. 14, no. 1, p. 224, Jan. 2023.

[162] M. Azuddin, M. R. K. M. R. K., and R. M. K. R. M., "Study on surface roughness and burr formation during slot milling of aluminum 6061," Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 2, no. 3, pp. 12–21, 2008.

[163] L. F. O. Silva, "Influência do efeito escala sobre a operação de microusinagem," Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2014.