

ARTHUR VIEIRA DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE CORTE NO
MICROFRESAMENTO DA LIGA INCONEL 718**



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

2023

ARTHUR VIEIRA DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE CORTE NO
MICROFRESAMENTO DA LIGA INCONEL 718**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

**UBERLÂNDIA
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S729a Souza, Arthur Vieira de, 1991-
2023 Avaliação de parâmetros de corte no microfresamento da liga
Inconel 718 [recurso eletrônico] / Arthur Vieira de Souza. - 2023.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.8037>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia Mecânica. I. Silva, Márcio Bacci da, 1964-, (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.01

André Carlos Francisco
Bibliotecário - CRB-6/3408


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br


ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 630, PPGEM				
Data:	21/03/2023	Hora de início:	13:00	Hora de encerramento:	15:30
Matrícula do Discente:	12022EMC003				
Nome do Discente:	Arthur Vieira de Souza				
Título do Trabalho:	Avaliação de Parâmetros de Corte no Microfresamento da Liga Inconel 718				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Projeto Fapemig APQ-00268-21: Investigação do Microfresamento do Aço Ferramenta H13 Obtido pelo Processo de Manufatura Aditiva DED				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU; Alessandro Roger Rodrigues - USP/São Carlos; e Márcio Bacci da Silva - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Márcio Bacci da Silva, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/03/2023, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alessandro Roger Rodrigues, Usuário Externo**, em 21/03/2023, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/03/2023, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4352403** e o código CRC **70854246**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por todas minhas realizações. Aos meus pais , Tânia e Carlos, e à minha família por todo apoio durante essa trajetória de minha vida.

À minha namorada e companheira Mayara Sales, por estar sempre ao meu lado, me apoiando e me incentivando, até nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva, pela paciência e por todos os ensinamentos.

Aos meus amigos de Universidade e para a vida toda Edwin Cárdenas, Tamires Botelho, Walter Neto, Samuel Freitas, Lucas Barbosa e Julia Abrão.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), por terem me proporcionado esta oportunidade de desenvolvimento.

Às agências de fomento à pesquisa e pós-graduação CAPES, CNPq e FAPEMIG, por todo apoio financeiro.

A todos os demais professores, técnicos e funcionários da FEMEC, que também deram suas valiosas contribuições.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que contribuíram com a realização desta pesquisa.

Resumo

Dentre os processos de fabricação para a produção de microgeometrias, a microusinagem é o que apresenta maior flexibilidade, permitindo a fabricação de peças com dimensões extremamente pequenas, na casa dos micrometros, com elevada precisão e com bom acabamento superficial. A microusinagem é capaz de processar diversas variedades de metais e suas ligas, compósitos, polímeros e materiais cerâmicos. Apesar de muitas semelhanças, a microusinagem não pode ser tratada apenas como uma simples redução do processo macro, uma vez que o raio de aresta e o tamanho de grão do material usinado têm grande influência no processo. O presente trabalho tem como principal objetivo determinar as melhores condições de corte, em termos de desgaste de ferramenta e integridade superficial da peça, para o microfresamento da liga de níquel Inconel 718. Para isto, realizou-se a usinagem de microcanais utilizando microfresas de topo reto de 400 μm de diâmetro, com duas arestas de corte, revestidas de TiAlN. Foram variados os parâmetros velocidade de corte (50,3 e 12,6 m/min), avanço por dente (5 e 10 $\mu\text{m}/\text{z}$) e a profundidade de corte (10 e 40 μm). A usinabilidade foi investigada analisando o desgaste das microferramentas, o comportamento dos parâmetros de rugosidade média quadrática (R_q) da superfície dos microcanais e a formação de rebarbas. O desgaste foi avaliado através de comparação de imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura das ferramentas usadas e novas. Constatou-se que o aumento da velocidade de corte resultou em um menor desgaste quando utilizado a maior profundidade de corte, contudo, para a menor profundidade, observou-se comportamento inverso no desgaste. Quanto à qualidade da superfície usinada, os resultados mostraram que as menores rugosidades foram encontradas para as menores velocidade e profundidade de corte. Observou-se também que não foi significativa a diferença de formação de rebarbas entre os lados concordante e discordante e que houve maior formação de rebarbas quando foi utilizada uma maior profundidade de corte, não havendo mudança significativa com o aumento da velocidade de corte.

Palavras-chave: Microusinagem, Microfresamento, Inconel 718, Desgaste de Ferramentas.

Abstract

Among the manufacturing processes for the production of microgeometries, micromachining offers the greatest flexibility, allowing the manufacture of parts with extremely small dimensions, in the micrometer range, with high precision and with a good surface finish. Micromachining is capable of processing several varieties of metals and their alloys, composites, polymers and ceramic materials. Despite many similarities, micromachining cannot be treated just as a simple reduction of the macro process, since the edge tool radius and the grain size of the machined material have a greater influence on the process. The main objective of this work is to determine the best cutting conditions, in terms of tool wear and part surface integrity, for micromilling of Inconel 718 nickel alloy. For this, microchannels were machined using end micromills of 400 μm in diameter, with two cutting edges, coated with TiAlN. The parameters of cutting speed (50.3 and 12.6 m/min), feed per tooth (5 and 10 $\mu\text{m}/\text{z}$) and cutting depth (10 and 40 μm) were varied. The machinability was investigated by analyzing the wear of the microtools, the behavior of the root mean square (Rq) roughness parameters of the surface of the microchannels and the burr formation. Wear was evaluated by comparing images obtained in the scanning electron microscope of used and new tools. It was found that the increase in cutting speed resulted in less wear when using a greater depth of cut, however, for a smaller depth, an inverse behavior was observed in wear. As for the quality of the machined surface, the results showed that the lowest roughness was found for the lowest cutting speed and depth. It was also observed that there was no significant difference in burr formation between the up-milling and down-milling and discordant sides and that there was greater burr formation when a greater cutting depth was used, with no significant change with the increase in cutting speed.

Keywords: Micromachining, Micromilling, Inconel 718, Tool Wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Aplicações de produtos microfresados (a) telefones celulares e seus microslots (MASATO et al., 2017); (b) sensores de fluxo médico e seus microcanais (LIN et al., 2012); (c) chips e suas micro aletas de pino (YANG et al., 2016)	2
Figura 2.1 - Formação do cavaco em relação a espessura mínima de corte: (a) $h < h_m$, (b) $h = h_m$ (c) $h > h_m$ (adaptado de CHEN et al., 2021)	6
Figura 2.2 - Influência do raio de aresta de corte: (a) em escala macro, (b) em escala micro (adaptado de BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005)	7
Figura 2.3 - Relação entre o tamanho do grão e espessura de corte nos processos de (a) usinagem convencional e (b) microusinagem (adaptado de BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005)	8
Figura 2.4 - Classificação das rebarbas quanto à posição (adaptado HASHIMURA et al., 1999)	11
Figura 2.5 - Classificação das rebarbas quanto ao tipo: (a) primária, (b) agulha, (c) pena e (d) menor (CHERN et al. 2006)	12
Figura 2.6 - Representação do processo de formação de rebarbas primárias (adaptado de CHERN et al. 2006)	13
Figura 2.7 - Imagens da formação de rebarbas em microcanais fabricados em diferentes rotações: (a) 9000 rpm, (b) 12000 rpm, (c) 15000 rpm, (d) 18000 rpm e (e) 21000 rpm (CHEN et al., 2020)	14
Figura 2.8 - Imagens da formação de rebarbas em microcanais fabricados em diferentes velocidades de avanço: (a) 30 mm/min, (b) 60 mm/min, (c) 90 mm/min, (d) 120 mm/min e (e) 150 mm/min (CHEN et al., 2020)	15
Figura 2.9 - Imagens da formação de rebarbas em microcanais fabricados em diferentes profundidades de corte: (a) 40 μm , (b) 60 μm , (c) 80 μm , (d) 100 μm e (e) 120 μm (CHEN et al., 2020)	16
Figura 2.10 - Largura das rebarbas em relação aos parâmetros de (a) rotação, (b) avanço, (c) profundidade de corte (adaptado de CHEN et al., 2020)	17
Figura 2.11 – Tipos de desgaste presentes no microfresamento (adaptado ALHADEFF et al. 2019)	19

Figura 2.12 - Metodologia de medição de desgaste por meio da diferença dos diâmetros inicial e final das microfresas (DE OLIVEIRA, 2019)	20
Figura 2.13 – Metodologia de medição do desgaste pela ponta da ferramenta (adaptado ZIBEROV, et al., 2020)	21
Figura 3.1 - Microestrutura da liga Inconel 718 (De Oliveira, 2019)	27
Figura 3.2 - Máquina ferramenta utilizada nos ensaios (adaptado de MINITECH MACHINERY, 2022)	29
Figura 3.3 - Equipamentos de aquisição de imagens e composição química: (a) MEV e (b) EDS (HITACHI HIGH-TECHNOLOGIES CORPORATION, 2013)	30
Figura 3.4 - Perfilômetro Form Talysurf Intra (TAYLOR HOBSON, 2012)	30
Figura 3.5 - Microferramenta Mitsubishi MS2MS (MITSUBISHI, 2022)	31
Figura 3.6 - Imagens de microfresas novas utilizadas no trabalho: (a) superfície secundária de folga (b) superfície de saída	31
Figura 3.7 - Montagem do experimento e posicionamento do bico de aplicação do fluido	32
Figura 3.8 - Aproximação para zeramento da ferramenta utilizando o microscópio USB.....	33
Figura 3.9 - Representação esquemática do movimento da ferramenta na confecção dos canais	35
Figura 3.10 - Metodologia de medição desgaste por meio da diferença do diâmetro antes e depois dos ensaios	37
Figura 3.11 - Posicionamento das medições da profundidade dos canais	38
Figura 3.12 - Exemplo da medição da diferença entre a superfície da peça de trabalho e o fundo do canal pelo software MountainsLab Premium 9®	39
Figura 3.13 - Posicionamento e sentido das medições de rugosidade	39
Figura 4.1 - Principais tipos de desgastes encontrados nas microferramentas, onde (a) e (b) $V_c = 50,3$ m/min, $f_z = 10$ μ m/z e $a_p = 10$ μ m; (c) $V_c = 12,6$ m/min, $f_z = 5$ μ m/z e $a_p = 40$ μ m; e (d) $V_c = 50,3$ m/min, $f_z = 5$ μ m/z e $a_p = 10$ μ m	42
Figura 4.2 - Imagens de topo das ferramentas antes e após a usinagem de 108 mm.....	44

Figura 4.3 - Redução percentual do diâmetro das ferramentas utilizadas nos ensaios.....	45
Figura 4.4 - Interação entre os parâmetros de velocidade de corte (V_c) e a profundidade de corte (a_p) em relação ao desgaste das microferramentas.....	47
Figura 4.5 - Interação entre os parâmetros de velocidade de corte (V_c) e o avanço por dente (f_z) em relação ao desgaste das microferramentas.....	48
Figura 4.6 - Desgaste aresta secundária condição F3 ($V_c = 12,6$ m/min, $f_z = 5$ μ m e $a_p = 10$ μ m)	49
Figura 4.7 - Desgaste aresta secundária condição F4 ($V_c = 12,6$ m/min, $f_z = 10$ μ m e $a_p = 10$ μ m)	50
Figura 4.8 - Desgaste aresta secundária condição F5 ($V_c = 50,3$ m/min, $f_z = 5$ μ m e $a_p = 10$ μ m)	51
Figura 4.9 - Desgaste aresta secundária condição F6 ($V_c = 50,3$ m/min, $f_z = 10$ μ m e $a_p = 10$ μ m)	52
Figura 4.10 - Rugosidade R_q por comprimento usinado da condição F1 ($V_c = 12,6$ m/min, $f_z = 5$ μ m/z e $a_p = 40$ μ m)	54
Figura 4.11 - Rugosidade R_q por comprimento usinado da condição F2 ($V_c = 50,3$ m/min, $f_z = 5$ μ m e $a_p = 40$ μ m)	55
Figura 4.12 - Rugosidade R_q por comprimento usinado da condição F3 ($V_c = 12,6$ m/min, $f_z = 5$ μ m e $a_p = 10$ μ m)	56
Figura 4.13 - Rugosidade R_q por comprimento usinado da condição F4 ($V_c = 12,6$ m/min, $f_z = 10$ μ m e $a_p = 10$ μ m)	57
Figura 4.14 - Rugosidade R_q por comprimento usinado da condição F5 ($V_c = 50,3$ m/min, $f_z = 5$ μ m e $a_p = 10$ μ m)	58
Figura 4.15 - Rugosidade R_q por comprimento usinado da condição F6 ($V_c = 50,3$ m/min, $f_z = 10$ μ m e $a_p = 10$ μ m)	59
Figura 4.16 - Interação entre os parâmetros de velocidade de corte (V_c) e o avanço por dente (f_z) na rugosidade dos canais usinados.....	60

Figura 4.17 - Interação entre os parâmetros de velocidade de corte (V_c) e a profundidade de corte (a_p) na rugosidade dos canais usinados.....	61
Figura 4.18 - Imagens obtidas por MEV da superfície dos canais 1, 5 e 9 em cada condição de usinagem.....	66
Figura 4.19 - Marca paralela à borda do canal presente em todas condições de usinagem.....	68
Figura 4.20 – Destacamento de material do fundo do canal durante a usinagem.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição Química da Liga Inconel 718 (Adaptado ASM, 1990)	24
Tabela 2.2 - Propriedades Físicas da Liga Inconel 718 (Adaptado ASM, 1990)	25
Tabela 2.3 - Propriedades Mecânicas da Liga Inconel 718 (Adaptado ASM, 1990)	25
Tabela 3.1 - Composição química por EDS da liga Inconel 718.....	27
Tabela 3.2 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de microusinagem.....	34
Tabela 4.1 - Resultados da ANOVA para o desgaste das ferramentas.....	46
Tabela 4.2 - Resultados da ANOVA para a rugosidade da superfície usinada.....	60

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

ANOVA.....	Análise de Variância (<i>Analysis of Variance</i>)
a_p	Profundidade de Corte
APC.....	Aresta Postiça de Corte
ASM.....	Sociedade Americana para Metais (<i>American Society for Metals</i>)
CF.....	Falha Catastrófica
CH.....	Desgaste por Lascamento
CNC.....	Comando Numérico Computadorizado
DLC.....	Carbono como Diamante (<i>Diamond-like carbono</i>)
EDS.....	Espectroscopia de Energia Dispersiva
F_c	Força de Corte
FIB.....	Feixe de Íons Focado (<i>Focused Ion Beam</i>)
f_z	Avanço por Dente
h	Espessura de Corte
h_m	Espessura Mínima de Corte
ISO.....	<i>International Organization for Standardization</i>
KT.....	Desgaste medido na aresta secundária de corte
LEPU.....	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
MEV.....	Microscópio Eletrônico de Varredura
OE.....	Desgaste medido na aresta principal de corte
PLA.....	Usinagem a Laser (<i>Pulse Laser Ablation</i>)
R_a	Rugosidade Média Aritmética
R_q	Rugosidade Média Quadrática
Rpm.....	Rotação por minuto
VB.....	Desgaste de Flanco
v_c	Velocidade de Corte
TiNAl.....	Nitreto de titânio e alumínio
WEDM.....	Eletroerosão a Fio (<i>Electrical Discharge Machining</i>)

γÂngulo de saída

γ_eÂngulo de saída efetivo

SUMÁRIO

CAPITULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	3
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Microusinagem.....	4
2.2. Efeito Escala.....	5
2.3. Rugosidade Superficial	8
2.3.1. Influência dos Parâmetros de Corte na Rugosidade	9
2.4. Formação de Rebarbas	10
2.4.1. Influência dos Parâmetros de Corte na Formação de Rebarbas	13
2.5. Desgaste de Ferramenta	17
2.6. Superligas à base de Níquel.....	21
2.6.1. Inconel 718	24
CAPITULO III - METODOLOGIA.....	26
3.1. Material de Trabalho e Fixação da Amostra	26
3.2. Equipamentos Utilizados	28
3.3. Microfresas.....	30
3.4. Procedimento Experimental.....	32
3.4.1. Preparação do corpo de prova e referenciamento da microfresa	32
3.4.2. Ensaio de Usinagem.....	34
3.5. Variáveis de Saída.....	36
3.5.1. Desgaste das Ferramentas.....	36
3.5.2. Rugosidade.....	40
3.5.3. Superfície Usinada e Formação de Rebarbas	41

CAPÍTULO IV - RESULTADO E DISCUSSÕES	42
4.1. Análise dos Desgastes das Microferramentas	42
4.2. Análise da Rugosidade	54
4.3. Análise no MEV das Rebarbas e da Superfície Usinada	63
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia e a busca por economia elevou a necessidade por componentes de menores custos e dimensões. Minimizar o tamanho dos componentes eletrônicos e mecânicos é o requisito crucial para incorporar vários recursos operacionais em dispositivos ou plataformas de pequenas dimensões. Baixo consumo de energia e material leve, compacto, de alta sensibilidade e relação custo-desempenho relativamente baixa estão entre os vários méritos dos produtos miniaturizados que são cada vez mais exigidos nos campos de indústrias médicas, de transporte e de comunicação (SERJE; PACHECO; DIEZ, 2020).

Com isso várias soluções para microfabricação foram desenvolvidas, incluindo técnicas de usinagem por eletroerosão a fio (WEDM), usinagem a laser (PLA) e feixe de íons focado (FIB). No entanto, esses processos são difíceis de ajustar adequadamente ou controlar com precisão e podem ser aplicáveis apenas a classes específicas de materiais (CHEN et al., 2020), além de alguns deles terem custos relativamente alto.

Dentre os mais diversos processos de microfabricação, a microusinagem mecânica é um dos mais importantes e utilizados para a obtenção de produtos em pequena escala dimensional, que possuem dimensões situadas na casa de dezenas ou centenas de micrometros.

Entre os processos de microusinagem, o microfresamento é uma das soluções de microfabricação mais importantes e confiáveis para a maioria dos produtos miniaturizados. Isso se deve às ferramentas ou microfresas que possuem arestas de corte bem definidas que podem atingir alta integridade da superfície usinada, com rugosidade na casa dos nanômetros, e uma elevada precisão dimensional e geométrica podendo usinar superfícies complexas, com base no controle de vários eixos e possuem poucas limitações em relação às propriedades do material da peça (ARAMCHAROEN et al., 2009; AURICH et al., 2017).

O microfresamento tem sido utilizado principalmente para fabricação de produtos de alto valor nas áreas de sistemas ópticos, médicos, nucleares, aeroespaciais, biomédicos e microeletromecânicos, onde as funções e desempenhos do produto dependem fortemente de micro recursos 2D e 3D. A Figura 1.1 mostra exemplos de peças obtidas por microfresamento.

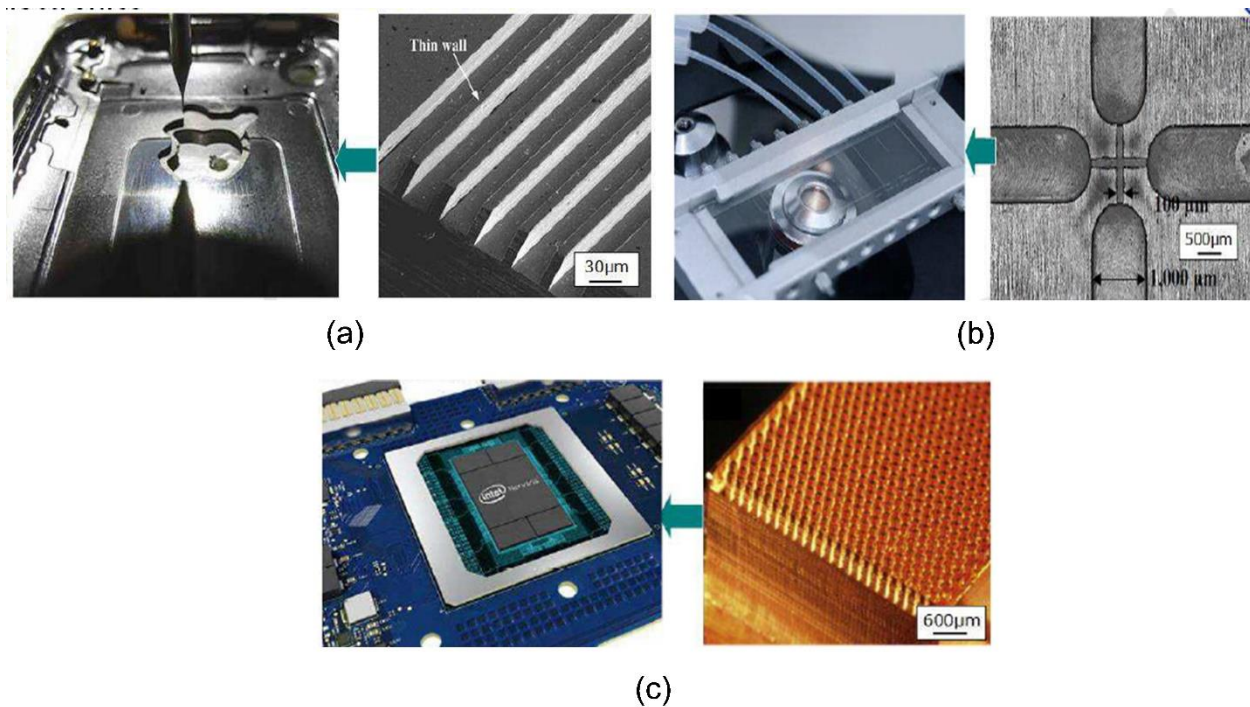


Figura 1.1 - Aplicações de produtos microfresados (a) telefones celulares e seus microslots (MASATO et al., 2017); (b) sensores de fluxo médico e seus microcanais (LIN et al., 2012); (c) chips e suas micro aletas de pino (YANG et al., 2016).

Aliado às novas tecnologias de fabricação está a utilização de materiais com propriedades específicas desejadas. Dentre esses materiais se destacam as superligas de níquel, no qual aliam alta resistência mecânica em elevadas temperaturas com uma ótima resistência à corrosão.

As propriedades das ligas de níquel no entanto dificultam o seu processo de usinagem. Elevada dureza, resistência mecânica e baixa condutividade térmica resultam em elevadas taxas de desgaste das ferramentas e acabamento superficial de menor qualidade com presença de grandes rebarbas.

A liga Inconel 718 é uma das ligas de níquel mais utilizadas nos processos de fabricação. Por se tratar de um material de difícil usinabilidade, torna-se necessário um maior estudo dos processos de microusinagem, principalmente em relação à parâmetros de usinagem que possibilitem maior vida das microferramentas aliada com uma melhor qualidade da superfície usinada.

Desta forma, este trabalho tem por objetivo colaborar com o campo da microusinagem da liga Inconel 718, avaliando a influência dos parâmetros de corte no processo de microfresamento, por meio do desgaste das microferramentas e na qualidade da superfície usinada.

1.1. Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é investigar a usinabilidade da liga Inconel 718 no processo de microfresamento e influência dos parâmetros de corte. A usinabilidade será avaliada com base na integridade da superfície usinada e desgaste das microferramentas.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estabelecer a correlação entre os parâmetros de usinagem e as variáveis de saída: desgaste da microfresa, rugosidade superficial e formação de rebarbas.
- Encontrar parâmetros que apresentaram melhor desempenho aliando menores desgaste das microfresas e melhores qualidades superficiais.
- Contribuir com a metodologia de avaliação de usinabilidade da liga de Inconel 718 no processo de microfresamento de topo reto.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Microusinagem

Por conferir elevada precisão e qualidade superficial às peças fabricadas, a microusinagem torna-se um dos processos mais amplamente utilizados para obtenção de produtos em escala reduzida. Além disso, por meio deste processo é possível obter geometrias complexas aplicadas em vários materiais como metais, compósitos, cerâmicos e polímeros (RANGEL; ROJAS; ARTEAGA, 2011).

É um processo que pode ser definido de forma geral, da mesma forma que os processos de usinagem convencional. O que difere o processo de microusinagem são normalmente as dimensões da ferramenta, no caso particular de fresamento. Ainda não existe um consenso para definir o microfresamento. A definição mais aceita na literatura considera o microfresamento como o processo de usinagem mecânica com ferramenta com diâmetros entre 1 e 1 000 μm (CAMARA, et al., 2012). Com dimensões reduzidas, a espessura de corte (h) e o tamanho dos grãos do material usinado estão na mesma ordem de grandez do raio de aresta da ferramenta. Para o microtorneamento, torna-se necessário definir o processo de outra forma. Segundo Masuzawa e Tönshoff (1997) o microtorneamento pode ser definido como um processo de usinagem mecânica com espessura de corte entre 0,1 e 200 μm . O conceito também é utilizado com relação à dimensão da peça a ser usinada. Para Chae et al. (2005) a microusinagem é um processo para fabricação de componentes entre algumas dezenas de micrometros à poucos milímetros de dimensão.

Além de microfresamento e microtorneamento, os processos típicos de microusinagem incluem também microfuração e microrretificação. As definições de grandezas físicas são similares à usinagem convencional. No entanto, em função das dimensões envolvidas, os processos de microusinagem podem atingir rugosidades de até 100 nm. A micro retificação e o microfresamento podem proporcionar níveis de acabamento superficial de até 10 nm (CHENG; HUO, 2013).

O microfresamento se destaca por ser um dos processos mais flexíveis e versáteis, sendo capaz de gerar uma imensa variedade de microcomponentes de alta complexidade em três dimensões. Em termos de tipos de operações de microfresamento, o de topo, ou seja, usando fresas de topo planas ou de ponta esférica, dominam as principais aplicações (CHENG; HUO, 2013).

Apesar de definições semelhantes, não é possível afirmar que a microusinagem consiste em uma simples redução de escala dos processos convencionais. O conhecimento dos processos em escala macro é utilizado apenas como base para os processos de usinagem em escala micro ou nano, os quais possuem fenômenos específicos, devido ao fenômeno conhecido como efeito escala, que influenciam por exemplo, o mecanismo de formação do cavaco (CHENG; HUO, 2013).

2.2. Efeito Escala

O processo de usinagem em escala micro possui algumas características específicas em comparação ao processo em escala convencional. Isto ocorre devido ao denominado efeito escala, o qual é caracterizado pelo aumento significativo da energia específica de corte (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006). A energia específica de corte é definida como a energia por unidade de volume de material removido na unidade de tempo, ou seja, energia por unidade de taxa de remoção de material ($J/mm^3/t$). Uma forma de avaliar o efeito escala é através da pressão específica de corte, que é a força de corte (F_c) dividido pela área de seção de corte (N/mm^2).

Segundo Dornfeld, Min e Takeuchi (2006), existem dois focos principais no qual o efeito de escala pode ser analisado: quando a espessura do cavaco não deformado está na mesma ordem de grandeza do raio de aresta da ferramenta e quando os defeitos cristalinos do material têm influência nos mecanismos de corte.

Em processos de microusinagem, as taxas de remoção do material são menores em relação à usinagem convencional, portanto, diferentemente do esperado na usinagem convencional em macroescala, na microusinagem a espessura de corte pode ser comparada à dimensão do raio da aresta de corte (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009; DORNFELD; MIN; TAKEUCHI, 2006). Dessa maneira, a relação

entre a espessura de corte e o raio da aresta de corte exerce influência direta na formação de cavaco na microusinagem, gerando o efeito de escala.

A Figura 2.1 ilustra a influência da espessura de corte no mecanismo de formação de cavaco. Segundo Chae et al. (2006), uma espessura mínima de corte deve existir e pode ser definida como a espessura de corte (avanço no caso de corte ortogonal) necessária para que ocorra formação de cavaco. Quando a espessura de corte (h) é menor que a espessura mínima de corte (h_m), o material a ser usinado sofre apenas deformação elástica, não havendo a formação de cavaco. Na microusinagem, a espessura de corte geralmente varia entre $0,1 \mu\text{m}$ e $50 \mu\text{m}$, já para a usinagem em escala macro, estes valores normalmente estão entre $0,1 \text{ mm}$ e 1 mm , por esse motivo, a redução da escala macro para a micro determina que o trabalho redundante, que pode ser desprezível na macrousinagem não pode ser ignorado na microusinagem (CHEN et al., 2021). Este trabalho redundante se deve as deformações elásticas e ao atrito da ferramenta com a peça, que na microusinagem não é desprezível.

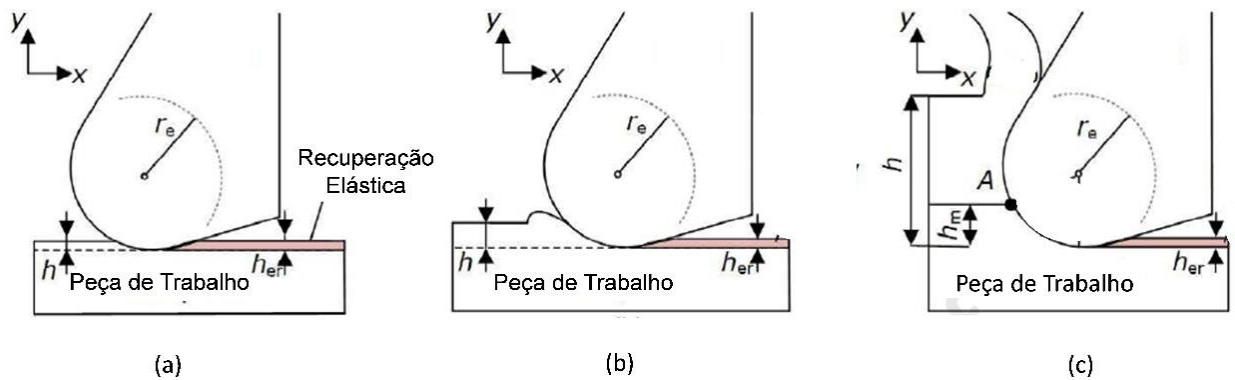


Figura 2.1 - Formação do cavaco em relação a espessura mínima de corte: (a) $h < h_m$, (b) $h = h_m$ (c) $h > h_m$ (adaptado de CHEN et al., 2021).

Além disso, na microusinagem o raio de aresta de corte da ferramenta possui maior influência no do que os encontrados em ferramentas utilizadas nos processos convencionais. Nos processos convencionais a ferramenta é considerada perfeitamente afiada, enquanto que na microusinagem as ferramentas possuem um

raio de arredondamento da aresta de corte relativamente alto. Este raio se deve às limitações físicas do processo de fabricação da ferramenta. Geralmente o raio de aresta para microferramentas está entre 1 e 4 μm (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005). A Figura 2.2 ilustra uma comparação para uma representação de um corte ortogonal em micro e macroescala.

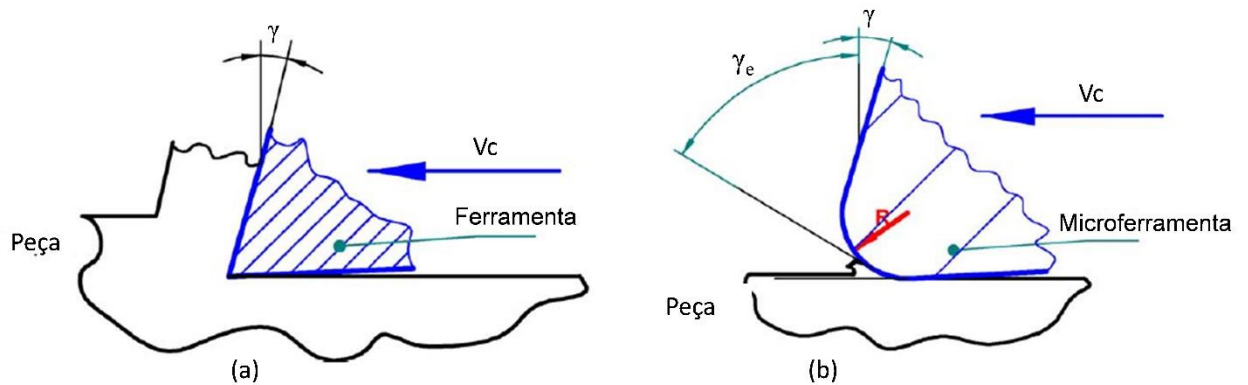


Figura 2.2 - Influência do raio de aresta de corte: (a) em escala macro, (b) em escala micro (adaptado de BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005).

Chae et al. (2006) destacam que, com o ângulo de saída efetivo γ_e muito negativo, a força de cisalhamento na ferramenta sofre um aumento considerável, maior recuperação elástica da peça de trabalho e a ocorrência do efeito *ploughing* durante o processo de microusinagem, além da obtenção de uma superfície rugosa.

Outra influência nos processos de microusinagem que não é considerado na usinagem convencional é a influência das dimensões que definem a microestrutura do material de trabalho, exemplificado na Figura 2.3. Devido a espessura de corte possuir valores comparáveis ao tamanho de grão do material, o cavaco se forma dentro de poucos ou mesmo um único grão por vez, diferentemente dos processos em escala macro onde o corte abrange diversos grãos (BISSACCO, HANSEN, DE CHIFFRE, 2005).

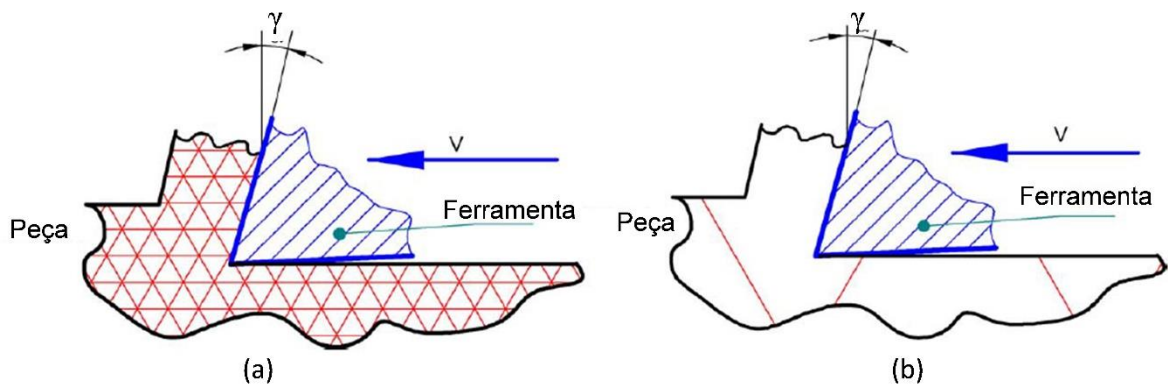


Figura 2.3 - Relação entre o tamanho do grão e espessura de corte nos processos de (a) usinagem convencional e (b) microusinagem (adaptado de BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005).

Na microusinagem o corte tende a ser realizado na maior parte em grãos unitários, que podem possuir diferentes propriedades e orientações cristalográficas, influenciando significativamente na força e na energia específica de corte, nas vibrações e no acabamento superficial da peça usinada. O aumento na energia específica de corte requerida na usinagem com o decréscimo da espessura do cavaco não deformado ocorre também devido ao fato de todos os metais terem defeitos tais como contornos de grão, lacunas e átomos de soluto, e quando a dimensão do material removido diminui, diminui-se a probabilidade de encontrar um defeito que favoreça a fratura e cisalhamento do material (JACKSON, 2008).

2.3. Rugosidade Superficial

A rugosidade de uma superfície usinada depende vários fatores, como os parâmetros de corte, principalmente o avanço de corte e velocidade de corte, a rigidez da máquina ferramenta e sistema de fixação da peça, as propriedades mecânicas do material da peça e a geometria da ferramenta de corte (TANSEL et al., 1998).

A rugosidade superficial pode ser definida como pequenas irregularidades ou erros microgeométricos resultantes da ação inerente do processo de corte, como marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, vibração entre

outros (MACHADO et al., 2011). A rugosidade superficial pode ser expressa pela determinação de parâmetros obtidos a partir do perfil de rugosidade da superfície. Estes parâmetros podem ser classificados em parâmetros de amplitude, que são determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou os dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície, parâmetros de espaço, que são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície e parâmetros híbridos, que são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaço.

A rugosidade superficial, vem sendo utilizada para avaliar a qualidade das superfícies usinadas, sendo objeto de estudo por muitos anos em diversos trabalhos. O parâmetro de rugosidade mais utilizado é o parâmetro “Ra”, classificado como um parâmetro de amplitude. Matematicamente o parâmetro Ra é definido como sendo o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil de rugosidade em relação a linha média, dentro de um comprimento de medição L (ISO 4287/1). Este valor é obtido a partir da medição dos desvios dos picos e vales em relação a uma linha de centro. Esta linha de centro é tal que o somatório das áreas abaixo é igual ao somatório das áreas acima do traço do perfil Ra.

Outro parâmetro que se baseia na altura dos picos do perfil em um determinado comprimento de amostragem é o parâmetro de rugosidade Rq, no qual é definido como a raiz quadrada da média dos quadrados das amplitudes do perfil em relação à linha média, oferecendo uma medida do desvio padrão dos dados analisados. Esse parâmetro exerce uma função que oferece peso extra para valores de picos e vales mais elevados, elevando ao quadrado essas irregularidades, caracterizando uma destacada vantagem em relação ao parâmetro Ra.

2.3.1. Influência dos Parâmetros de Corte na Rugosidade

Os parâmetros de corte têm grande influência na rugosidade da superfície usinada, sendo a velocidade de corte e o avanço os mais.

De acordo com Shaw (1997) o avanço tem maior influência na rugosidade da superfície usinada. Teoricamente, o perfil de rugosidade de uma superfície faceada

por fresamento frontal, depende apenas do avanço e da geometria da ferramenta, principalmente raio de ponta. A altura dos picos e profundidade aumentam em proporção quadrática com o avanço. Além do efeito geométrica, as forças de usinagem aumentam com o avanço e, portanto, a amplitude das vibrações da ferramenta tende a aumentar, acarretando maiores rugosidades (WENTIAN e YUDE, 2010).

A velocidade de corte também tem grande influência na rugosidade. Para baixas velocidades de corte pode ocorrer a formação de aresta postiça de corte (APC) que afeta muito o acabamento. Isso se deve ao cisalhamento de partes da APC durante o processo e a posterior adesão à superfície da peça usinada. Por outro lado, sob velocidades de corte mais altas, a rugosidade tende a melhorar uma vez que a temperatura de usinagem aumenta, o que impede o encruamento do material do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta, inibindo a formação de APC. Além disso, a dureza do material diminui facilitando o seu cisalhamento. Em contrapartida, o aumento da velocidade de corte aumenta o desgaste da ferramenta de corte, gerando vibrações que acabam prejudicando o acabamento.

Em um processo de microfresamento onde vários fenômenos não podem ser desprezados, a variação da rugosidade com os parâmetros de corte pode ser um pouco diferente do processo de usinagem convencional. De Oliveira (2019) avaliou a influência da velocidade de corte para a liga de níquel Inconel 718 utilizando microfresas de 0,4 mm de diâmetro. A autora observou que para uma profundidade de corte de 40 μm e avanço por dente de 5 μm , houve um decréscimo da rugosidade com o aumento da velocidade de corte até 50,3 m/min, e um crescimento da rugosidade, após esse valor. O que pode ser resultado de material aderido em baixas velocidades de corte e um maior desgaste de ferramenta em velocidades maiores.

2.4. Formação de Rebarbas

Segundo o dicionário Oxford a definição de rebarba é descrita como uma crista ou borda irregular formada em um material através da ação de uma máquina ou ferramenta. Em muitos casos, as rebarbas são definidas como materiais plasticamente deformados gerados nos cantos e arestas da peça como resultado do

fluxo plástico das operações de corte e cisalhamento que requerem atenção e processo pós-operação para remoção (AURICH et al., 2009; JIN et al. 2020).

Estudos mostram um grande impacto econômico das rebarbas e seus efeitos. A rebarbação não é apenas um processo sem valor agregado, mas, em muitos casos, o aumento da formação de rebarbas é um fator chave do desgaste da ferramenta de corte e leva à substituição de ferramentas que, de outra forma, ainda estão operando sem problemas (AURICH et al., 2009). Além disso, a formação de rebarbas causa problemas de confiabilidade nas peças e diminui seu desempenho, também pode causar lesões no manipulador e induzir o desgaste abrasivo nas superfícies de contato e, portanto, afetar todo o processo de montagem. Este é um grande obstáculo para a alta produtividade e automação dos processos de usinagem (JIN et al. 2020).

Em relação ao fresamento, Hashimura et al. (1999) classificam as rebarbas de acordo com a forma, a localização e os mecanismos de formação. Os diferentes tipos de rebarbas no processo de fresamento classificadas por esses autores são ilustrados na Figura 2.4.

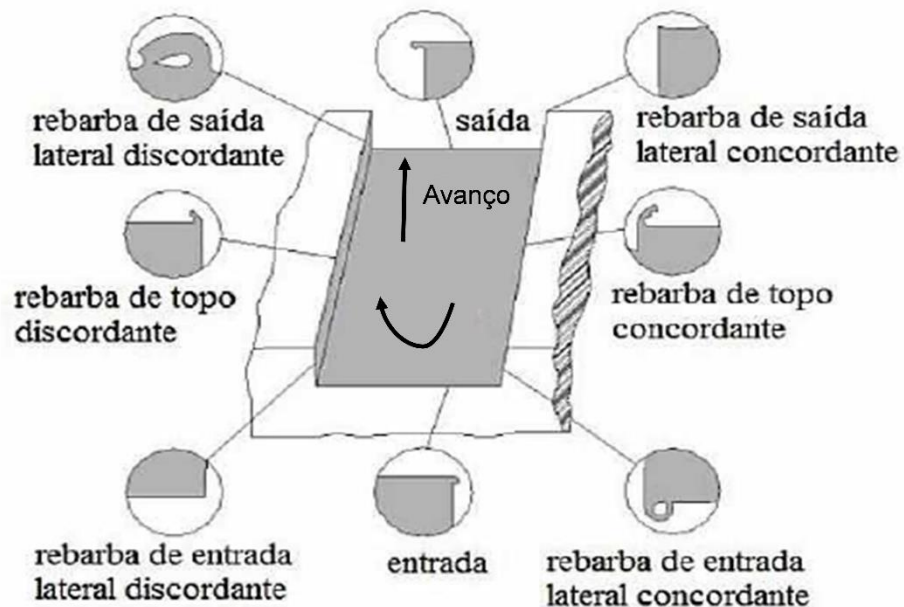


Figura 2.4 - Classificação das rebarbas quanto à posição (adaptado HASHIMURA et al., 1999).

Para o microfresamento, Chern et al. (2006) classificam as rebarbas de topo em quatro tipos: rebarba primária, rebarba do tipo agulha, rebarba do tipo pena e rebarba menor, como apresentadas na Figura 2.5.

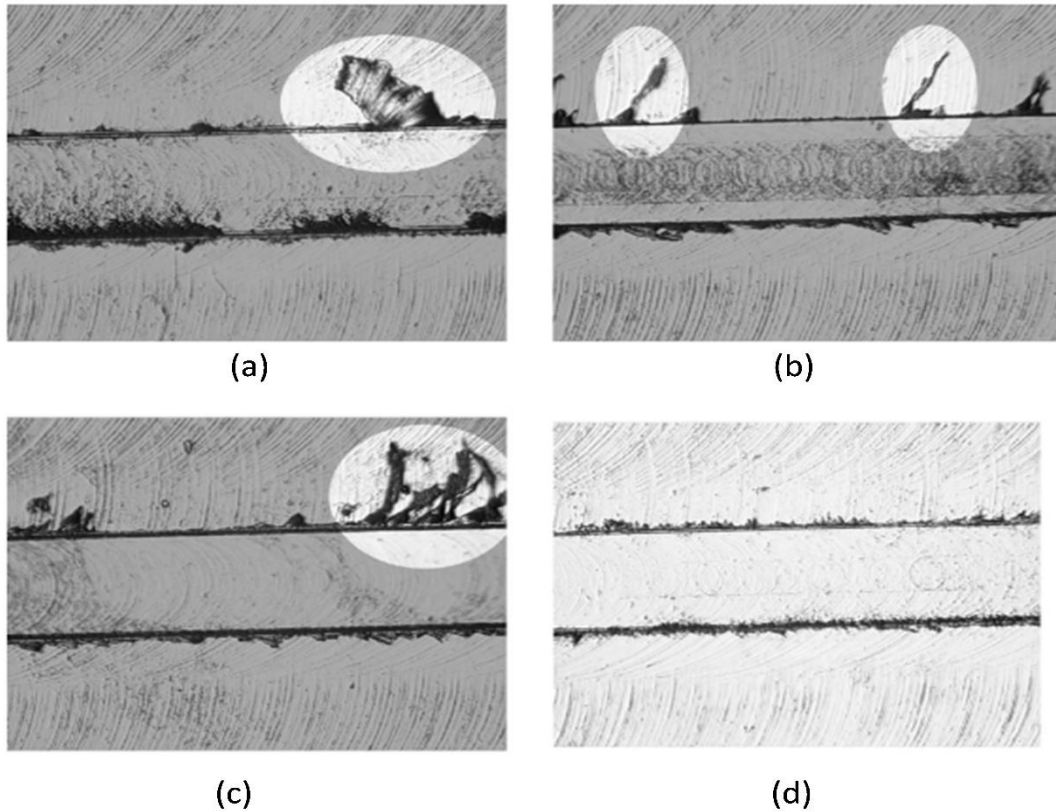


Figura 2.5 - Classificação das rebarbas quanto ao tipo: (a) primária, (b) agulha, (c) pena e (d) menor (CHERN et al. 2006)

O processo de formação das rebarbas primárias é representado na Figura 2.6. Quando a microferramenta não produz um cavaco após o início do corte, ocorre predominantemente o atrito, com isso o material à frente do caminho da ferramenta é comprimido e deformado plasticamente e, em seguida, é fraturado próximo ao meio. A rebarba primária é virada e formada com uma largura de aproximadamente metade do diâmetro da ferramenta. Se ocorrer fratura na rebarba primária durante o processo de microusinagem, forma-se rebarba tipo pena ou rebarba tipo agulha. A rebarba menor é criada quando a penetração de trabalho e a taxa de avanço são muito pequenos.

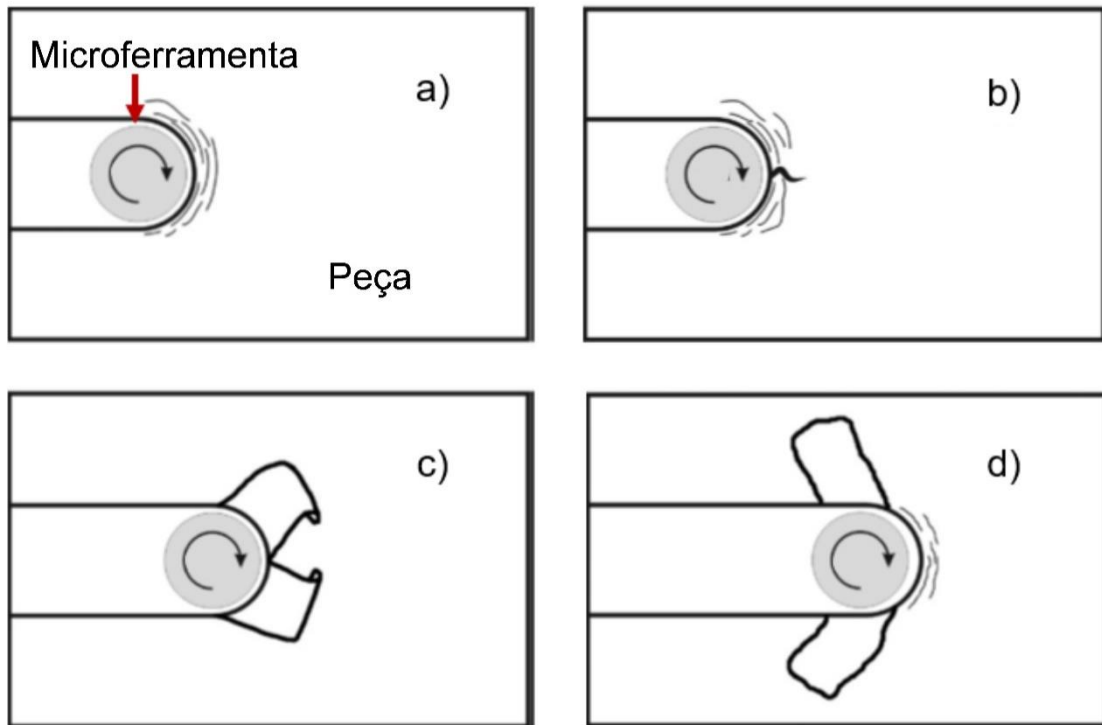


Figura 2.6 - Representação do processo de formação de rebarbas primárias (adaptado de CHERN et al. 2006)

2.4.1. Influência dos Parâmetros de Corte na Formação de Rebarbas

O processo de formação das rebarbas podem ser influenciados por diversos fatores. Gillespie (1976) observou que rebarbas não podem ser evitadas apenas por mudanças no avanço, velocidade ou geometria da ferramenta. Ainda assim, o tamanho das rebarbas produzidas pode ser significativamente minimizado pela escolha de parâmetros de usinagem apropriados.

As principais variáveis envolvidas num processo de usinagem que afetam a formação de rebarba são o material da peça, a geometria da ferramenta, o desgaste da ferramenta e os parâmetros de usinagem evidentemente. Na maioria dos casos, a seleção de um material de peça mais adequado para formar menores rebarbas, não é possível. Por isso, para minimizar e prevenir rebarbas é necessário examinar todo

o processo de corte, ou seja, alterar apenas um parâmetro do processo pode não ser suficiente ou mesmo possível (AURICH et al., 2009). No caso de processo de microfresamento, as rebarbas adquirem proporções maiores em relação à profundidade de corte por exemplo. Assim, como é difícil um processo de rebarbas para uma peça microusinada, entender a formação de rebarbas é importante.

O comportamento das rebarbas de topo no microfresamento foi avaliado por Chen et al. (2020). Os autores usinaram cobre puro utilizando uma microfresa de 0,5 mm de diâmetro, com duas arestas de corte, variando a rotação entre 9.000 rpm e 21.000 rpm (velocidade de corte entre 14,13 m/min a 32,97 m/min), avanço por dente entre 1 $\mu\text{m}/\text{dente}$ e 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$ (velocidade de avanço entre 30 mm/min e 150 mm/min) e profundidade de corte variando entre 40 μm e 80 μm . A superfície dos canais microusinados em cada condição de corte são apresentadas nas Figuras 2.7, 2.8 e 2.9.

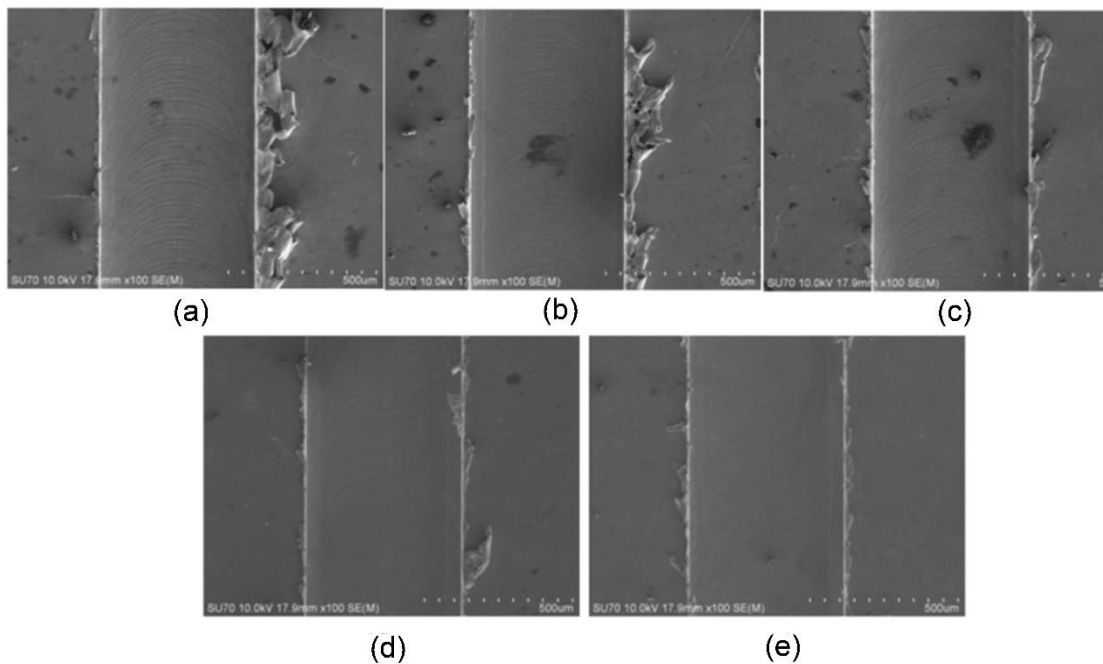


Figura 2.7 - Imagens da formação de rebarbas em microcanais fabricados em diferentes rotações: (a) 9000 rpm, (b) 12000 rpm, (c) 15000 rpm, (d) 18000 rpm e (e) 21000 rpm (CHEN et al., 2020).

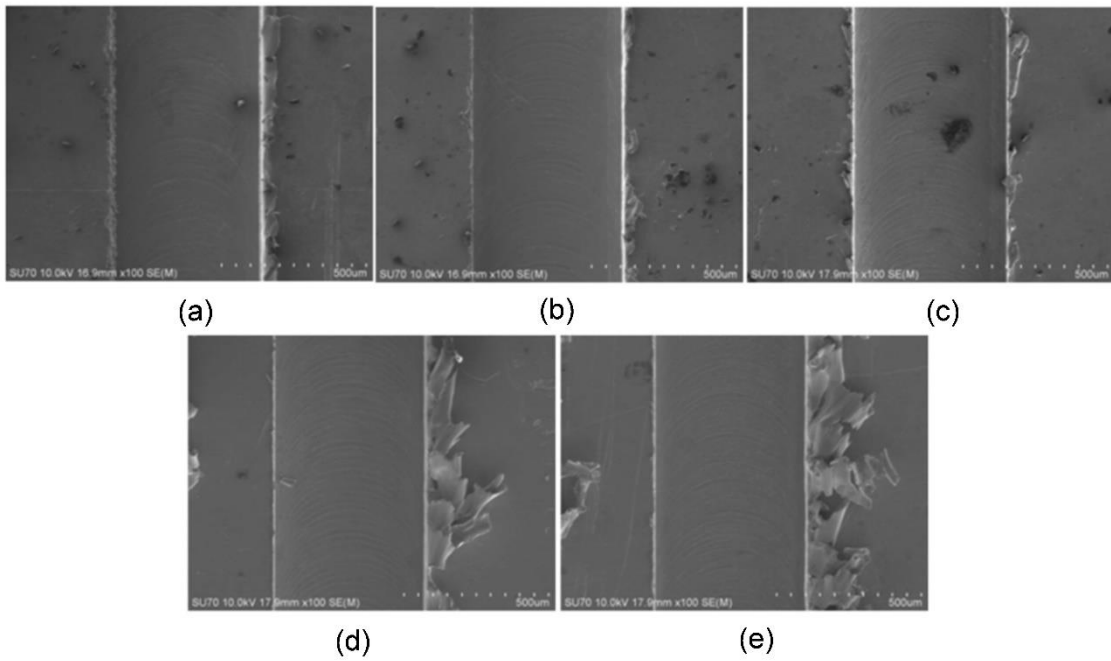


Figura 2.8 - Imagens da formação de rebarbas em microcanais fabricados em diferentes velocidades de avanço: (a) 30 mm/min, (b) 60 mm/min, (c) 90 mm/min, (d) 120 mm/min e (e) 150 mm/min (CHEN et al., 2020).

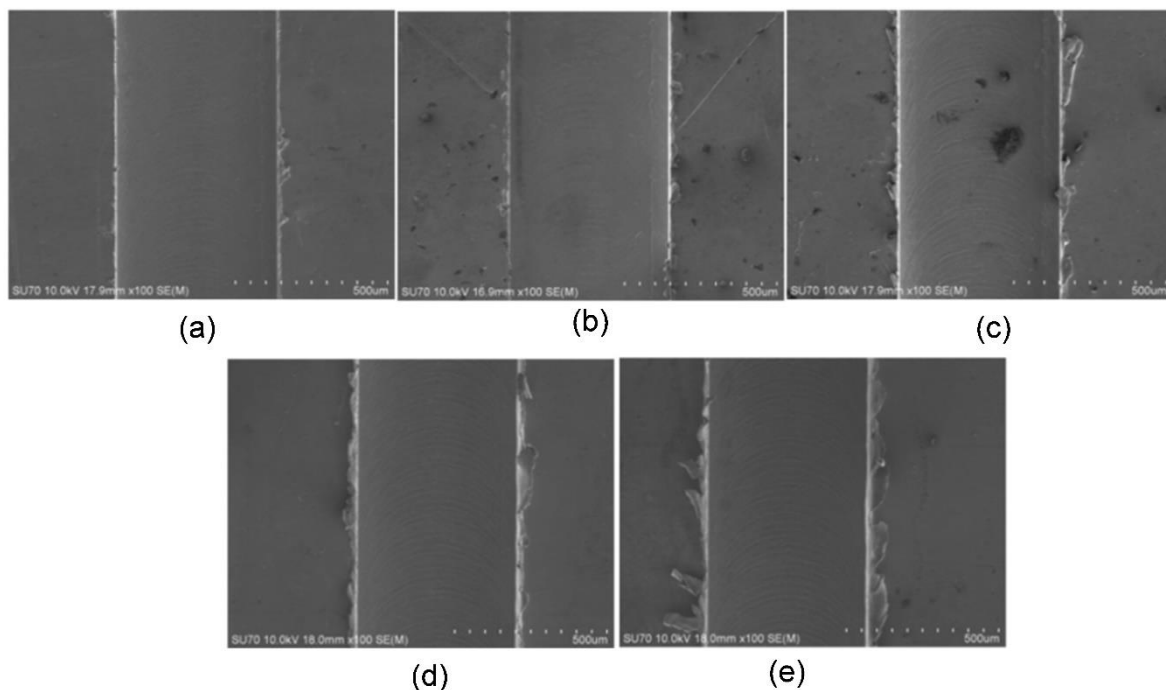


Figura 2.9 - Imagens da formação de rebarbas em microcanais fabricados em diferentes profundidades de corte: (a) 40 μm , (b) 60 μm , (c) 80 μm , (d) 100 μm e (e) 120 μm (CHEN et al., 2020).

Os autores observaram um decréscimo na largura das rebarbas de topo com o aumento da rotação e um comportamento contrário com o aumento da profundidade de corte. Já para a velocidade de avanço, o crescimento das rebarbas foi menor em velocidades intermediárias. Chen et al. (2020) explica que ao aumentar a rotação, há um tempo menor para deformação do material, o que reduz o atrito entre a peça e a ferramenta, modificando as forças envolvidas no processo, tornando-o mais estável, reduzindo a quantidade de material deformado plasticamente e promovendo um decréscimo das rebarbas. Em relação ao avanço, para valores muito baixos, há uma predominância do sulcamento (*ploughing*) do material, enquanto valores muito altos facilitam a formação de cavaco maiores e mais espessos, o que ocasionam o aumento das rebarbas de topo. Já para valores de profundidade de corte pequenos, o volume de rebarbas formadas é baixo. Entretanto com o aumento da profundidade de corte, tanto a rebarba discordante quanto a concordante sofrem aumento devido ao aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça, que, por sua vez, aumenta o volume

de material deformado. A Figura 2.10 mostra os valores da largura da rebarba de topo para os parâmetros utilizados.

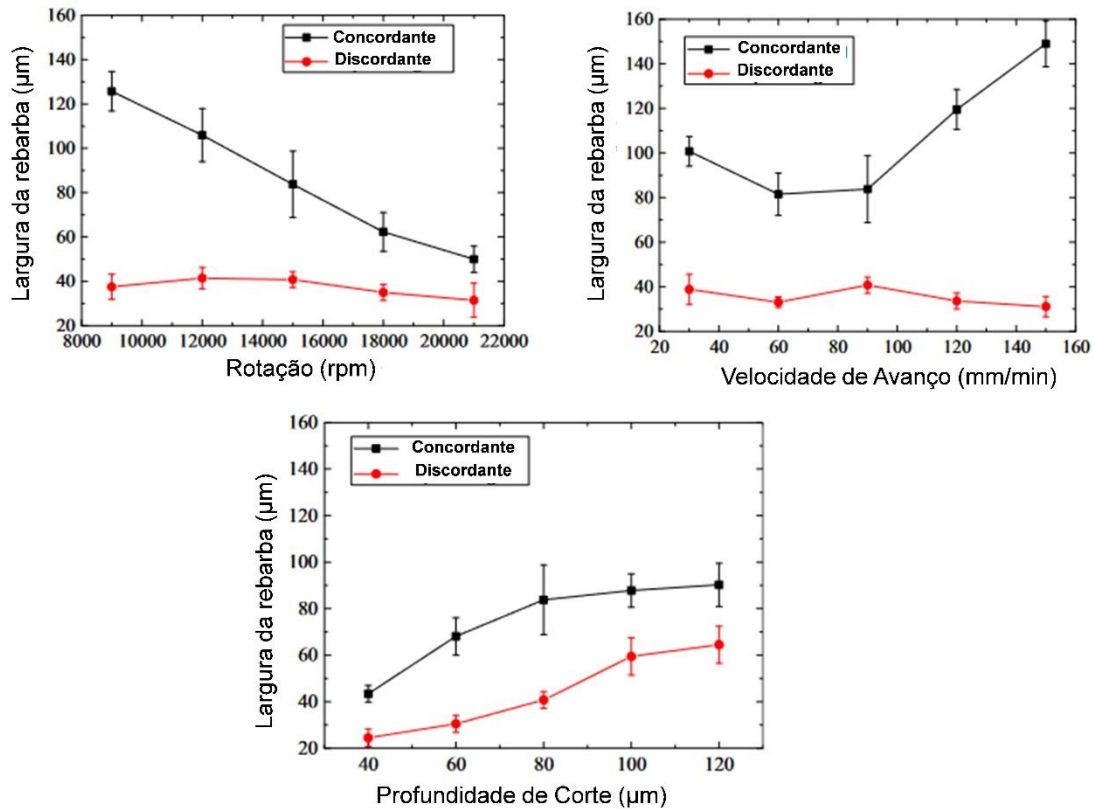


Figura 2.10 - Largura das rebarbas em relação aos parâmetros de (a) rotação, (b) avanço, (c) profundidade de corte (adaptado de CHEN et al., 2020)

2.5. Desgaste de Ferramenta

Existe uma dificuldade muito grande em prever a vida de uma ferramenta de usinagem com precisão suficiente com base em parâmetros controláveis dos processos. Por outro lado, o desgaste é o principal limitante da vida de uma ferramenta de corte, sendo bastante estudado por afetar o custo e a qualidade dos processos de usinagem (UHLMANN et al., 2013). Outras limitações de vida podem ser rugosidade e rebarbas por exemplo.

Em geral, uma ferramenta de corte pode chegar ao fim de sua vida devido ao desgaste, lascamento, trincas, deformação plástica ou por falha catastrófica (ALAUDDIN et al., 1995).

O desgaste em usinagem pode ser definido como perda de massa da ferramenta capaz de alterar sua geometria, causado por vários mecanismos de desgaste, sendo fortemente influenciado pela temperatura do processo. O processo de desgaste é contínuo e progressivo, ocorrendo em pequenas quantidades, seja a nível atômico ou granular (MACHADO et al., 2011).

O desgaste progressivo pode ser identificado tanto nas superfícies de folga quanto na superfície de saída e arestas das ferramentas, sendo as três principais formas de desgaste: desgaste de cratera, desgaste de flanco e desgaste de entalhe (MACHADO et al., 2011).

Além da forma, o desgaste pode ser identificado também pelo mecanismo físico, que depende do material envolvido e das condições de corte, especialmente aqueles que afetam a temperatura. Os mecanismos mais comuns são: adesão, abrasão, difusão, oxidação e corrosão (MACHADO et al., 2011; UHLMANN et al., 2013). Outros autores, além de considerarem os mecanismos já citados, adicionam também como mecanismos de desgaste a deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas, a deformação plástica por altas tensões de compressão na aresta de corte e o desgaste de entalhe, no qual engloba o mecanismo da oxidação (TRENT, WRIGHT; 2000; DOLINŠEK; KOPAČ; 1999).

Os mecanismos de adesão e abrasão são característicos de condições com baixa temperatura, enquanto que em temperaturas elevadas a difusão e a oxidação estarão presentes (MACHADO et al., 2011). Já o mecanismo de deformação plástica por cisalhamento a altas temperaturas é característico da usinagem de materiais com alto ponto de fusão e com elevada taxa de velocidade de corte e avanço, enquanto a deformação plástica por altas tensões de compressão está presente no corte de materiais com elevada dureza (TRENT, WRIGHT; 2000).

Nos processos de microusinagem, em condições normais, a baixa rigidez ocasiona um rápido desgaste da ferramenta, causando fortes vibrações e deterioração da superfície usinada. As formas de desgaste mais comuns em microfresamento, segundo Alhadeff et al. (2019), são mostradas na Figura 2.11.

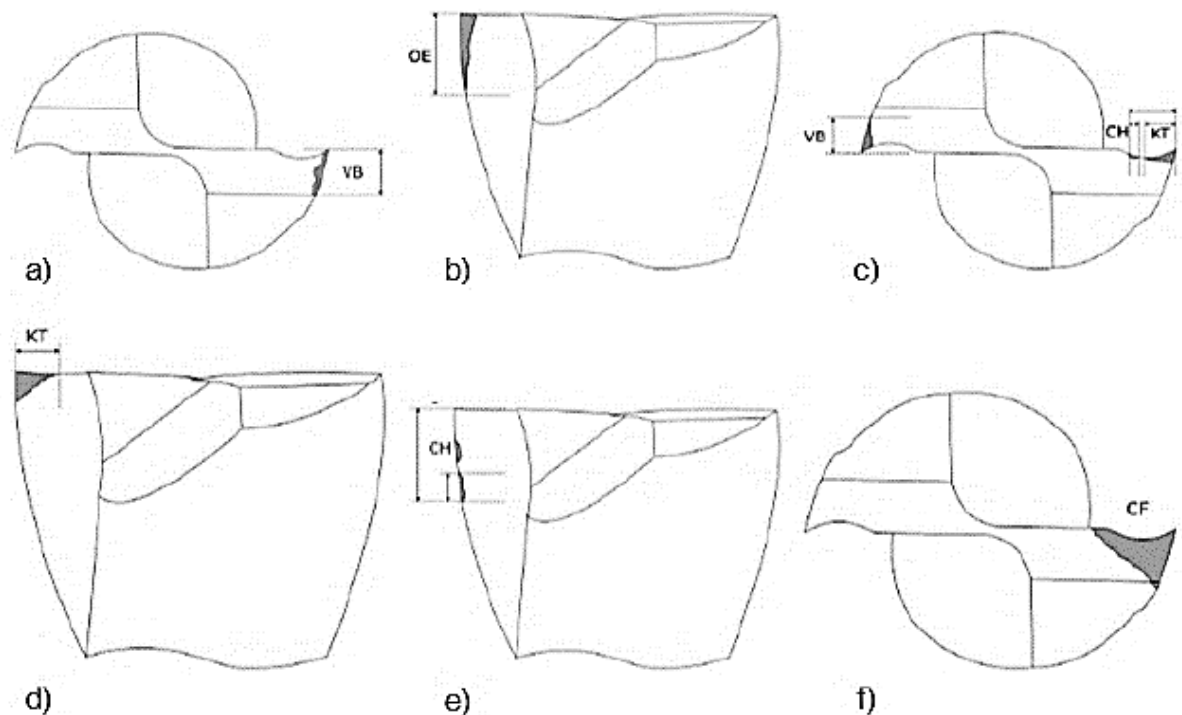


Figura 2.11 – Tipos de desgaste presentes no microfresamento (adaptado ALHADEFF et al. 2019).

Observa-se na figura que os principais tipos de desgaste presente no microfresamento são: o desgaste de flanco (VB), Fig 2.11 (a) e (c); o desgaste medido na aresta principal de corte (OE), Fig. 2.11 (b); o desgaste medido na aresta secundária de corte (KT), Fig. 2.11 (c) e (d); o desgaste por lascamento (CH), Fig. 2.11 (c) e (e); e a falha catastrófica (CF), Fig. 2.11 (f).

Devido à grande influência no processo de microfresamento, o desgaste da ferramenta tem sido amplamente estudado, porém, diferentemente do fresamento convencional, não há uma norma ou padronização para quantificação do desgaste das microfresas, por isso diversos autores têm usado diferentes métodos de medição (GOMES, 2019).

Filiz et al. (2007) realizaram medições de desgaste na superfície secundária de folga, ao investigarem o microfresamento do cobre puro comercial 101 utilizando microfresas de metal duro com 254 μm de diâmetro. O desgaste foi quantificado pela

diferença entre o diâmetro da ferramenta nova e desgastada. Queiroz (2022) e De Oliveira (2019) também utilizaram método semelhante para medição do desgaste em microfresas de 400 µm de diâmetro na usinagem do aço ferramenta H13 e da liga de níquel Inconel 718. A metodologia utilizada está esquematizada na Fig. 2.12. Esta metodologia se justifica pela dificuldade de posicionar a ferramenta dentro do MEV para a medição de desgaste na superfície de folga por exemplo.

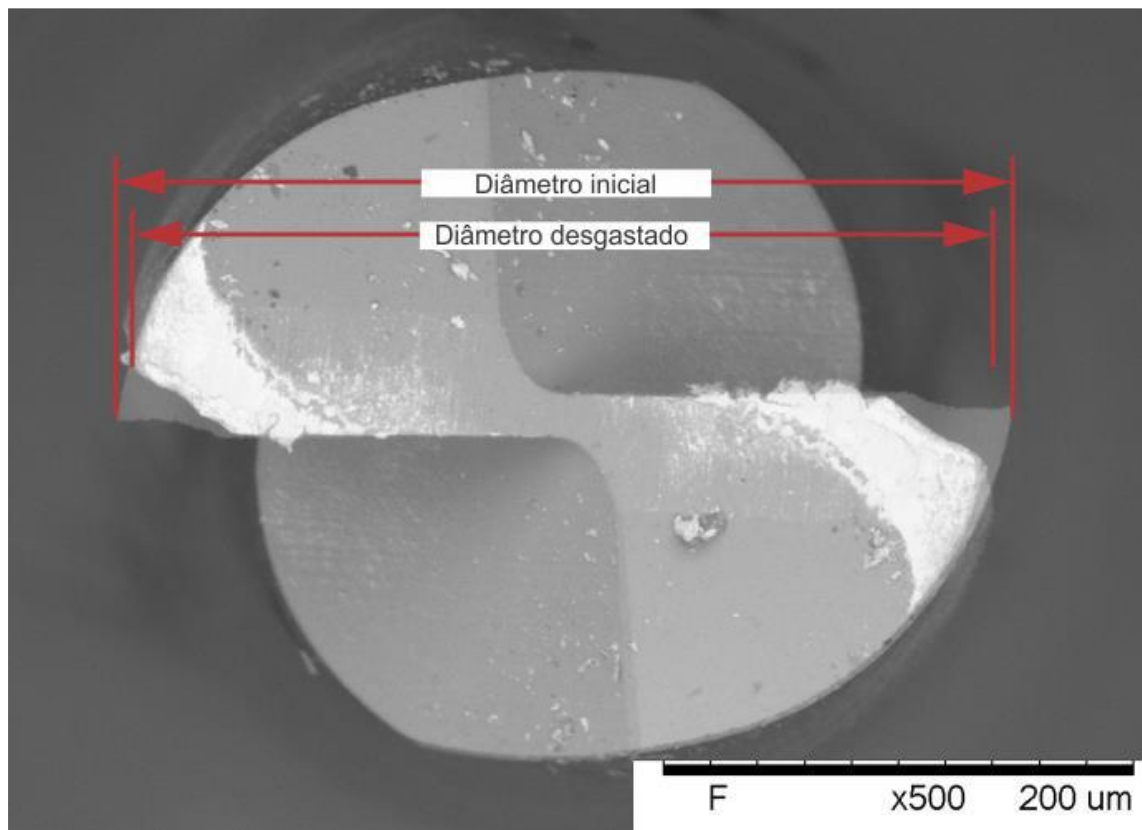


Figura 2.12 - Metodologia de medição de desgaste por meio da diferença dos diâmetros inicial e final das microfresas (DE OLIVEIRA, 2019).

Ziberov et al. (2020), ao avaliar o microfresamento da liga de titânio Ti 6Al 4V, também investigaram o desgaste em microfresas de metal duro, sem revestimento e revestidas com DLC e TiNAl, com 152,4 µm de diâmetro. Os autores mediram o desgaste na superfície de folga principal, com o auxílio de imagens feitas no MEV, conforme a Figura 2.13. A medição foi feita pela diferença entre a distância da ponta da ferramenta nova e da ferramenta usada em duas direções, direção 1 e 2,

identificadas como W1 e W2, obtendo assim o valor do desgaste de flanco. Esta metodologia exige o correto posicionamento da ferramenta para observação no MEV, o que demanda grande tempo para ajuste antes da medição do desgaste.

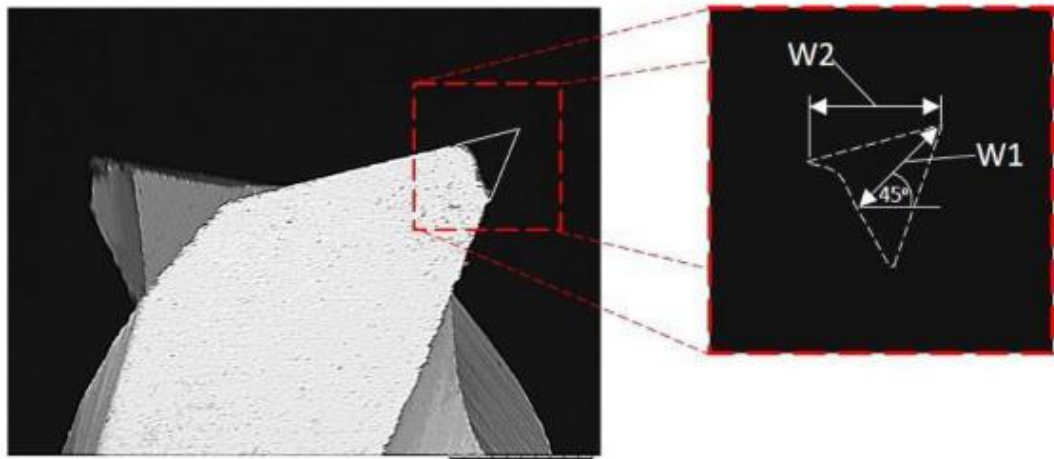


Figura 2.13 – Metodologia de medição do desgaste pela ponta da ferramenta (adaptado ZIBEROV, et al., 2020).

De Oliveira (2019) também propôs a medição do desgaste por meio da determinação da área desgastada ou pela largura do canal usinado. A utilizou essa metodologia ao realizar o microfresamento do Inconel 718 com microfresas de metal duro revestidas com TiNAl de 400 μm de diâmetro. Alhadeff et al. (2019) explica que essa é uma metodologia que reduz o tempo de medição, porém apenas realizada ao final do processo. Porém, como não há um consenso na literatura, não se pode afirmar a metodologia mais precisa nessa questão.

2.6. Superligas à base de Níquel

Ligas a base níquel possuem propriedades únicas, ou combinações de propriedades, que permitem que sejam usadas em uma variedade de aplicações especializadas. Grande parte da aplicação desses materiais é em sistemas que trabalham em elevadas temperaturas, por isso essas ligas constituem aproximadamente entre 45 e 50% do material total necessário na fabricação de um motor de aeronave devido à sua excelente força e resistência à oxidação em

temperaturas elevadas, acima de 550°C (EZUGWU et al., 1999). Destacam-se outras aplicações, por exemplo, componentes para a indústria de energia nuclear, aeronaves, turbinas geradoras de energia, mísseis para indústria bélica, plantas de processamento químico, petroquímica e de petróleo e gás (POLLOCK e TIN, 2006).

As superligas de níquel possuem uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), mesmo em temperatura ambiente. São constituídas de uma matriz γ contínua e homogênea, não magnética e tem como característica a capacidade de solubilizar por completo o cobre, além de uma ampla faixa de solubilização de ferro e cromo (DUPONT et al., 2009). Para o desenvolvimento das propriedades desejadas torna-se necessário a adição de inúmeros elementos químicos para compor a liga. Dentre os diversos elementos podemos citar o cromo, molibdênio, tungstênio, ferro, cobalto, alumínio, boro, titânio e carbono (DUPONT et al., 2009).

As superligas a base de níquel podem ser classificadas quanto ao seu mecanismo de aumento de resistência, nos quais os principais são, ligas endurecidas por solução sólida, ligas endurecidas por precipitação e ligas endurecidas por dispersão de óxidos. (GEDDES et al., 2010).

As ligas endurecidas por solução sólida consistem na formação de uma solução sólida substitucional, ocasionando uma dificuldade de movimentação das discordâncias. Os principais elementos que atuam no aumento de resistência por solução sólida no níquel são o cobre, o cobalto, o ferro, o cromo, o tungstênio, o titânio e o molibdênio. (GEDDES et al., 2010).

No mecanismo de aumento de resistência por precipitação é necessária uma diminuição da solubilidade do soluto na rede cristalina, tornando possível a formação de uma solução sólida supersaturada. Dessa forma os átomos de soluto presente na solução irão precipitar, formando uma nova fase. Assim o mecanismo de resistência se dá devido ao bloqueio do movimento das discordâncias pelas fases precipitadas na matriz (SILVA, 2010). Essas novas fases podem ser precipitadas a fim de aumentar a resistência, como as fases γ' -Ni₃(Al,Ti) e γ'' - Ni₃Nb, geralmente esses precipitados são obtidos por tratamentos térmicos. (SILVA, 2010; POLLOCK e TIN, 2006).

O endurecimento por dispersão de óxido é um mecanismo semelhante ao endurecimento por precipitação, exceto que o agente fortalecedor é adicionado à liga e não precipitado da matriz. Nas ligas endurecidas por dispersão de óxidos, as

partículas de óxido agem de maneira semelhante aos intermetálicos γ' , bloqueando o movimento de deslocamento, embora os mecanismos sejam diferentes porque a partícula não é coerente com a matriz. (GEDDES et al., 2010).

Outras fases podem ser encontradas em certas superligas, particularmente em ligas envelhecidas, normalmente precipitadas durante operações de serviço, nos quais são denominadas fases topologicamente compactas (TCP) e representadas pelas fases μ , σ , Laves, P e etc. Estas fases são indesejáveis, pois prejudicam as principais propriedades das superligas (REED, 2006).

Em relação a usinabilidade das ligas à base de níquel, Ezugwu et al. (1999) explicam que essas ligas são conhecidas como algumas das superligas mais difíceis de usinar para satisfazer os requisitos de produção e qualidade. As propriedades dessas ligas que contribuem para a baixa usinabilidade podem ser resumidas em:

- I. Grande parte de sua resistência mecânica é mantida durante a usinagem devido às suas propriedades em elevadas temperatura;
- II. O encruamento ocorre rapidamente durante a usinagem, o que é um fator importante que contribui para o desgaste da ferramenta;
- III. As ferramentas de corte sofrem alto desgaste abrasivo devido à presença de carbonetos duros na matriz austenítica;
- IV. Podem acontecer reações químicas em altas temperaturas de corte ao usinar, levando a uma alta taxa de desgaste por difusão da ferramenta;
- V. A adesão do material das ligas de níquel na ferramenta de corte durante a usinagem, causando entalhes severos, bem como lascamento no plano de saída da ferramenta devido ao conseqüente arrancamento dos materiais da ferramenta;
- VI. Produção de um cavaco tenaz e contínuo, de difícil controle durante a usinagem, contribuindo assim para a degradação da ferramenta de corte;
- VII. A baixa difusividade térmica das ligas à base de níquel geralmente gera alta temperatura na ponta da ferramenta, bem como altos gradientes térmicos na ferramenta de corte.

2.6.1. Inconel 718

A liga Inconel 718 pertence à família das superligas de níquel, sendo composta predominantemente de níquel-ferro-cromo, e representa quase metade do total de superligas utilizadas no mundo. É uma liga metálica endurecida por precipitação e possui alta resistência mecânica, à corrosão e excelente resistência à fluência, com isso possui várias aplicações, destacando-se principalmente na indústria aeroespacial, indústria do petróleo e em componentes de turbinas a gás. (ASM,1990; REED, 2006)

A Tabela 2.1 apresenta a composição química típica da liga Inconel 718 mostrando os principais elementos de liga.

Tabela 2.1 - Composição Química da Liga Inconel 718 (Adaptado ASM, 1990).

Elemento	Ni	Cr	Fe	Co	Mo	Nb+Ta	Ti
% Peso	50,0 - 55,0	17,0 - 21,0	Bal.	1,0	2,80 - 3,30	4,75 - 5,50	0,65 - 1,15
Elemento	Al	C	Mn	Si	B	Cu	W
% Peso	0,20 - 0,80	0,08	0,35	0,35	0,006	0,30	-

A liga Inconel 718 apresenta um alto teor de nióbio que é responsável pela fase altamente endurecedora γ'' (Ni₃Nb). O precipitado γ'' apresenta estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), proporcionando uma alta resistência mecânica e manutenção das propriedades em altas temperaturas, devido ao baixo número de planos de escorregamento dessa estrutura. Observa-se também baixos teores de tungstênio, molibdênio, e tântalo que são responsáveis pelo endurecimento por solução sólida nas ligas de níquel, e baixos valores de alumínio e titânio, constituintes da fase γ' (REED, 2006).

A Tabela 2.2 apresenta as propriedades físicas e a Tabela 2.3 as propriedades mecânicas à temperatura ambiente da liga Inconel 718.

Tabela 2.2 - Propriedades Físicas da Liga Inconel 718 (Adaptado ASM, 1990).

Densidade (g/cm³)	Ponto de fusão (°C)	Calor específico (J/kg·K)	Coefficiente médio de expansão térmica (µm/m·K)	Condutividade térmica (W/m·K)
8,19	1260 - 1336	435	13	11,4

Tabela 2.3 - Propriedades Mecânicas da Liga Inconel 718 (Adaptado ASM, 1990).

Resistencia à tração (MPa)	Tensão de cisalhamento (MPa)	Alongamento em 50 mm (%)	Modulo de elasticidade (GPa)	Dureza
1240	1036	12	211	36 HRC

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas informações sobre os procedimentos experimentais utilizados para realização deste trabalho. Primeiramente serão apresentadas informações sobre o material de trabalho, as microfresas e a máquina-ferramenta utilizada para a realização dos experimentos, bem como os equipamentos utilizados para aquisição de imagens e medições de perfil. Também será apresentada a metodologia aplicada, como parâmetros de usinagem utilizados, método de determinação do desgaste das microferramentas e medição da rugosidade superficial.

3.1. Material de Trabalho e Fixação da Amostra

O material utilizado foi a Liga Inconel 718, na forma envelhecida, com dureza média de 347 HV. A amostra foi preparada até atingir as dimensões de 12 mm de largura, 23 mm de comprimento e 20 mm de altura. A microestrutura da liga é apresentada na Figura 3.1, evidenciando a presença de precipitados coerentes duros (cor clara) e carbonetos (cor escura).

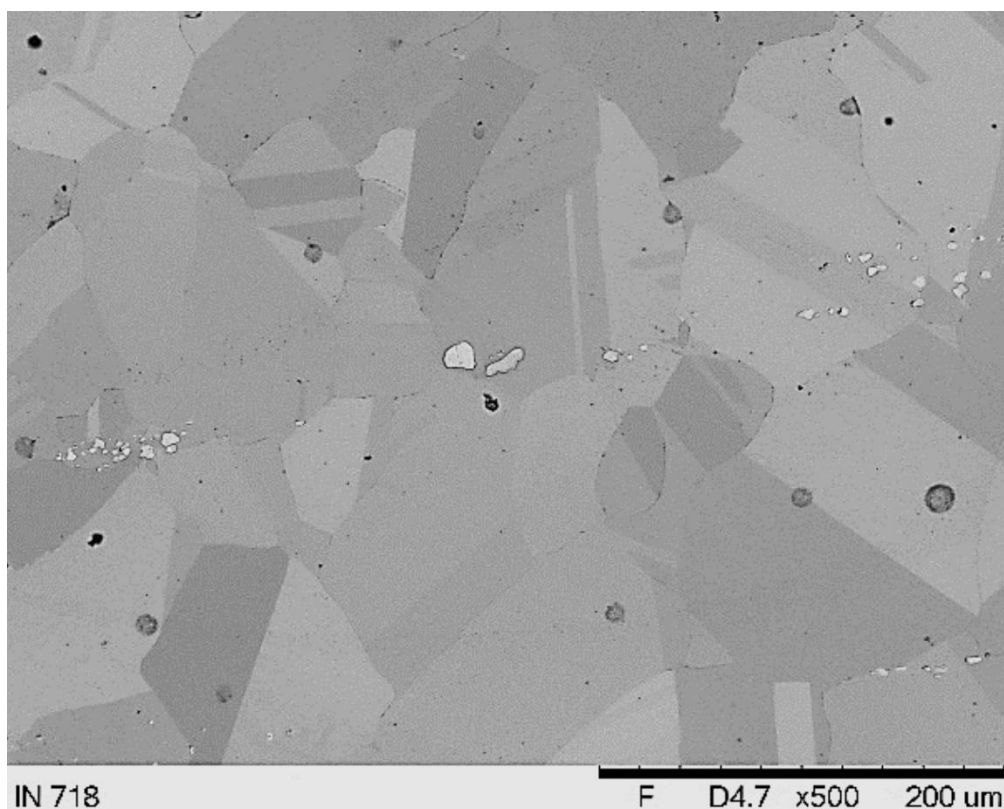


Figura 3.1 - Microestrutura da liga Inconel 718 (De Oliveira, 2019)

A composição química da amostra, apresentada na Tabela 3.1, foi verificada por meio de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), utilizando o equipamento SwiftED3000, fabricado pela Hitachi High-Technologies Corporation®, com tempo de aquisição de 60 s, tempo de processamento de 5 segundos e tensão de aceleração de 15 kV, a fim de comparação com a composição química obtida pela ASM (1990).

Tabela 3.1 - Composição química por EDS da liga Inconel 718.

Elemento	Ni	Cr	Fe	Co	Mo	Nb+Ta	Ti
% Peso	46,54	25,22	Bal.	-	1,98	3,49	1,46
Elemento	Al	C	Mn	Si	B	Cu	W
% Peso	0,40	-	-	0,52	-	0,34	-

Para a fixação do corpo de prova na microfresadora para realização dos ensaios de microfresamento de topo reto, foi utilizada uma morsa de precisão. A fixação é uma etapa de grande importância, pois é preciso garantir que a amostra esteja fixada o suficiente para que não haja deslocamento durante o microfresamento e que suas superfícies estejam alinhadas o máximo possível, uma vez que qualquer movimentação ou desalinhamento pode influenciar nas obtenções dos dados posteriores, influenciando os resultados.

3.2. Equipamentos Utilizados

Os ensaios de microfresamento deste trabalho, bem como a coleta e análise de dados, foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU). Para os ensaios de microfresamento, utilizou-se uma microfresadora CNC modelo Mini-mill/GX do fabricante Minitech Machinery® e com 3 eixos, ilustrada na Figura 3.2. Os eixos X, Y e Z possuem deslocamento máximos de 300 mm, 228 mm e 228 mm, respectivamente. A resolução dos eixos é de 0,1 μm e a velocidade de avanço máxima é de 1 000 mm/min e a operação do equipamento é feita através do software Mach3Mill. A máquina possui uma mesa de alumínio com furações para fixação das peças, cujas dimensões são 152,4 mm x 444,5 mm, a qual possui mecanismo de deslocamento com rolamento linear da marca THK. O conjunto está apoiado sobre uma mesa inercial, projetada especialmente para a máquina com o intuito de reduzir vibrações externas que possam influenciar os resultados.

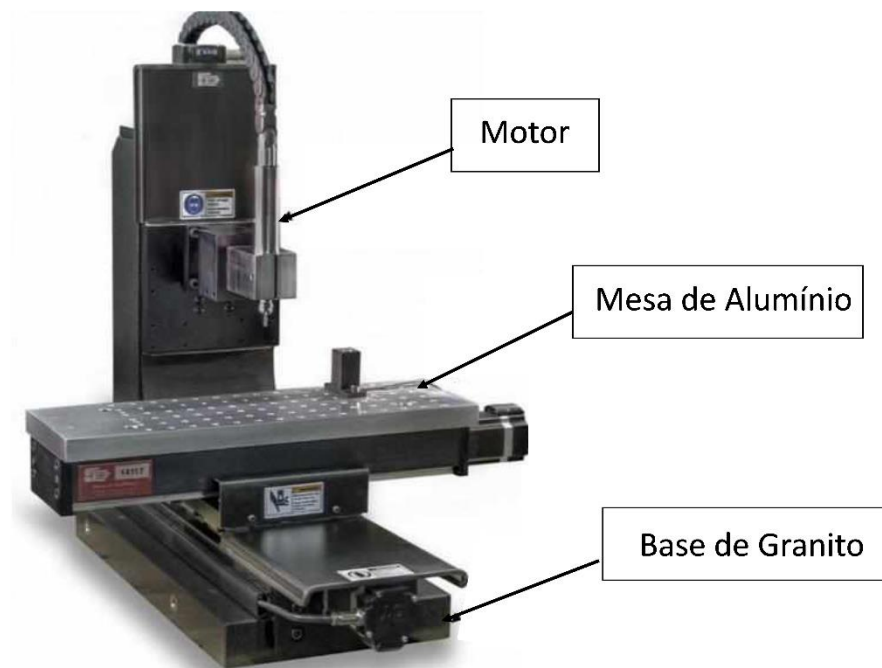


Figura 3.2 - Máquina ferramenta utilizada nos ensaios (adaptado de MINITECH MACHINERY, 2022).

Para a aquisição de imagens das ferramentas e dos canais usinados, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo HITACHI TM3000, como mostrado na Figura 3.3 (a). Este equipamento permite aumentos de 15x a 30000x e tensão de aceleração dos elétrons de 5 kV, 15 kV, e eixos que permitem movimentações de $\pm 17,5$ mm tanto em X quanto em Y. O microscópio possui autofoco, brilho e contraste automático e as imagens podem ser registradas em quatro diferentes modos de iluminação. Para análises de composição química foi utilizado o EDS modelo HITACHI SwiftED3000 ilustrado na Figura 3.2 (b) (HITACHI HIGH-TECHNOLOGIES CORPORATION, 2013).

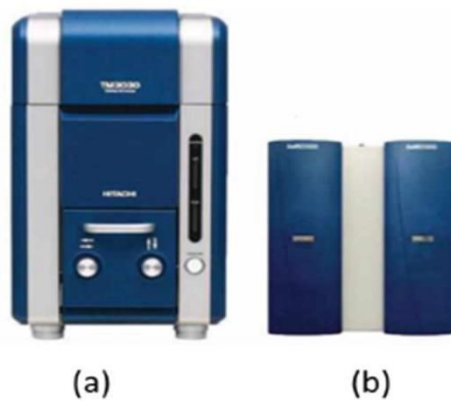


Figura 3.3 – Equipamentos de aquisição de imagens e composição química: (a) MEV e (b) EDS (HITACHI HIGH-TECHNOLOGIES CORPORATION, 2013).

As medições de rugosidade e os perfis dos canais foram realizadas por meio do perfilômetro Form Talysurf Intra do fabricante Taylor Hobson®, mostrado na Figura 3.4, com resolução de 16 nm com 1,0 mm de campo ou 3 nm com 0,2 mm de campo, e raio de ponta do apalpador de 2 μm (TAYLOR HOBSON, 2012).



Figura 3.4 - Perfilômetro Form Talysurf Intra (TAYLOR HOBSON, 2012).

3.3. Microfresas

As ferramentas de corte empregadas neste trabalho são de metal duro revestidas com TiAlN, possuem diâmetro de 0,4 mm, com erro máximo de 5%, comprimento de corte de 0,8 mm e duas arestas de corte (MITSUBISHI MATERIALS, 2022). Um desenho esquemático mostrando as dimensões da ferramenta de corte é apresentada na Figura 3.5.

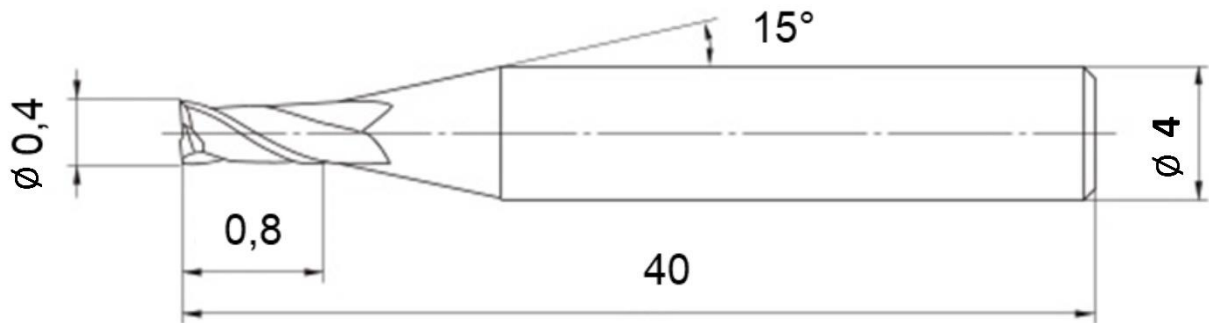


Figura 3.5 - Microferramenta Mitsubishi MS2MS (MITSUBISHI, 2022).

Todas as ferramentas novas foram observadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) antes da usinagem para verificar sua geometria e integridade. São apresentadas na Figura 3.6 imagens das principais superfícies da microfresa utilizada neste trabalho.

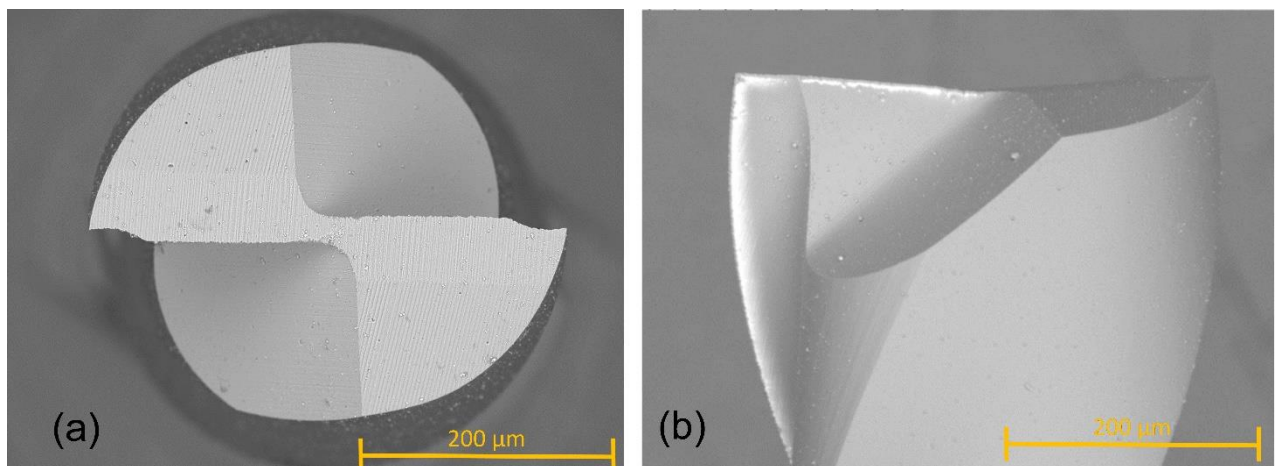


Figura 3.6 - Imagens de microfresas novas utilizadas no trabalho: (a) superfície secundária de folga (b) superfície de saída.

3.4. Procedimento Experimental

3.4.1. Preparação do corpo de prova e referenciamento da microfresa

Antes da realização dos ensaios, é necessário, além de uma boa fixação do material de trabalho, um faceamento da superfície a ser usinada. Para isso foi utilizada uma fresa de topo reto de 3 mm de diâmetro com a finalidade de garantir o paralelismo da peça em relação à mesa da microfresadora, reduzindo os erros associados à planeza do material e perpendicularidade. Após isso foi realizado o posicionamento do bico para a aplicação do fluido de corte e o referenciamento da microferramenta.

Na Figura 3.7 é apresentado o esquema de montagem do procedimento experimental. Foi definida uma distância de 10 mm para a aplicação do fluido de corte e um ângulo aproximado de 30°, com posicionamento a frente da ferramenta, ou seja, fluido sendo aplicado na direção contrária ao movimento de avanço da ferramenta.

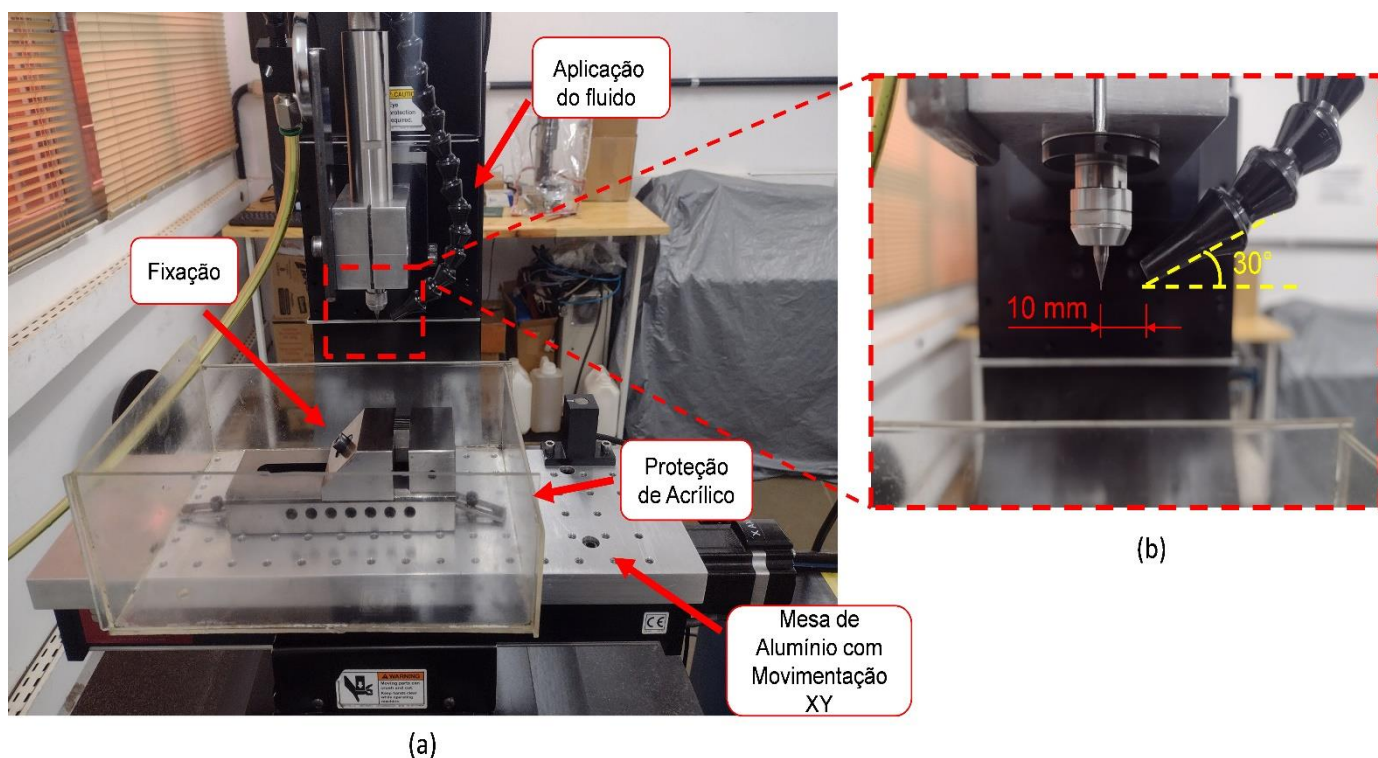


Figura 3.7 - (a) Montagem do experimento e (b) posicionamento do bico de aplicação do fluido de corte.

O referenciamento da ferramenta foi realizado em duas etapas e com o auxílio de um microscópio USB com ampliação máxima de 500x. Na primeira etapa, a ferramenta, ainda sem rotacionar, é aproximada o máximo possível da peça até uma distância segura conforme a imagem transmitida pela câmera, assim como é retratado na Figura 3.8.

A segunda etapa é feita em vários passes com a ferramenta girando. A ferramenta é posicionada fora da peça na mesma posição Z da etapa anterior e movimenta em direção à peça onde percorre um comprimento de aproximadamente 2 mm. Enquanto não ocorre contato, que é verificado visualmente, a ferramenta retorna para a posição inicial. Em seguida é dado um incremento de 1 μm na profundidade de corte. Este ciclo se repete até que a ferramenta toca a peça, quando é possível visualizar um pequeno risco com o auxílio do microscópio USB. Esta posição é referenciada então como sendo a posição $Z = 0$. Este procedimento é um pouco demorado, mas garante um referenciamento com um erro de aproximadamente a resolução da máquina.

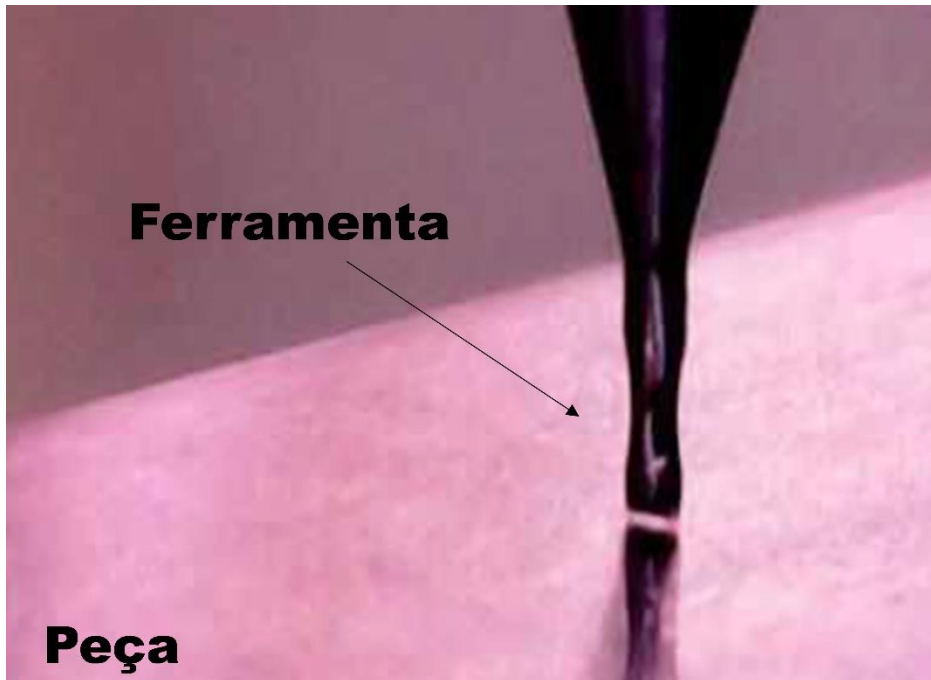


Figura 3.8 - Aproximação para zeramento da ferramenta utilizando o microscópio USB.

3.4.2. Ensaio de Usinagem

Finalizando todas as etapas de preparação, análise e referenciamento das ferramentas, iniciou-se a etapa de microfresamento. Foram realizados microfresamento de canais na superfície da peça. Todos os ensaios foram realizados com aplicação de fluido de corte na forma de MQF. Foi utilizado o fluido Vascomill MMS FA2 da Blaser®, com vazão de 100 ml/h e pressão de 6 bar. O bocal de aplicação encontrava-se a uma distância de 10 mm e inclinação de 30°, posicionado à frente da ferramenta, como mostrado na Figura 3.7.

Os parâmetros de corte utilizados para o procedimento experimental são mostrados na Tabela 3.2. Nos ensaios com maior profundidade de corte, F1 e F2, optou-se por não realizar réplicas nem utilizar o maior avanço por dente. Isso foi devido à baixa qualidade da superfície usinada em relação à formação de rebarbas.

Tabela 3.2 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de microusinagem.

Ensaio	Rotação (rpm)	Velocidade de Corte (m/min)	a_p (μm)	f_z ($\mu\text{m/z}$)
F1	10.000	12,6	40	5
F2	40.000	50,3		
F3	10.000	12,6	10	5
F4	10.000	12,6		10
F5	40.000	50,3		5
F6	40.000	50,3		10

Foram fabricados em cada ensaio 9 microcanais de 12 mm de comprimento cada, totalizando 108 mm usinados com espaçamento de aproximadamente 2 mm entre os canais. Após análises de cada teste foi realizada a réplica do ensaio no mesmo material. A Figura 3.9 ilustra um esquema de usinagem dos microcanais.

Todos os ensaios foram realizados na direção positiva do eixo X, direção do batente fixo da morsa de fixação, além do início e do final do movimento de avanço distanciados 15 mm da peça, com a finalidade de evitar mudanças na velocidade de avanço durante o processo de corte.

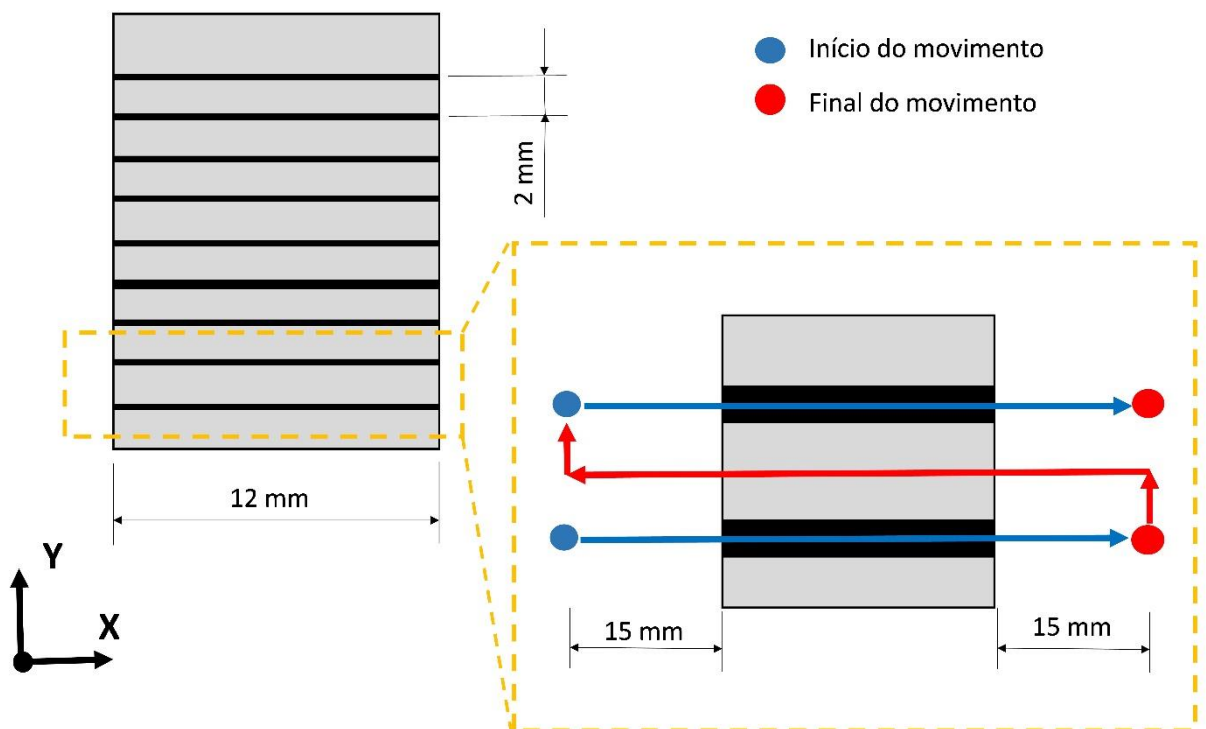


Figura 3.9 - Representação esquemática do movimento da ferramenta na confecção dos canais.

3.5. Variáveis de Saída

Após a usinagem dos microcanais, a microferramenta e a peça eram levadas a um banho ultrassônico com álcool isopropílico e analisadas no MEV. Foram obtidas imagens das superfícies das microfresas a fim de medir o desgaste e imagens de todos os canais. Em seguida eram feitas as medidas de rugosidade e profundidade de todos os canais. Todos os procedimentos mencionados serão descritos nos tópicos a seguir.

3.5.1. Desgaste das Ferramentas

Para avaliar o desgaste foram comparadas as imagens de topo (superfície secundária de folga) e imagens laterais (superfície principal de folga), retiradas no

MEV antes e depois dos ensaios. Foram avaliados qualitativamente, por meio das imagens obtidas, as formas e mecanismos de desgaste encontrados nas microferramentas após a usinagem de todos os canais. Além disso, para avaliação quantitativa do desgaste, foram utilizadas imagens de topo com o objetivo de dimensionar a perda de diâmetro das ferramentas. As imagens das ferramentas foram sobrepostas para diminuir o erro proporcionado pela distância focal do microscópio. Por meio do software Image-Pro Plus® é possível medir o diâmetro inicial e o diâmetro final microfresa. Os valores de perda do diâmetro foram utilizados para quantificar o desgaste da aresta principal de corte das ferramentas. A Figura 3.10 demonstra o procedimento adotado para medição desse desgaste.

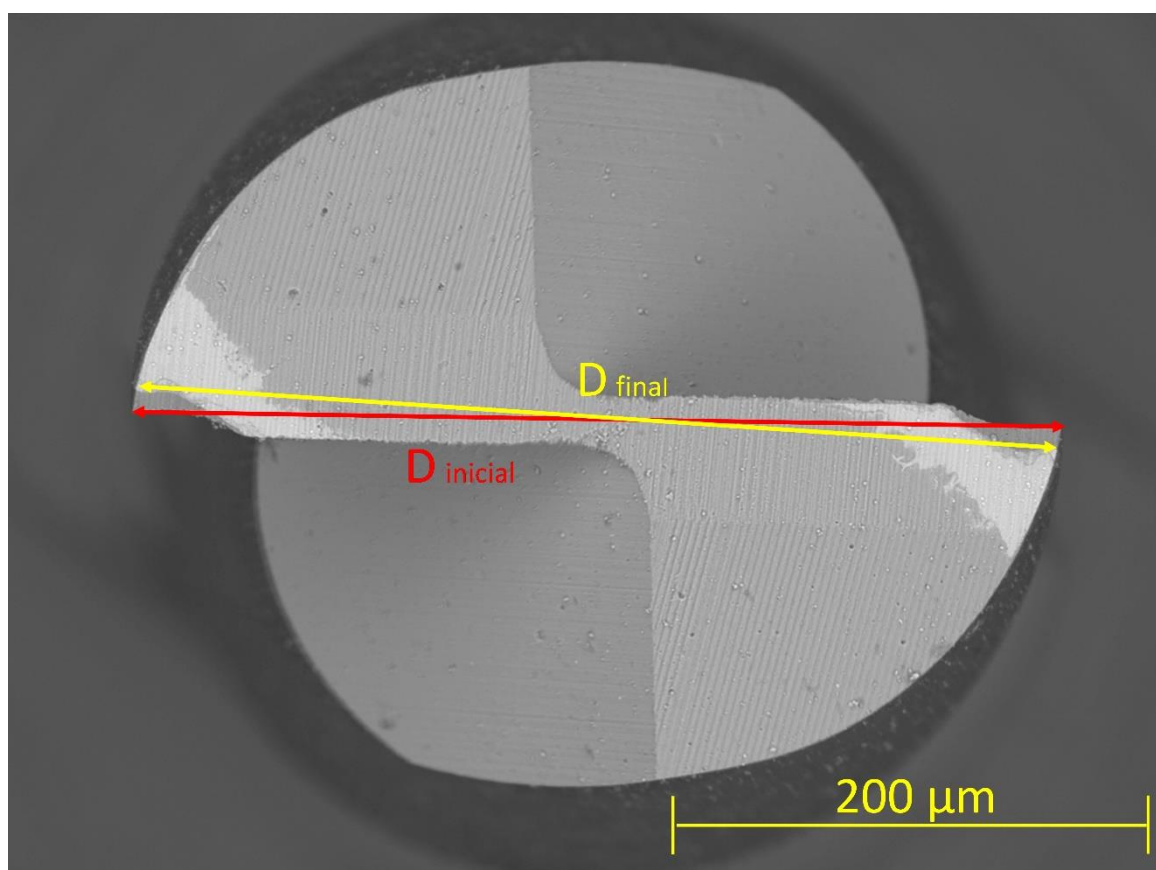


Figura 3.10 - Metodologia de medição desgaste por meio da diferença do diâmetro antes e depois dos ensaios.

Devido à variação de diâmetro entre as ferramentas, o resultado dos valores de desgastes foi expresso em perda percentual, conforme a Equação 3.1.

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{\text{Diâmetro Inicial} - \text{Diâmetro Final}}{\text{Diâmetro Inicial}} \times 100\% \quad (3.1)$$

Foi estimado também o desgaste das ferramentas na aresta secundária de corte. Observou-se que as ferramentas apresentaram um desgaste elevado da aresta secundária de corte e os canais usinados apresentaram variações em sua profundidade, diminuindo ao longo do comprimento de corte. Então, a profundidade dos canais usinados também foi utilizada para avaliar o desgaste das ferramentas. Para isso, foi necessário realizar medições do perfil de cada canal no sentido transversal ao movimento de avanço da ferramenta. A profundidade do canal é a diferença de altura entre a superfície superior do corpo de prova e o fundo do canal. Foram realizadas 10 etapas de medições ao longo de todos os canais, distanciadas de 1 mm entre si e entre as bordas da peça, como ilustrado na Figura 3.11. Ao todo foram realizadas 10 medições por canal, totalizando 90 medições.

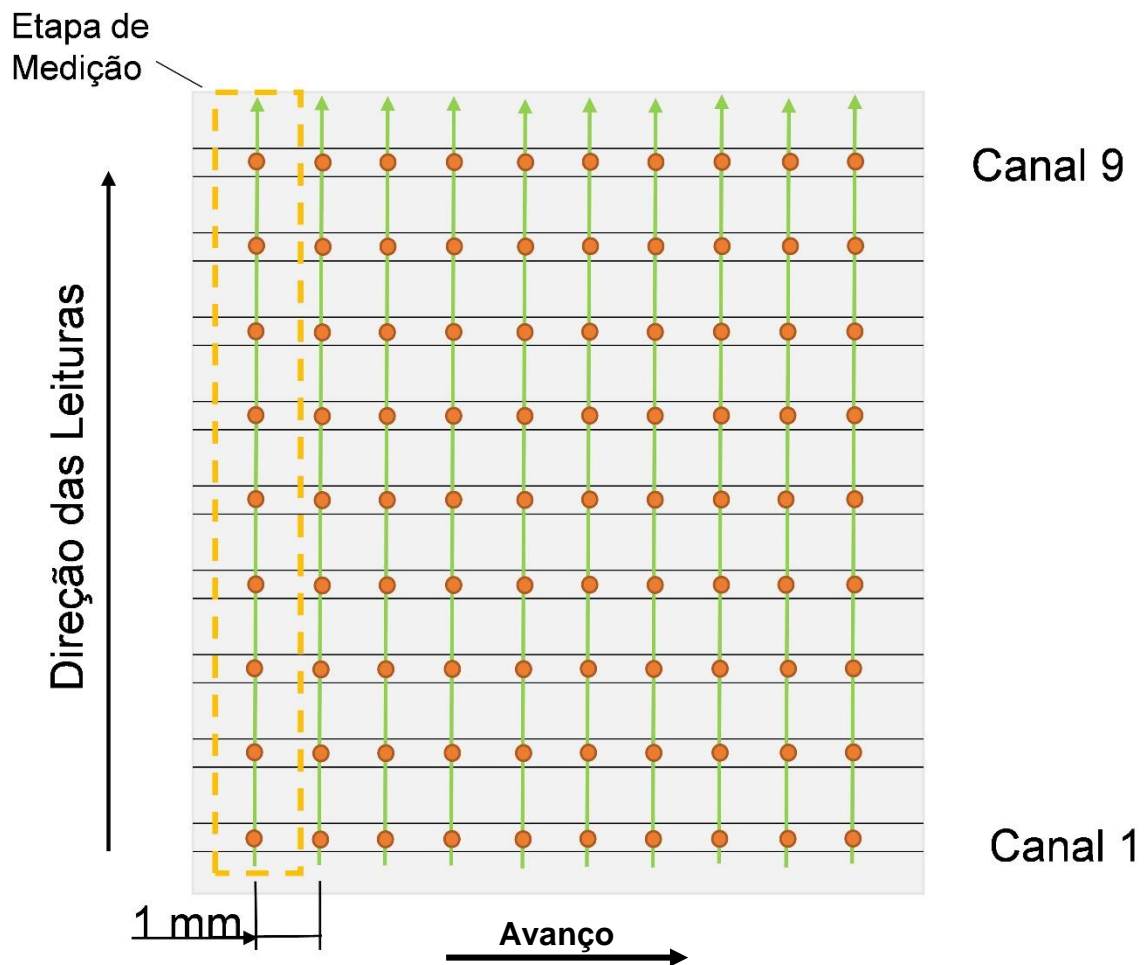


Figura 3.11 - Posicionamento das medições da profundidade dos canais.

Para medição da profundidade utilizou-se o software MountainsLab Premium 9®. Esse software permite que faça um nivelamento do perfil ao qual foi realizada a medição, além de fornecer a diferença de altura média entre as superfícies desejadas. A Figura 3.12 exemplifica o método de medição da profundidade média dos canais usinados em uma etapa de medição. Os picos nas bordas dos canais representam a altura das rebarbas.

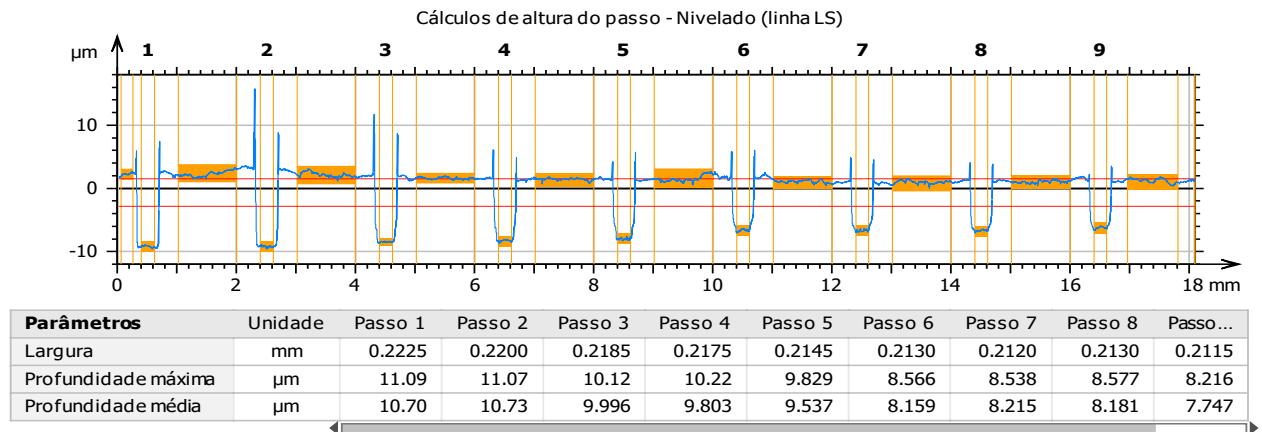


Figura 3.12 - Exemplo da medição da diferença entre a superfície da peça de trabalho e o fundo do canal pelo software MountainsLab Premium 9®.

3.5.2. Rugosidade

Para a medição de rugosidade no fundo dos canais usinados, foi adotado um padrão de 9 medições por canal, sendo 3 medições por região do canal, entrada, meio e saída, com aproximadamente 4 mm cada. A Figura 3.13 ilustra o posicionamento e o sentido das medições de rugosidade.

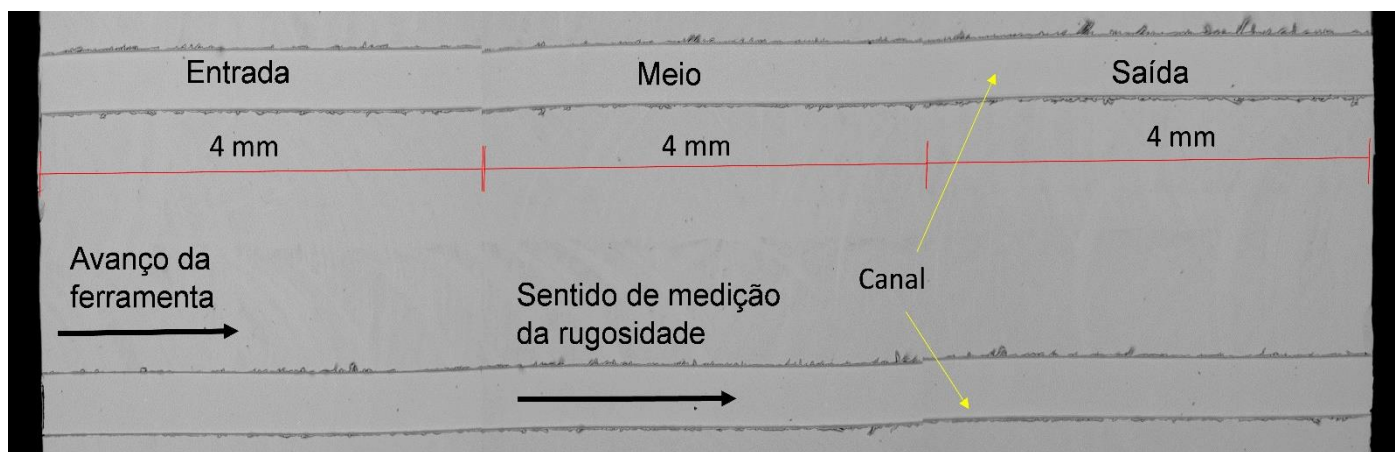


Figura 3.13 – Posicionamento e sentido das medições de rugosidade.

Por se tratar de um parâmetro mais sensível às amplitudes de picos e vales, o parâmetro de rugosidade utilizado neste trabalho foi a rugosidade média quadrática

(Rq), com *cut-off* e comprimento de amostragem iguais a 0,8 e 4 mm, respectivamente.

3.5.3. Superfície Usinada e Formação de Rebarbas

Para estudo da superfície usinada e das rebarbas formadas utilizou-se as imagens geradas no MEV. Foram avaliadas, de maneira qualitativa, as marcas no fundo dos canais, complementando as análises feitas a partir das medições de rugosidade.

Os tipos de rebarbas formadas e local de predominância, possíveis defeitos da usinagem, entre outros também foram avaliadas de maneira qualitativa neste trabalho.

CAPÍTULO IV

RESULTADO E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no microfresamento da liga Inconel 718 em diferentes condições de corte. Os resultados foram divididos em três itens que serão analisados e discutidos na seguinte sequência: análise dos desgastes das microferramentas, análise da rugosidade e análise das superfícies usinadas e rebarbas formadas nos microcanais.

4.1. Análise dos Desgastes das Microferramentas

Nesta seção serão analisados os desgastes das microfresas após usinagem de 108 mm lineares de comprimento. A medição do desgaste foi realizada ao final do ensaio, após o microfresamento de 9 microcanais. Conforme mencionado no capítulo anterior, as análises dos desgastes foram feitas por meio da análise qualitativa das ferramentas, pela variação do diâmetro da microfresa, para a aresta principal de corte, e por meio da profundidade dos canais para a aresta secundária de corte. Nesta seção será realizada também uma análise estatística para verificar se os parâmetros de corte tiveram influência significativa no desgaste, bem como correlacionar os principais parâmetros com os resultados obtido.

São destacadas na Figura 4.1 as principais características encontradas nas microfresas. Dentre os defeitos observados nas microfresas, após o fim de 9 canais ou 108 mm usinados, destacam-se o arredondamento da aresta de corte, a presença de material aderido, principalmente em elevadas profundidades de corte, a perda de coesão do revestimento no substrato e lascamentos.

Defeitos semelhantes foram encontrados por De Oliveira (2019), que observou maior presença de material aderido com o aumento a velocidade de corte, mesmo com aplicação abundante de fluido.

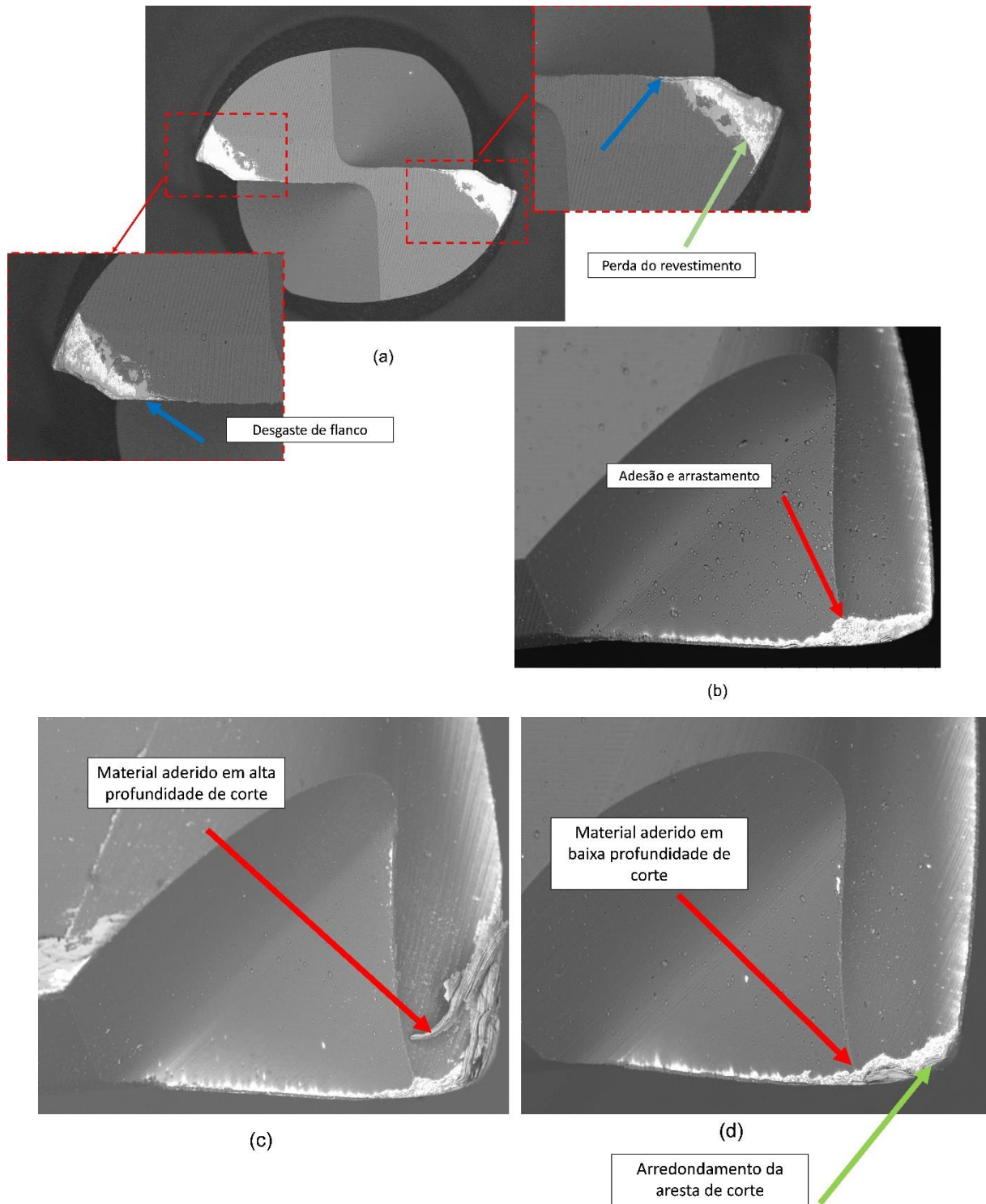


Figura 4.1 - Principais tipos de desgastes encontrados nas microferramentas, onde (a) e (b) $V_c = 50,3$ m/min, $f_z = 10$ $\mu\text{m}/z$ e $a_p = 10$ μm ; (c) $V_c = 12,6$ m/min, $f_z = 5$ $\mu\text{m}/z$ e $a_p = 40$ μm ; e (d) $V_c = 50,3$ m/min, $f_z = 5$ $\mu\text{m}/z$ e $a_p = 10$ μm .

Nos processos de usinagem convencional em escala macro e nas mesmas velocidades utilizadas neste trabalho, material aderido na ferramenta pode ser observado em decorrência da formação de aresta postiça de corte (APC). As velocidades de corte utilizadas, 12,6 m/min e 50,3 m/min, estão na faixa de velocidades baixas e intermediárias, respectivamente, onde espera-se a ocorrência de formação da APC (UCUN et al., 2013; MARQUES, 2015; DE OLIVEIRA, 2019). Nomani et al. (2013), Dos Santos (2016) e De Oliveira (2019) consideraram esse material aderido na microfresa como APC, porém, na usinagem em escala micro não se pode afirmar que o material aderido na ferramenta é APC, uma vez que ainda não há estudos que comprovam sua formação, uma vez que, devido as pequenas dimensões envolvidas nos processos de microusinagem, há uma dificuldade de, por exemplo, se aplicar técnicas para comprovar a formação de APC como a de QuickStop (SANTOS, 2020).

Em todas as condições usinadas, foi observado o desgaste de flanco e evidências do mecanismo de *attrition*, ou “adesão e arrastamento” (HUTCHINGS, 1996), como mostrado na Figura 4.1. Machado et al. (2011) afirmam que o *attrition* acontece, geralmente, em baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. Nesses casos, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface.

Quanto à análise quantitativa dos desgastes, utilizou-se a medição de redução do diâmetro. A Figura 4.2 contém imagens obtidas através do MEV de todas as ferramentas utilizadas, tanto nos testes quanto nas réplicas (quando realizadas), totalizando 10 microfresas. As imagens são da superfície secundária de folga antes e após a usinagem. Para cada condição, as imagens superiores correspondem ao teste e as inferiores à replica. Como mencionado no Capítulo III, para as condições F1 e F2 não foram realizadas réplicas dos ensaios.

É possível observar um desgaste severo das microferramentas em todas as condições usinadas. Observa-se um maior desgaste nas condições F1 e F2, que possuem maior profundidade de corte, 40 μm . Nessas condições, identifica-se um arredondamento e deformação da aresta de corte, conseqüentemente uma alteração

nos raios de ponta e de aresta. Entre as outras condições, não foi possível notar uma diferença significativa do desgaste.

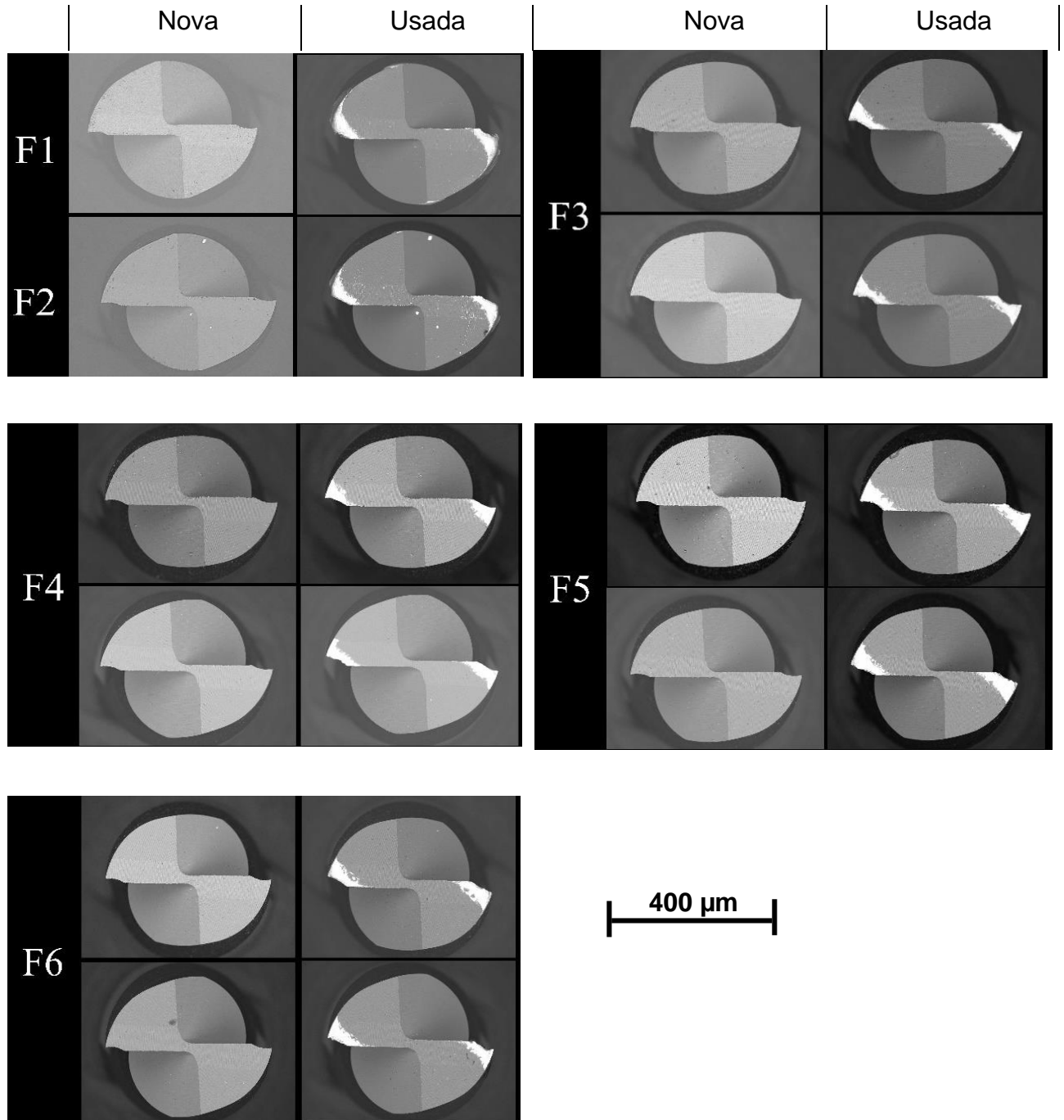


Figura 4.2 - Imagens de topo das ferramentas antes e após a usinagem de 108 mm.

A Figura 4.3 apresenta os resultados quantitativos da perda percentual do diâmetro de cada ferramenta. É possível verificar que as condições F1 e F2 tiveram

maiores reduções percentuais do diâmetro da ferramenta, logo, apresentaram maior desgaste. A redução percentual do diâmetro, desgaste, foi menor em profundidades de corte menores.

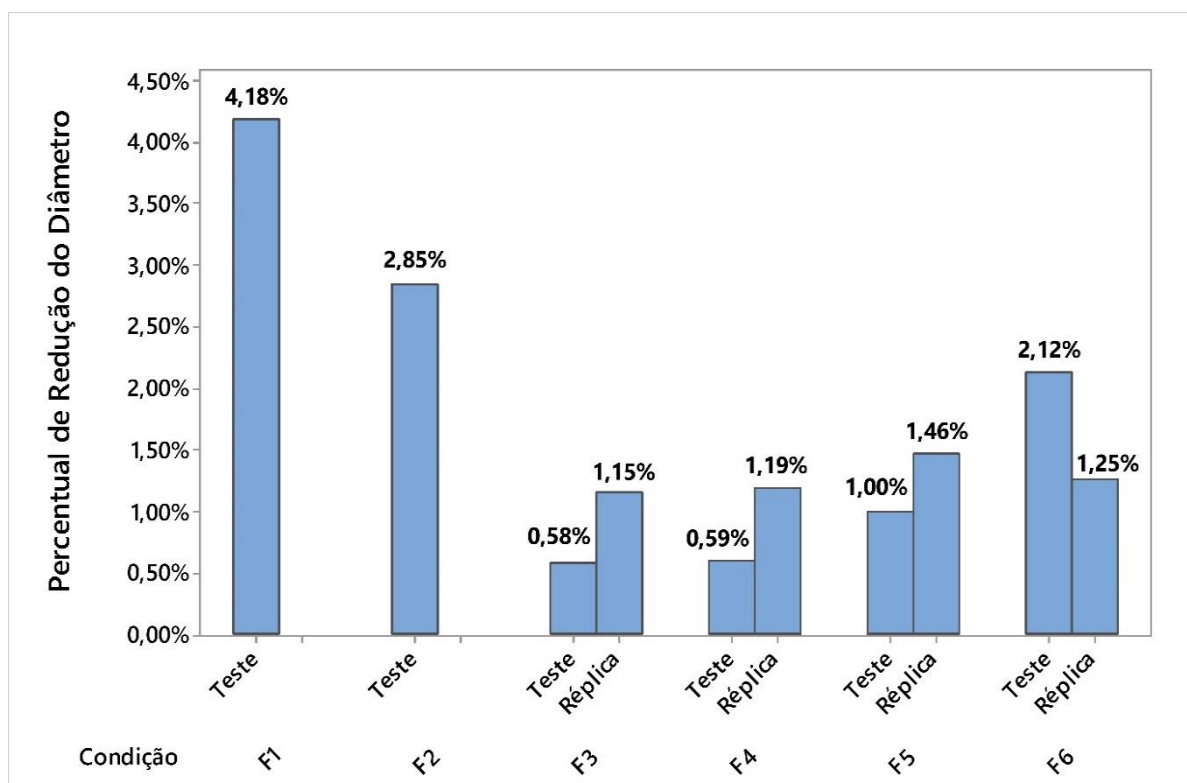


Figura 4.3 - Redução percentual do diâmetro das ferramentas utilizadas nos ensaios.

Em microusinagem ainda não há um critério bem definido de fim de vida da ferramenta. As normas ISO 8688-1 (ISO, 1989) e ISO 8688-2 (ISO, 1989), que são utilizadas em referência ao critério de medição de desgaste de ferramentas para o fresamento em escala macro, não podem ser aplicadas em microusinagem. Assim, é possível encontrar na literatura diferentes critérios. Ziberov et al. (2016) definiram um desgaste de flanco como critério de fim de vida baseado na formação de rebarbas. Dos Santos (2016) e Gomes (2019) propuseram valores de 3% para o critério de fim de vida na medição do desgaste por meio da redução do diâmetro da ferramenta. De acordo com estes dois autores, as ferramentas utilizadas nos testes F3, F4, F5 e F6 não atingiram final de vida.

A fim de confirmar se as variações de parâmetros de corte nos ensaios foram significativas nos resultados de desgaste, foi feita a análise de variância (ANOVA) com intervalo de confiança de 95 %. A Tabela 4.1 apresenta os resultados de significância para cada fator e a interação entre eles.

Tabela 4.1 - Resultados da ANOVA para o desgaste das ferramentas.

Fator	f-valor	p-valor
Velocidade de Corte	10,42	0,033
Avanço por dente	2,89	0,102
Profundidade de Corte	203,31	0,000
Velocidade de Corte * Avanço por dente	2,35	0,138
Velocidade de Corte * Profundidade de Corte	24,02	0,000

Com a análise foi possível verificar que a profundidade de corte e a velocidade de corte são os fatores significativos em relação ao desgaste das ferramentas, apresentando um p-valor abaixo de 0,05.

Outra observação encontrada foi a respeito do comportamento da velocidade de corte em relação a profundidade corte, no qual apresentou um comportamento contrário entre as diferentes profundidades. A Figura 4.4 mostra o comportamento da interação da velocidade e profundidade de corte em relação ao desgaste. Percebe-se que, em menores profundidades, o aumento da velocidade de corte causa um crescimento do desgaste. Já para profundidades maiores, o aumento da velocidade de corte causa um menor do desgaste das ferramentas em comparação à menor velocidade de corte.

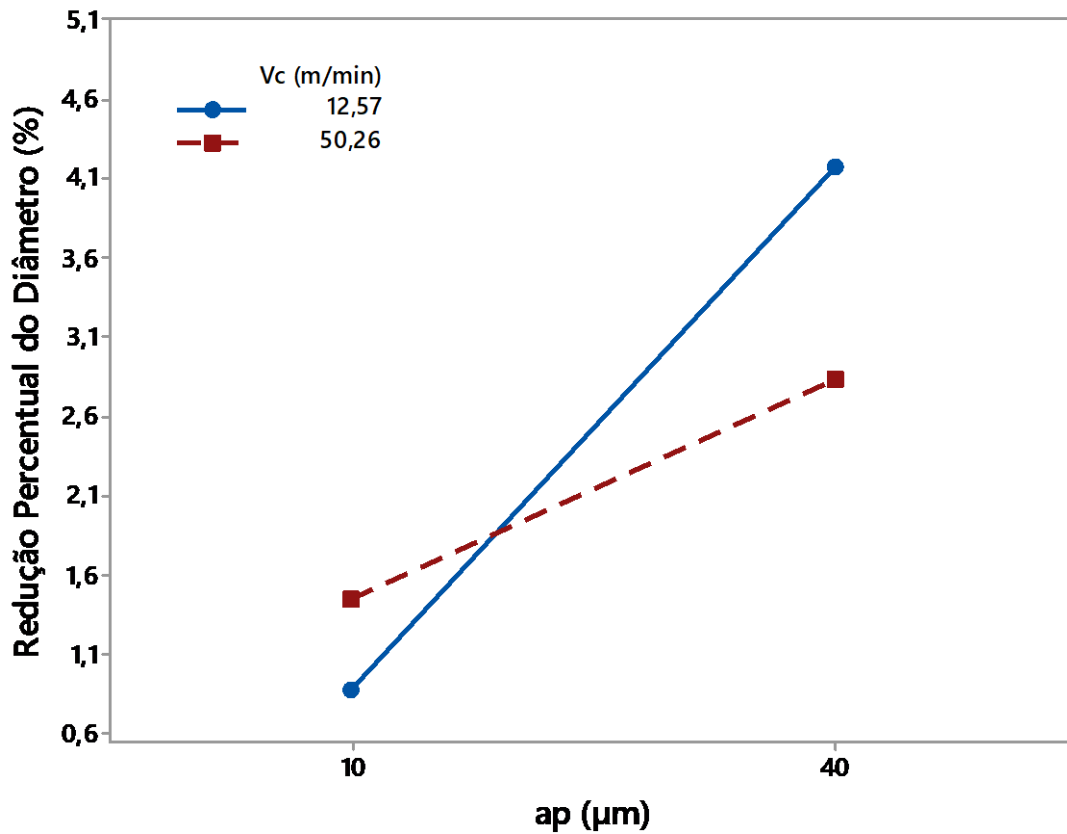


Figura 4.4 - Interação entre os parâmetros de velocidade de corte (v_c) e a profundidade de corte (a_p) em relação ao desgaste das microferramentas.

Já em relação ao avanço por dente, como apresentado na Figura 4.5, não foi possível verificar diferença significativa na redução do diâmetro com o aumento do avanço em baixas velocidade de corte. Entretanto, para velocidades de corte mais elevadas, o aumento do avanço acarreta em maior desgaste, contudo não sendo significativo.

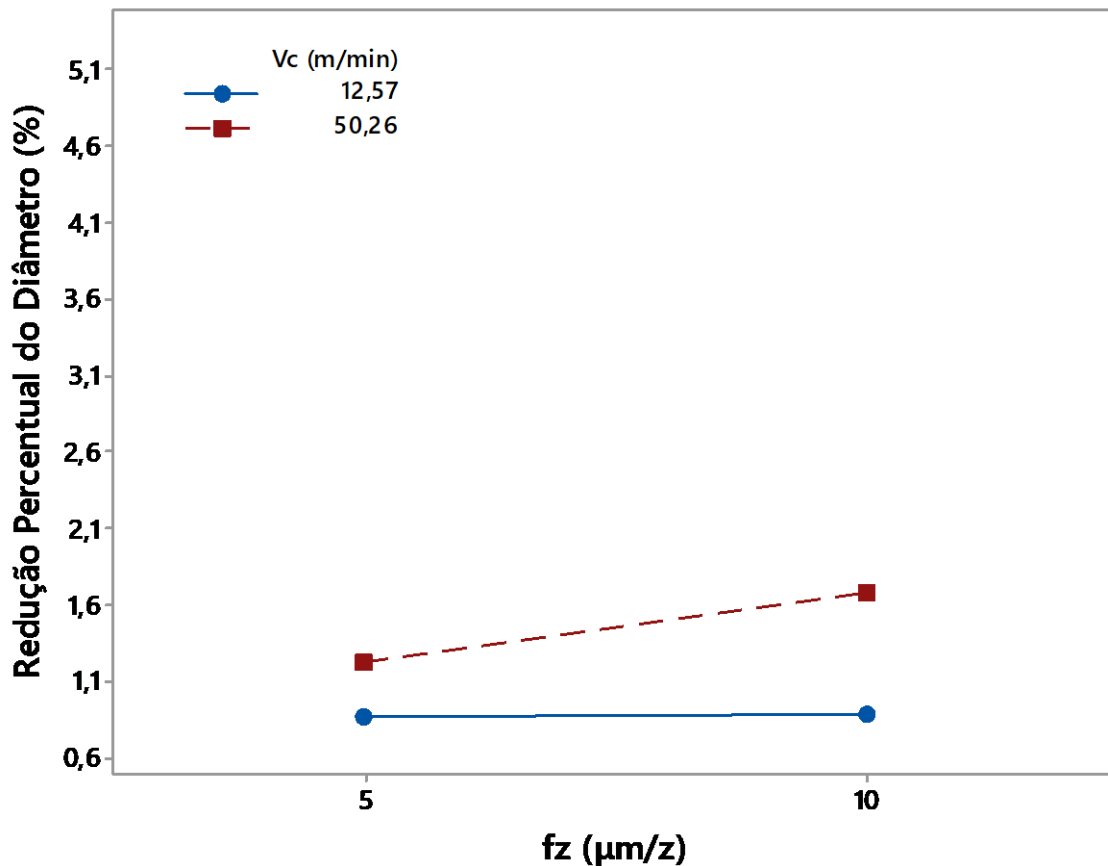


Figura 4.5 - Interação entre os parâmetros de velocidade de corte (V_c) e o avanço por dente (f_z) em relação ao desgaste das microferramentas.

Outra grande dificuldade para medir desgaste na microfresa é a necessidade de utilização de MEV. Poucos trabalhos avaliaram a evolução do desgaste com o comprimento usinado. Ziberov (2018) avaliou o desgaste das ferramentas à cada canal usinado, aproximadamente 4,8 mm, enquanto Silva (2022) realizou a medição do desgaste por 20 mm usinados. Ambos autores buscaram criar a curva de desgaste da ferramenta por comprimento usinado. Outra forma proposta na literatura é avaliar o desgaste pela variação da largura do microcanal De Oliveira (2019). No entanto, esta metodologia exige um interferômetro. Assim, para contribuir com as metodologias de avaliação da evolução do desgaste, foi medido a profundidade dos canais. O objetivo é correlacionar a profundidade dos canais com o desgaste na superfície de folga secundária.

As Figuras 4.6 a 4.9 mostram a variação da profundidade dos canais de acordo com o comprimento usinado para cada condição de corte. Vale ressaltar que para as condições F1 e F2, as de maiores profundidades de corte, não foi possível a coleta dos dados, uma vez que a grande presença de rebarbas impossibilitou a aquisição de forma correta dos valores. A diferença entre a profundidade medida e a profundidade nominal é considerada aqui o desgaste da microfresa. Assim, nos gráficos é plotado o desgaste em função com comprimento usinado. Foram realizadas 10 medições em cada canal

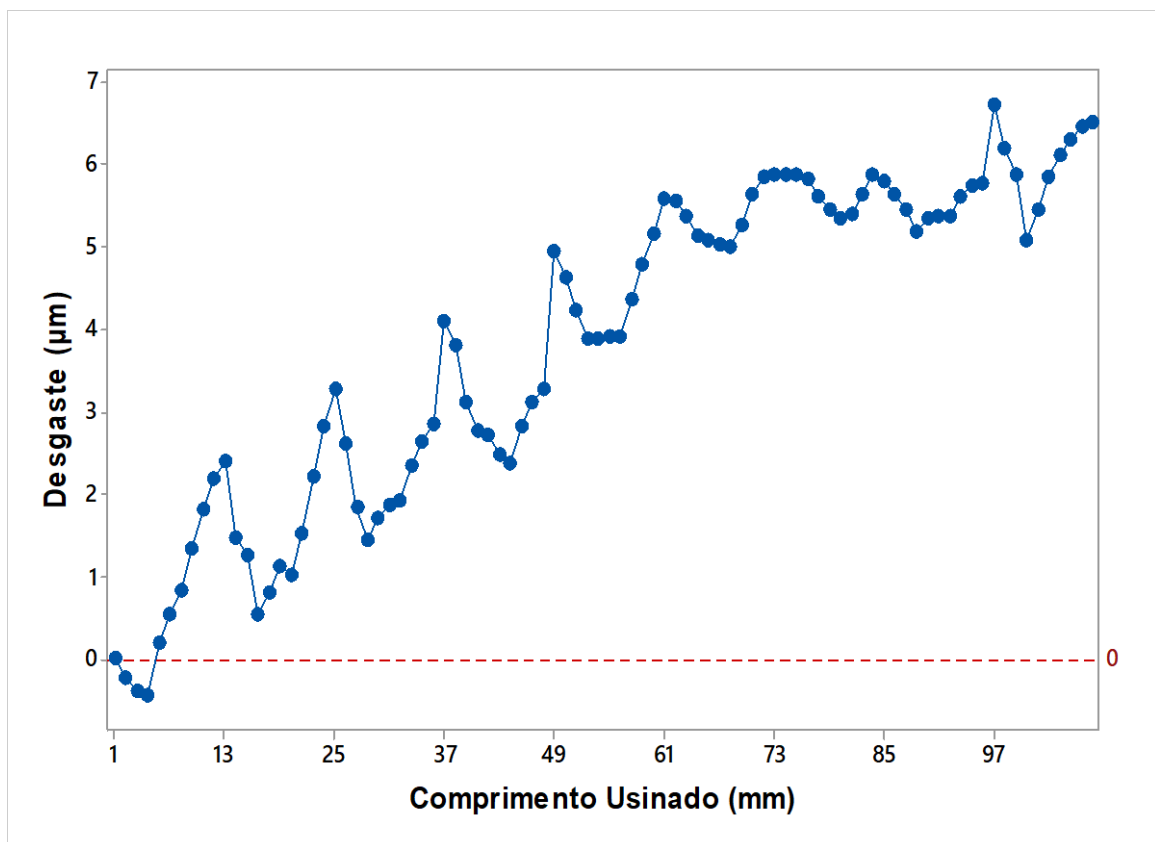


Figura 4.6 - Desgaste da aresta secundária na condição F3 ($v_c = 12,6$ m/min, $f_z = 5$ µm/z e $a_p = 10$ µm)

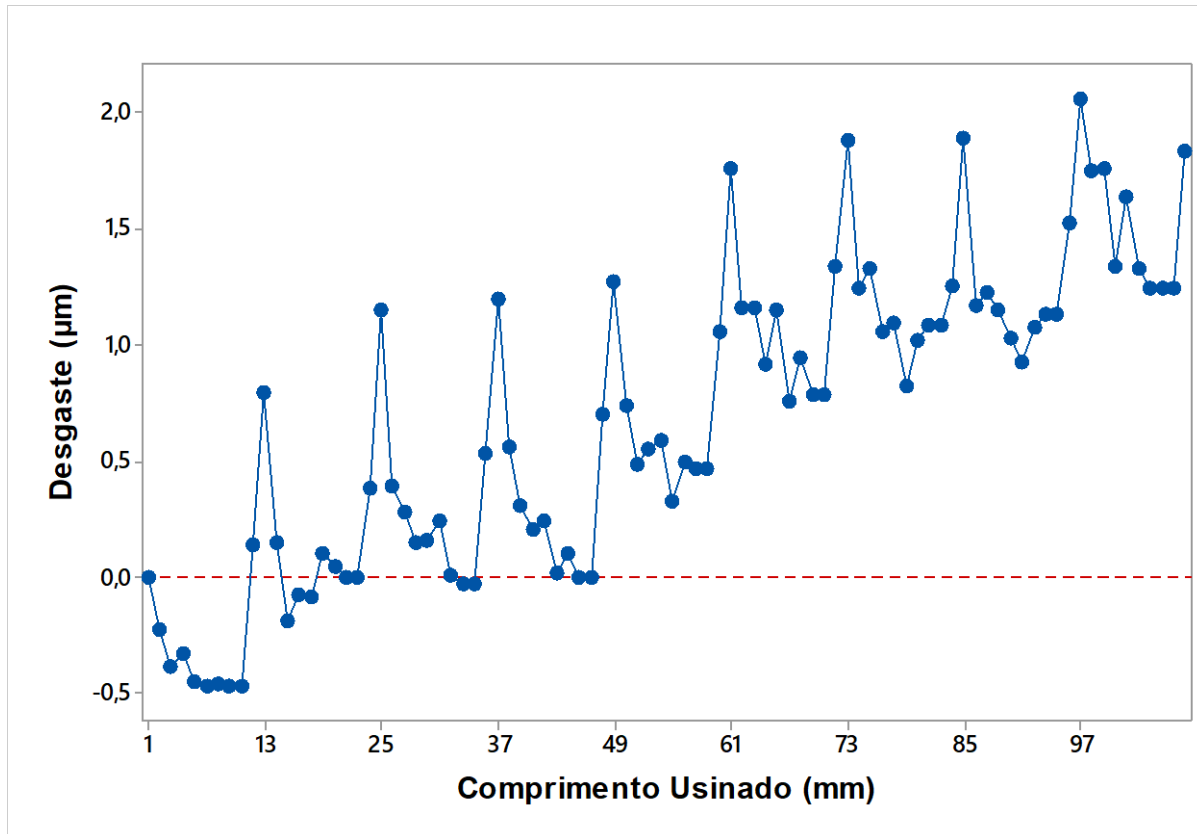


Figura 4.7 - Desgaste da aresta secundária na condição F4 ($v_c = 12,6$ m/min, $f_z = 10$ µm/z e $a_p = 10$ µm)

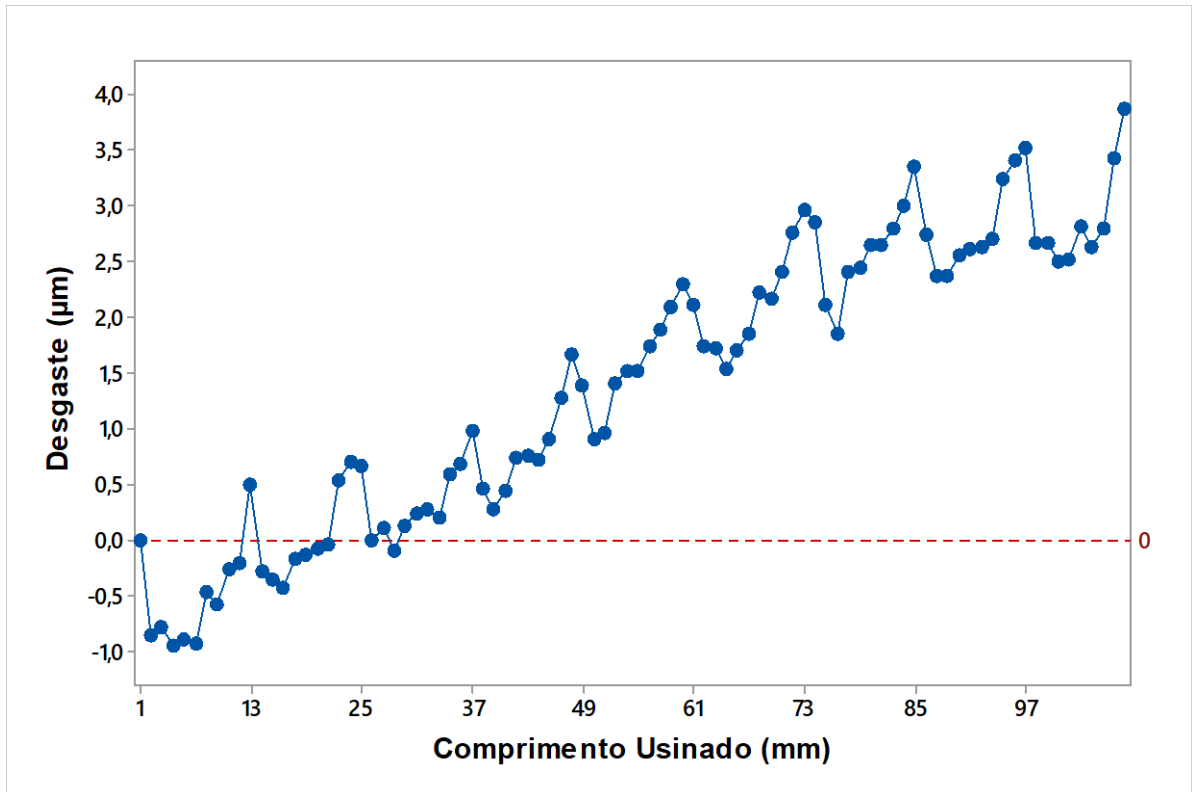


Figura 4.8 - Desgaste da aresta secundária na condição F5 ($v_c = 50,3$ m/min, $f_z = 5$ $\mu\text{m}/z$ e $a_p = 10$ μm)

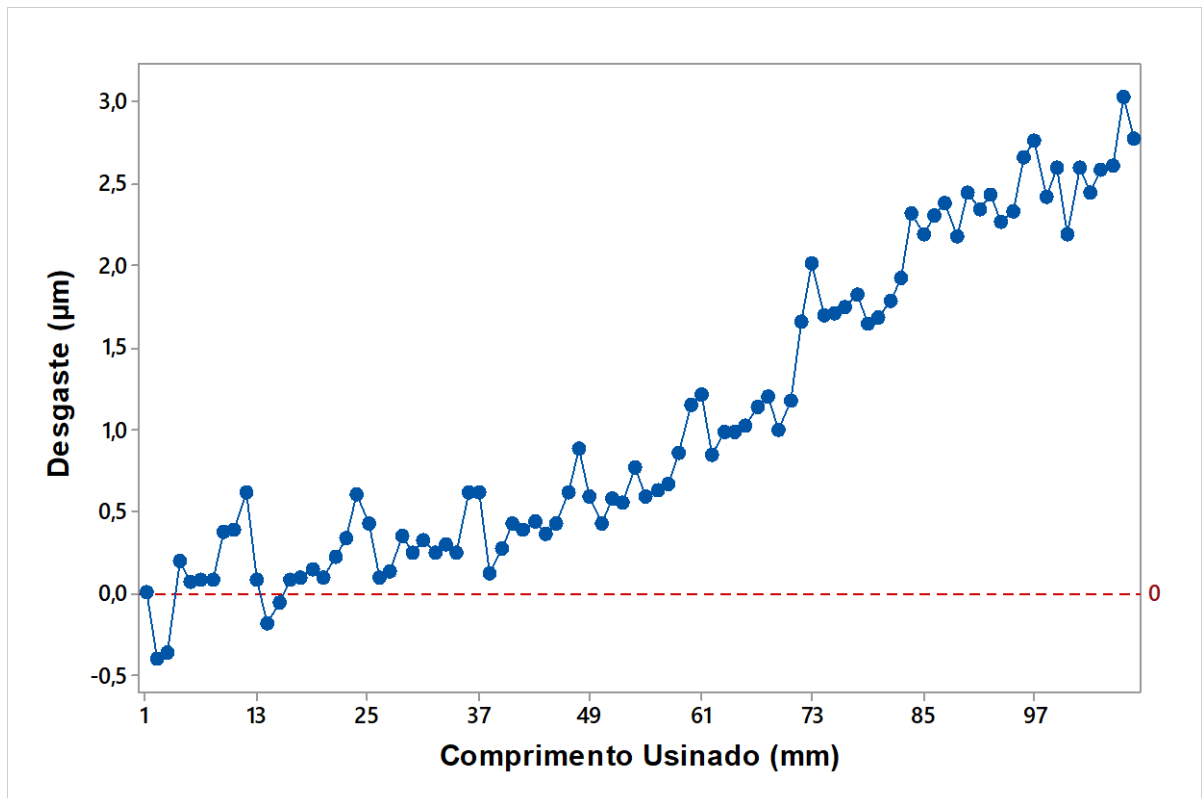


Figura 4.9 - Desgaste da aresta secundária na condição F6 ($v_c = 50,3$ m/min, $f_z = 10$ $\mu\text{m}/z$ e $a_p = 10$ μm)

Os picos nas curvas representam a saída de cada canal. Assim, as curvas sugerem uma pequena variação na profundidade de corte para cada canal. Como parece ser uma variação uniforme, isso pode ser um pequeno erro de perpendicularidade entre a superfície da peça e a ferramenta, ou um erro de inclinação da base da máquina ferramenta. Apesar de uma variação pequena, cerca de $1,0$ μm , estes resultados mostraram a necessidade de uma avaliação de erros geométricos na máquina ferramenta. No entanto, isso será feito após este trabalho. Além disso, como os valores são pequenos, poderia ser também o indício de APC, o que aumentaria da profundidade do canal (desgaste negativo).

Algumas ferramentas apresentaram material aderido após a usinagem dos 9 canais, porém, com a impossibilidade de ensaios mais conclusivos, não é possível afirmar se esse aumento da profundidade em algumas regiões dos canais é decorrente de material aderido, formação de APC ou apenas erro da máquina

ferramenta, já que para valores da ordem de 10 μm qualquer fonte de erro pode gerar influência significativa nos canais usinados. As discussões a seguir levam em conta a variação média da profundidade dos canais, sem levar em consideração as hipóteses levantadas neste parágrafo.

Pela análise dos gráficos nota-se que as condições com menores valores de avanço por dente apresentaram maiores desgastes da aresta secundária de corte. Esse desgaste pode estar relacionado com o atrito do contato entre a aresta secundária e a superfície encruada do material.

Analisando os valores de redução do diâmetro e profundidade dos canais é possível notar que os ensaios realizados na condição F4 ($v_c = 12,6$ m/min, $f_z = 10$ $\mu\text{m}/z$, $a_p = 10$ μm) apresentaram os melhores resultados em relação ao desgaste da ferramenta, ou seja, menor perda percentual do diâmetro e menor redução do canal usinado.

4.2. Análise da Rugosidade

Nesta seção serão apresentados os resultados de rugosidade da superfície microfresada em relação ao comprimento usinado. A rugosidade foi medida em três regiões de 4 mm em cada canal. O parâmetro utilizado para as análises neste trabalho foi a Rugosidade Média Quadrática (R_q), por ser um parâmetro mais sensível às amplitudes de picos e vales. Serão apresentadas também análises estatísticas para atestar se a variação dos parâmetros de corte foi significativa para variação da rugosidade da superfície usinada.

As Figuras 4.10 a 4.15 contêm os resultados das medições de rugosidade por comprimento usinado para cada parâmetro de corte utilizado.

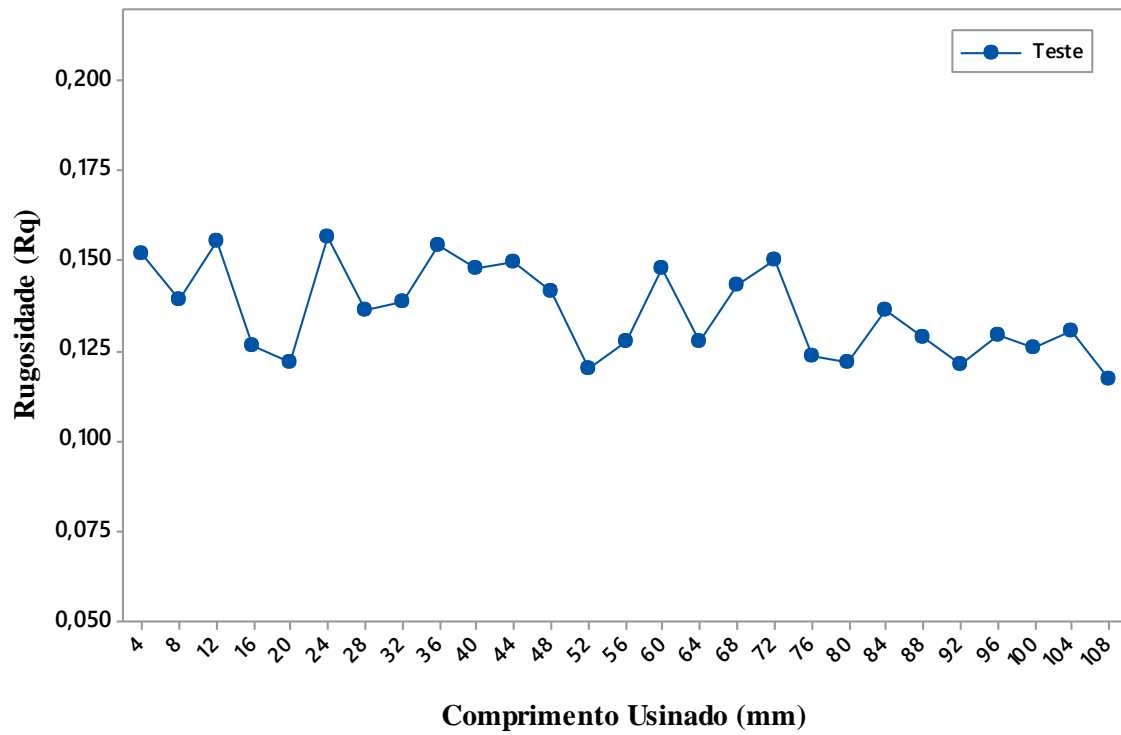


Figura 4.10 - Rugosidade Rq por comprimento usinado da condição F1 ($v_c = 12,6$ m/min, $f_z = 5 \mu\text{m/z}$ e $a_p = 40 \mu\text{m}$).

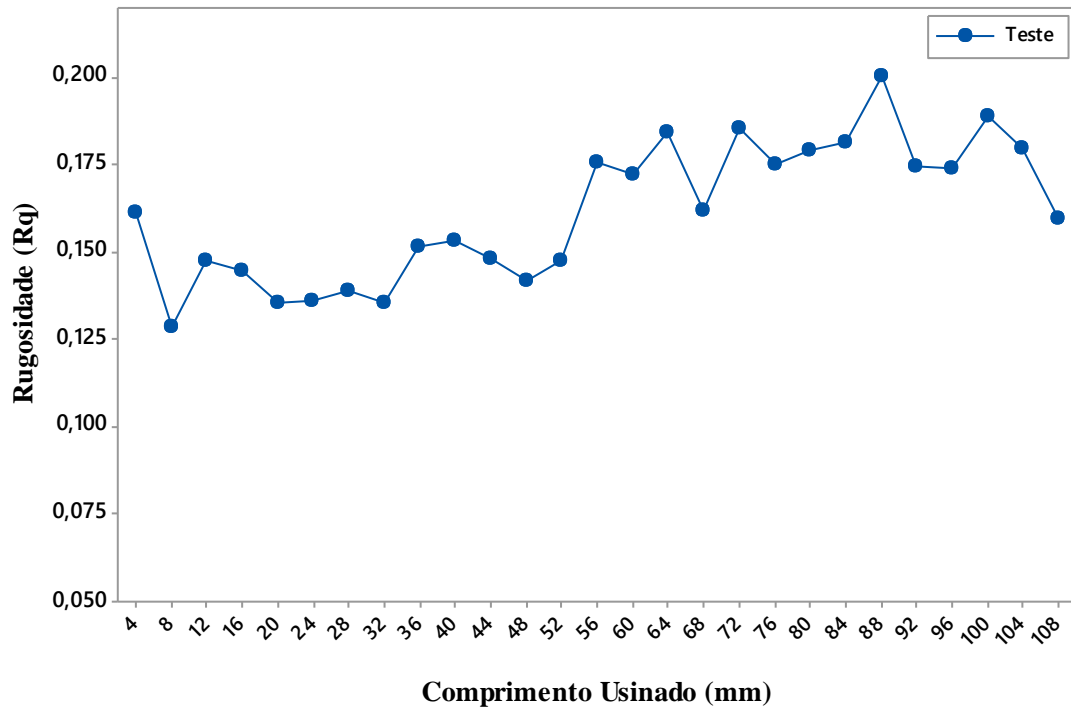


Figura 4.11 - Rugosidade Rq por comprimento usinado da condição F2 ($v_c = 50,3$ m/min, $f_z = 5 \mu\text{m/z}$ e $a_p = 40 \mu\text{m}$).

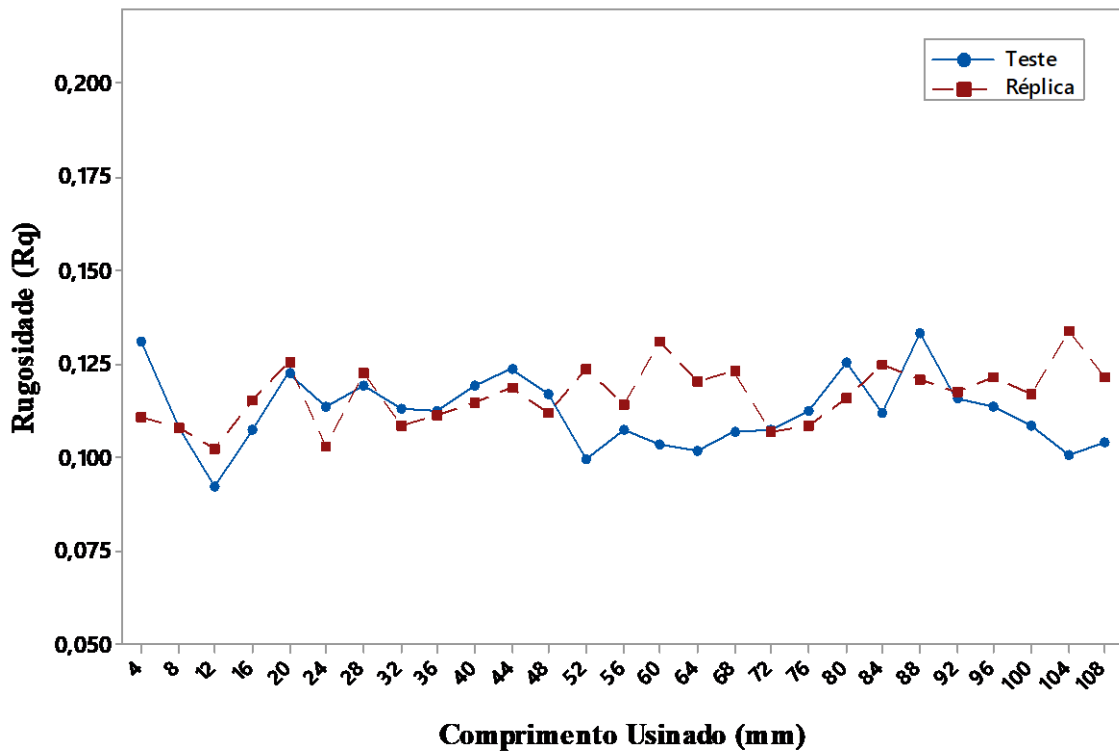


Figura 4.12 - Rugosidade Rq por comprimento usinado da condição F3 ($v_c = 12,6$ m/min, $f_z = 5 \mu\text{m/z}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$)

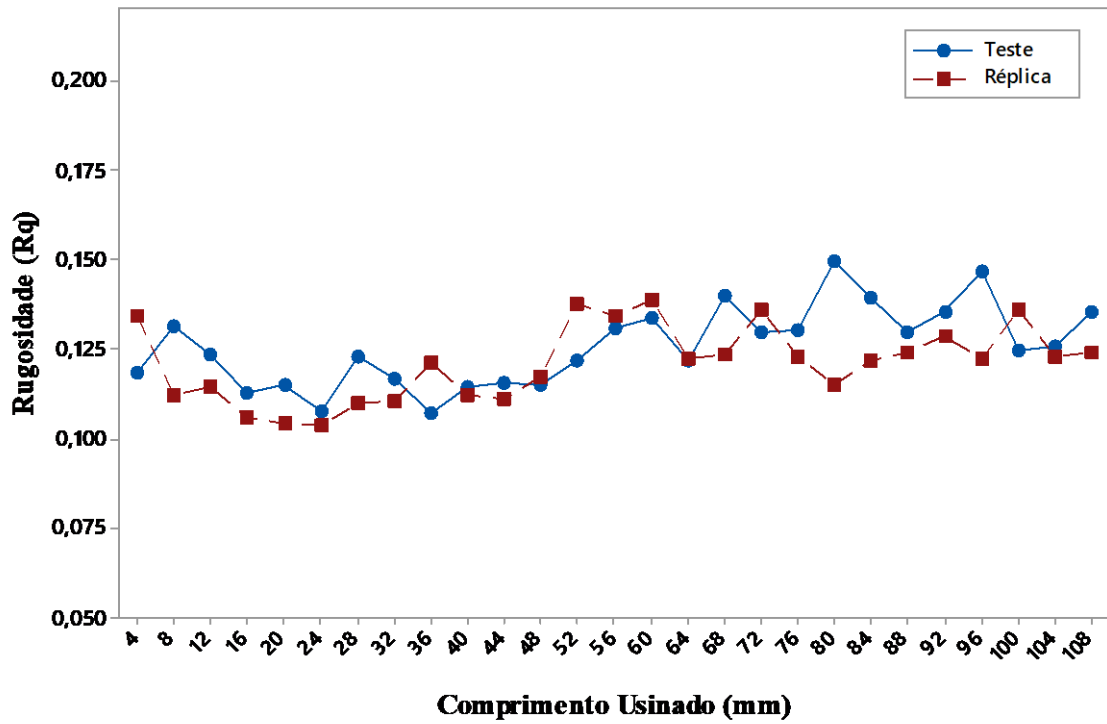


Figura 4.13 - Rugosidade Rq por comprimento usinado da condição F4 ($v_c = 12,6$ m/min, $f_z = 10 \mu\text{m/z}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$)

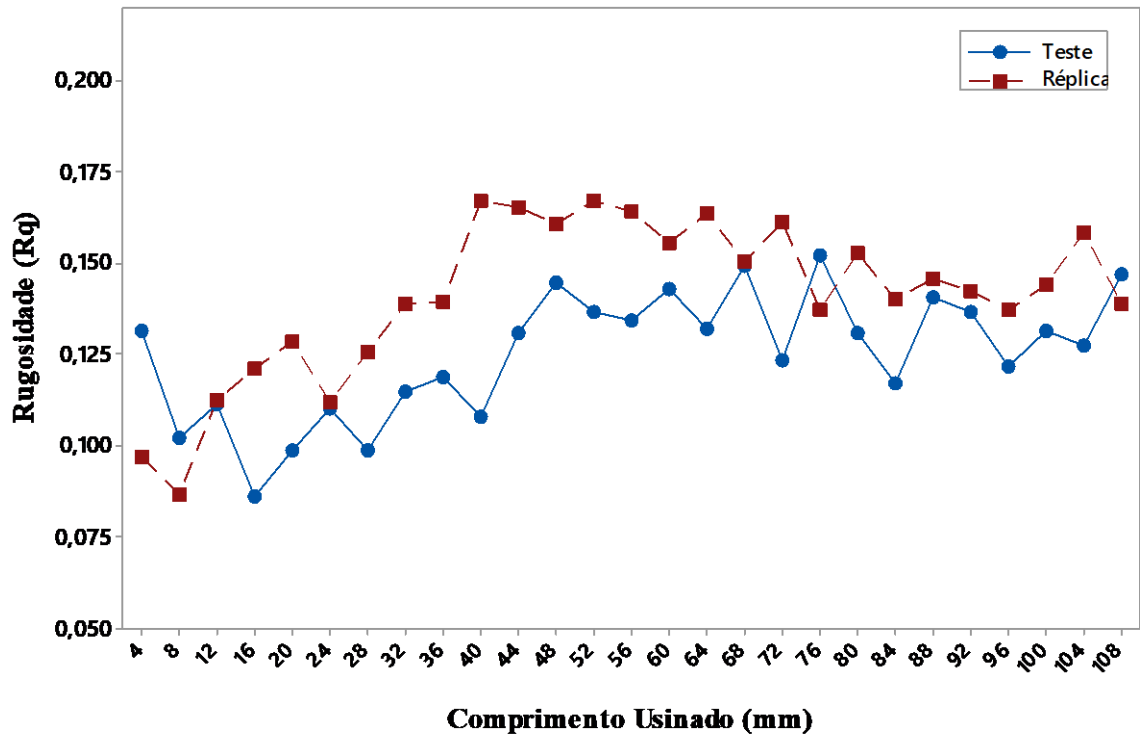


Figura 4.14 - Rugosidade Rq por comprimento usinado da condição F5 ($v_c = 50,3$ m/min, $f_z = 5 \mu\text{m/z}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$)

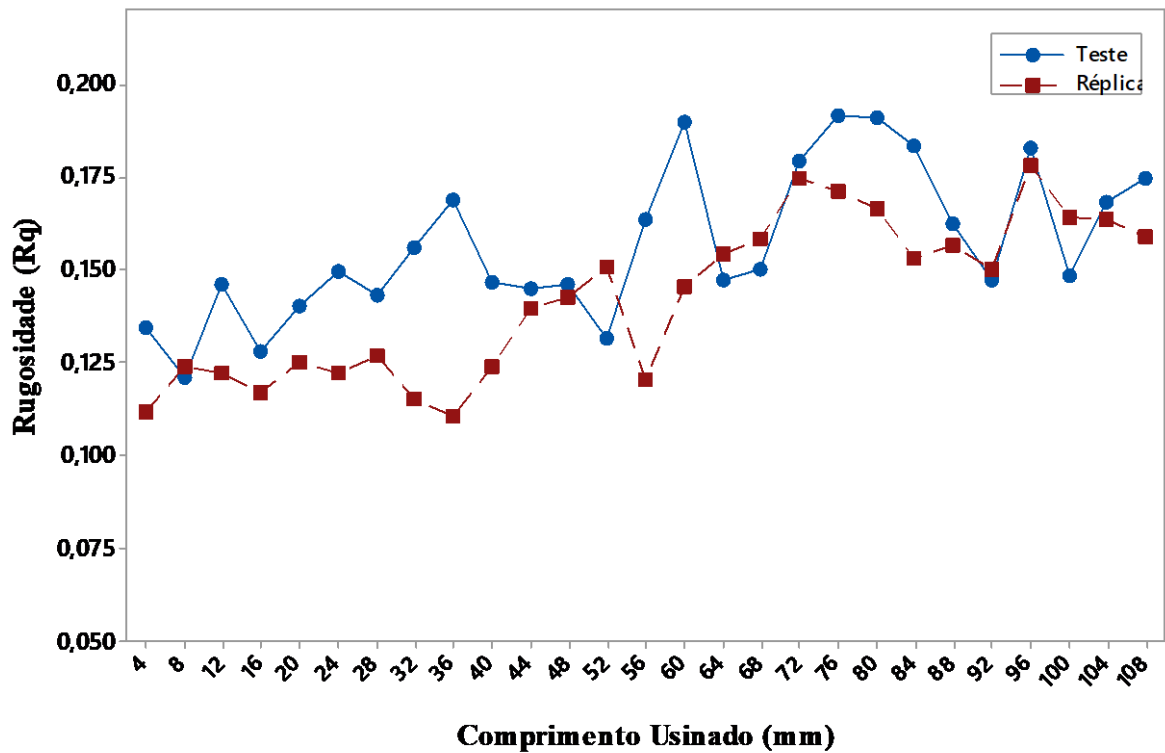


Figura 4.15 - Rugosidade Rq por comprimento usinado da condição F6 ($V_c = 50,3$ m/min, $f_z = 10 \mu\text{m/z}$ e $a_p = 10 \mu\text{m}$)

Com os gráficos é possível observar que os valores de rugosidade ao longo do comprimento usinado variou entre $0,1 \mu\text{m}$ e $0,2 \mu\text{m}$, com tendência de crescimento nas condições de maiores velocidades de corte. Logo, não foi possível certificar se a modificação dos parâmetros usinagem apresentou variações significativas nos valores de rugosidade.

Para atestar a variação nos valores obtidos, foi necessário utilizar recursos estatísticos para avaliar a influência de cada parâmetro de corte nos resultados. Desta forma, foram realizadas análises de variância para os valores de rugosidade. A Tabela 4.2 contém os valores obtidos após a análise estatística.

Tabela 4.2 - Resultados da ANOVA para a rugosidade da superfície usinada.

Fator	f-valor	p-valor
Velocidade de Corte	257,71	0,000
Avanço por dente	1,32	0,054
Profundidade de Corte	237,80	0,000
Velocidade de Corte * Avanço por dente	8,31	0,034
Velocidade de Corte * Profundidade de Corte	89,96	0,000

A partir da análise nota-se que, para uma confiança de 95%, isto é, $p < 0,05$, apenas a velocidade e a profundidade de corte apresentaram influência significativa no parâmetro de rugosidade R_q .

Para que seja feita uma análise gráfica, as Figuras 4.16 e 4.17 mostram a interação desses fatores em relação à rugosidade.

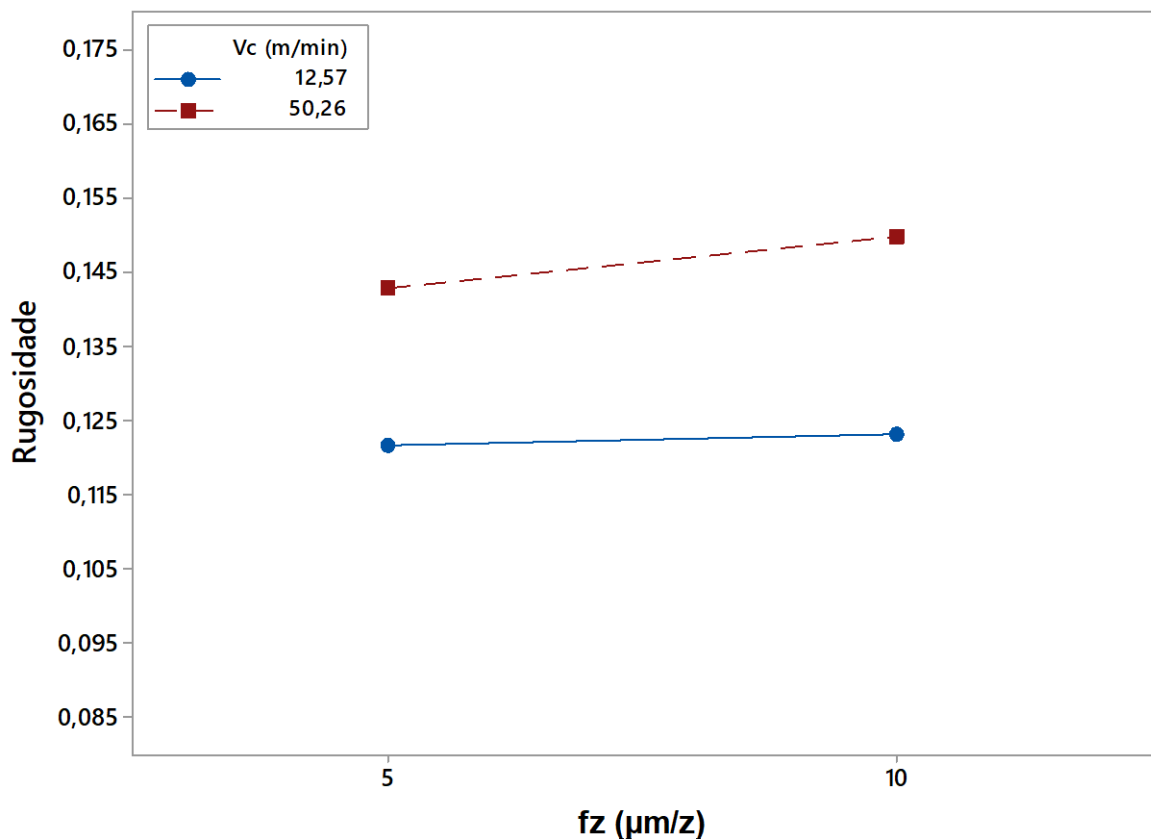


Figura 4.16 - Interação entre os parâmetros de velocidade de corte (V_c) e o avanço por dente (f_z) na rugosidade dos canais usinados.

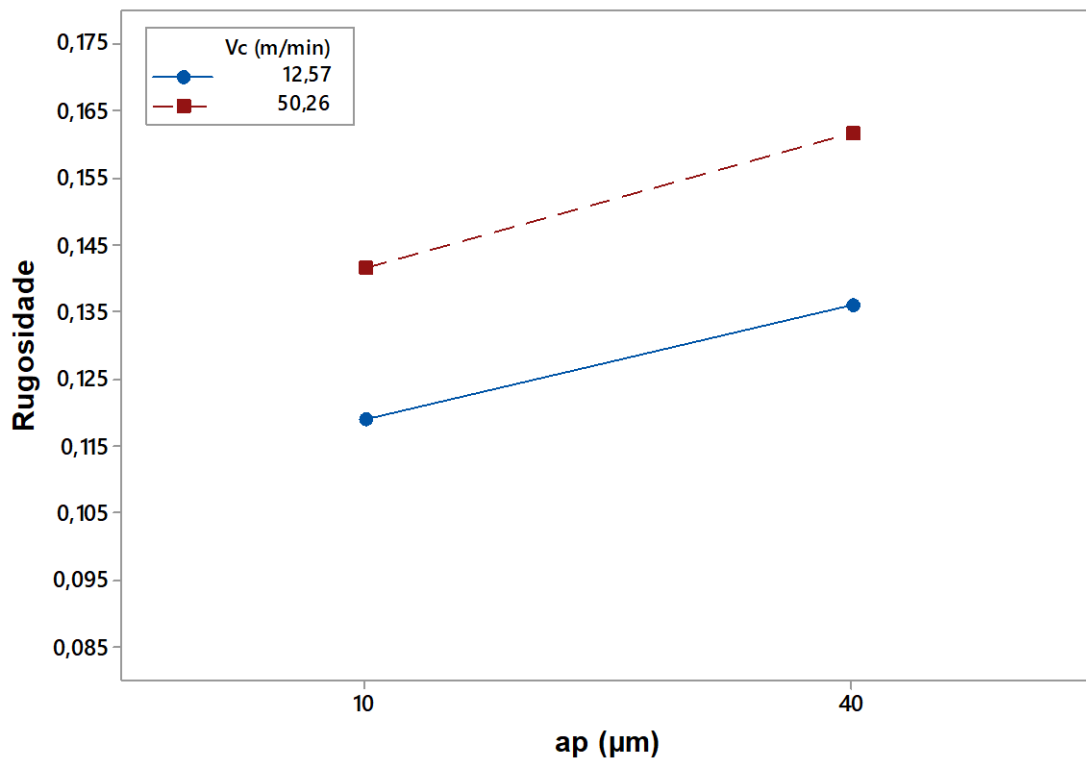


Figura 4.17 - Interação entre os parâmetros de velocidade de corte (V_c) e a profundidade de corte (a_p) na rugosidade dos canais usinados.

Analisando o gráfico da Figura 4.16 verifica-se que com o aumento da velocidade de corte para um mesmo valor de avanço, há um crescimento na média dos valores de rugosidade. Em geral, espera-se que a rugosidade diminua com o aumento da velocidade de corte. No entanto, mesmo para a maior velocidade de corte utilizada, ainda se espera a formação de APC. Este resultado está de acordo com alguns resultados da literatura, utilizando a mesma máquina ferramenta. Gomes et al. (2020) realizaram o microfresamento do aço inoxidável 316L convencional. Os autores observaram que a rugosidade média (R_a) aumentou com o aumento da velocidade de corte, e associaram esse comportamento a presença de material aderido à superfície usinada. Como comparação para o mesmo material, Mian et al. (2011) realizaram o microfresamento da liga Inconel 718 com microfresa de 500 μm de diâmetro revestidas com TiNAl. Os autores observaram que com o aumento da velocidade de

corte, bem como da razão entre o avanço por dente e o raio de ponta (fz/re), houve um aumento da rugosidade superficial.

Entretanto, analisando uma mesma velocidade de corte, o aumento do avanço por dente, de 5 $\mu\text{m}/z$ para 10 $\mu\text{m}/z$, não significou aumento da rugosidade, conforme a análise estatística.

O avanço por dente, mesmo não apresentando uma influência significativa nos resultados, nota-se, na Figura 4.16, que há um pequeno aumento da rugosidade com o aumento dos valores de avanço para maiores velocidades de corte. Este resultado pode parecer normal numa comparação com a usinagem convencional. No entanto, a influência do avanço depende um pouco da relação com o raio de ponta de aresta. Por exemplo, Uzun et al. (2015) observaram um aumento da rugosidade com a diminuição do avanço por dente no microfresamento da liga Inconel 718. Os autores atribuíram esse aumento à formação de aresta postiça de corte em baixas velocidades de avanço.

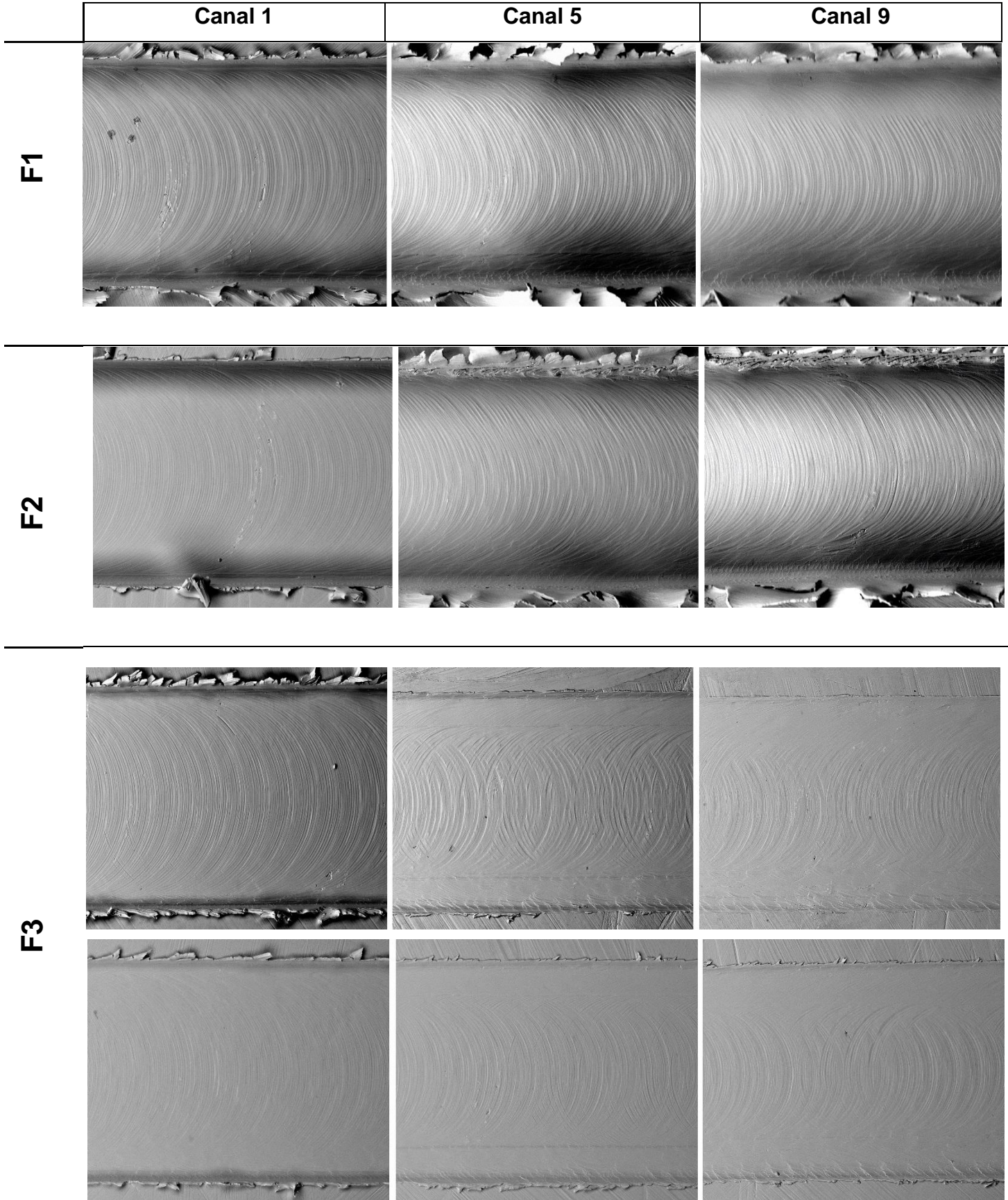
Já na Figura 4.17 verifica-se que o aumento nos valores de ambos parâmetros, velocidade e profundidade de corte, implica no crescimento da rugosidade da superfície usinada.

O presente trabalho apresentou resultado divergente em relação a alguns encontrados na literatura, o que leva a uma possibilidade de em trabalhos futuros ser feita uma análise mais profunda em relação ao efeito do avanço por dente no processo de microfresamento da liga, bem como uma maior interação com os demais parâmetros de usinagem.

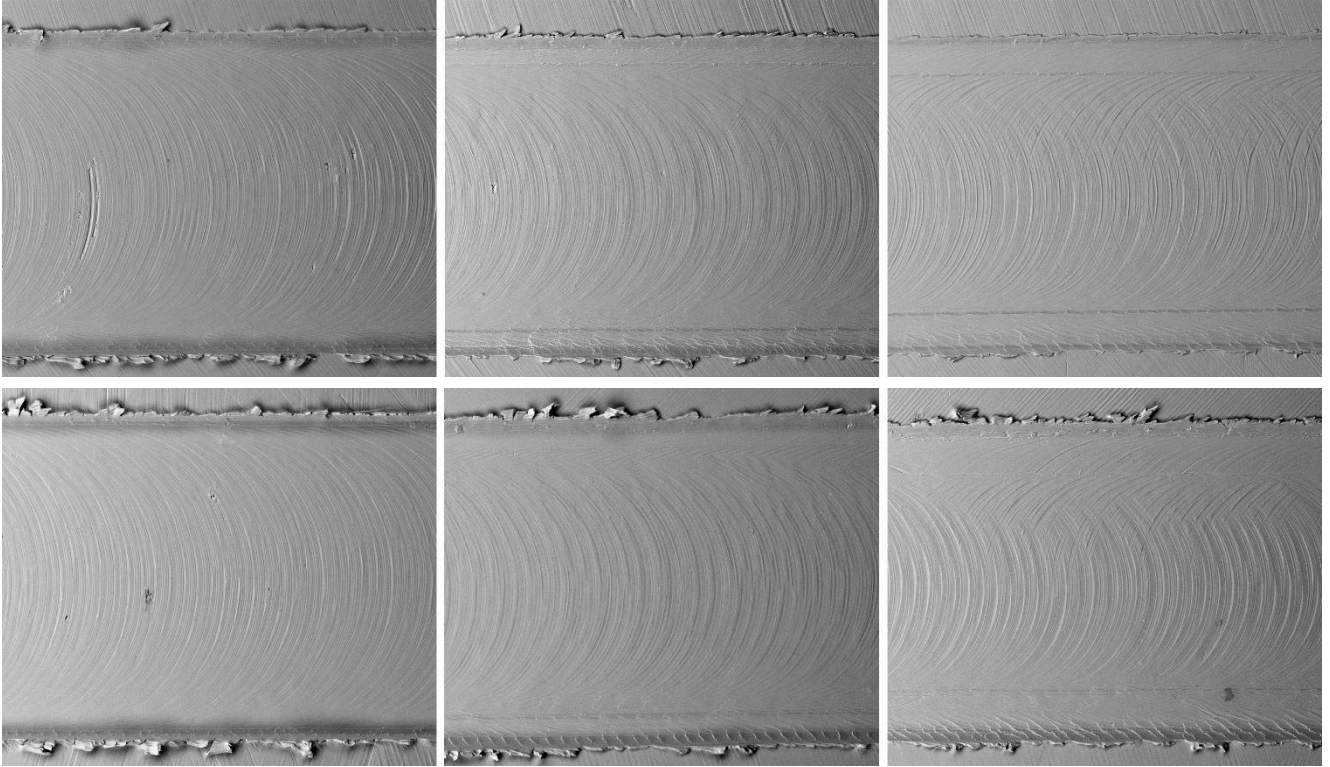
4.3. Análise das Rebarbas e da Superfície Usinada

Esta seção contém uma análise qualitativa da superfície usinada. Foram feitas análises visuais da quantidade e dos tipos de rebarbas presentes em cada condição de usinagem, além de uma análise das marcas de avanço presentes no fundo de cada canal para corroborar o estudo da rugosidade. Essa análise foi realizada por meio de imagens obtidas no MEV.

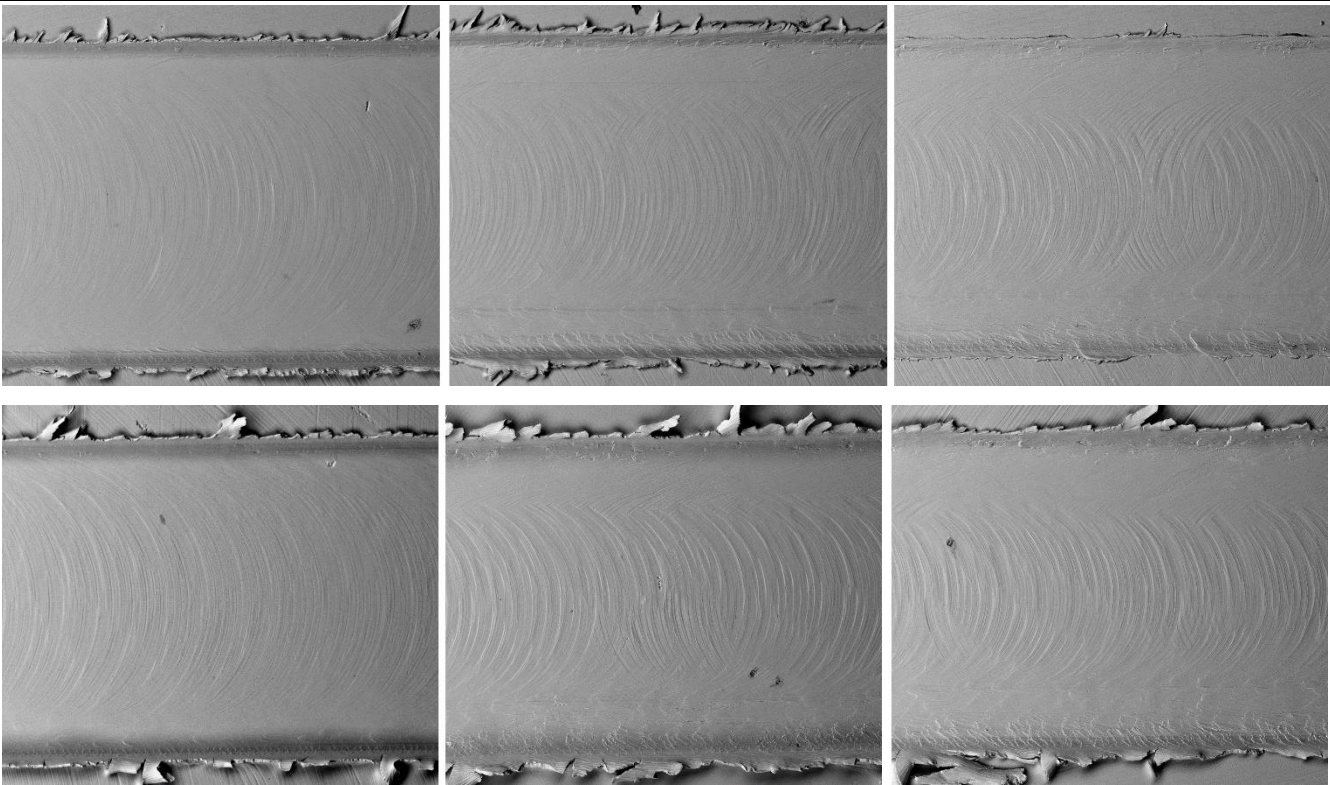
A Figura 4.18 contém as imagens dos canais 1, 5 e 9 em cada condição de usinagem, considerando os testes e as réplicas. Elas correspondem à posição intermediária dos canais, ou seja, aproximadamente 6 mm da borda de cada canal.



F4



F5



F6

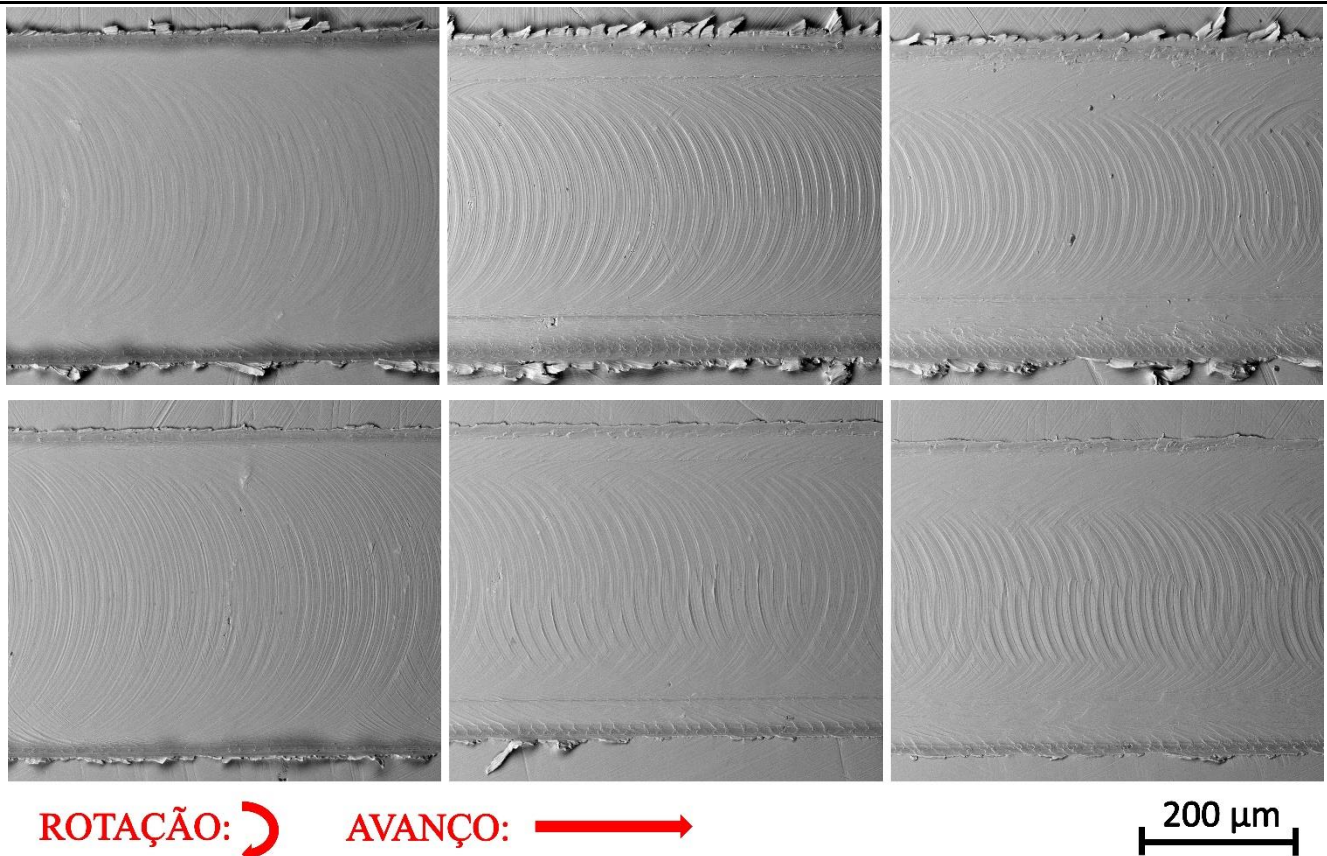


Figura 4.18 - Imagens obtidas por MEV da superfície dos canais 1, 5 e 9 em cada condição de usinagem.

Observando as imagens da Figura 4.18 pode-se verificar que as condições F1 e F2, as quais possuíam profundidade de corte de 40 μm , apresentaram maiores rebarbas em comparação às outras condições de usinagem. Resultado semelhante foi encontrado por Chen et al. (2020). Essa maior formação de rebarbas deve-se ao fato de que quando a profundidade de corte aumenta, a quantidade de material a ser deslocado pela aresta de corte também aumenta proporcionalmente, o que restringe a possibilidade de o material fluir na direção da superfície de saída, resultando num fluxo lateral de material e perpendicular ao corte (OLVERA; BARROW, 1996).

Para os testes com menores profundidades de corte não foi possível observar diferenças quanto à formação de rebarbas entre as diferentes condições de usinagem. Porém, nota-se que houve uma diminuição drástica no volume de rebarbas ao longo do comprimento de usinagem quando comparado com os testes utilizando profundidade de corte de 40 μm . A quantidade ou o tamanho de rebarbas formadas

aumentou com o comprimento de corte, pois é muito influenciada pelo desgaste da ferramenta. Wang et al. (2019) também observaram variações na quantidade de rebarbas formadas com o aumento do comprimento de corte, ao avaliar o microfresamento de liga de titânio Ti-6Al-4V. Com isso percebe-se que quantidade de rebarba pode sofrer variações devido ao desgaste da ferramenta, além dos vários mecanismos de remoção de material atuantes durante o processo e das diferentes propriedades da liga, composta por matriz austenítica com a presença de precipitados duros.

Quanto ao tipo de rebarbas formadas, foi possível observar todos os tipos segundo a classificação proposta por Chern et al. (2006). Nas condições de maior profundidade de corte, houve uma predominância entre as rebarbas tipo pena e primária. Já para as condições com menor profundidade de corte, houve maior ocorrência de rebarbas primárias, nos primeiros canais usinados, e rebarbas tipo agulha e menor, sendo essa segunda mais presente nos últimos canais.

No que diz respeito ao lado de predominância da formação de rebarbas, não foi possível verificar diferença qualitativa entre o lado discordante (início do período ativo da aresta de corte) e o lado concordante (final do período ativo da aresta de corte). Essa análise poderia ser realizada posteriormente em trabalhos futuros com software de edição de imagens, não sendo alvo do presente trabalho. No entanto, em trabalhos feitos no laboratório, utilizando a mesma máquina ferramenta, condições de corte e metodologia similares, porém em outros materiais, observa-se maiores rebarbas no lado concordante (ALONSO, 2023).

Em relação à superfície usinada, observa-se na Figura 4.18 que as marcas de avanço variam ao longo do comprimento usinado. Essas variações são decorrentes do desgaste da ferramenta, na qual apresenta modificações do seu raio de ponta, o que influenciam a qualidade visual da superfície e a sua rugosidade.

Também é possível notar nas imagens que, para as condições de menor profundidade de corte, as marcas no fundo dos canais foram formadas no sentido de avanço e no sentido contrário, ou seja, no período inativo da aresta de corte, o que não ocorreu nas condições de maior profundidade de corte. Isso pode sugerir que há uma maior deflexão da microferramenta quando se utiliza a profundidade de corte de 40 μm . Além disso, todas as condições de corte apresentaram uma marca paralela à

borda do canal, como mostrado na Figura 4.19. Essa marca é proveniente do desgaste da ponta da cunha cortante. Esta marca pode sugerir um arredondamento da parede do canal próximo ao fundo. Para investigar isso, seria necessário a utilização de equipamento de interferometria, pois, o perfilômetro utilizado neste trabalho tem limitação para obter o perfil do canal em cantos a 90°.

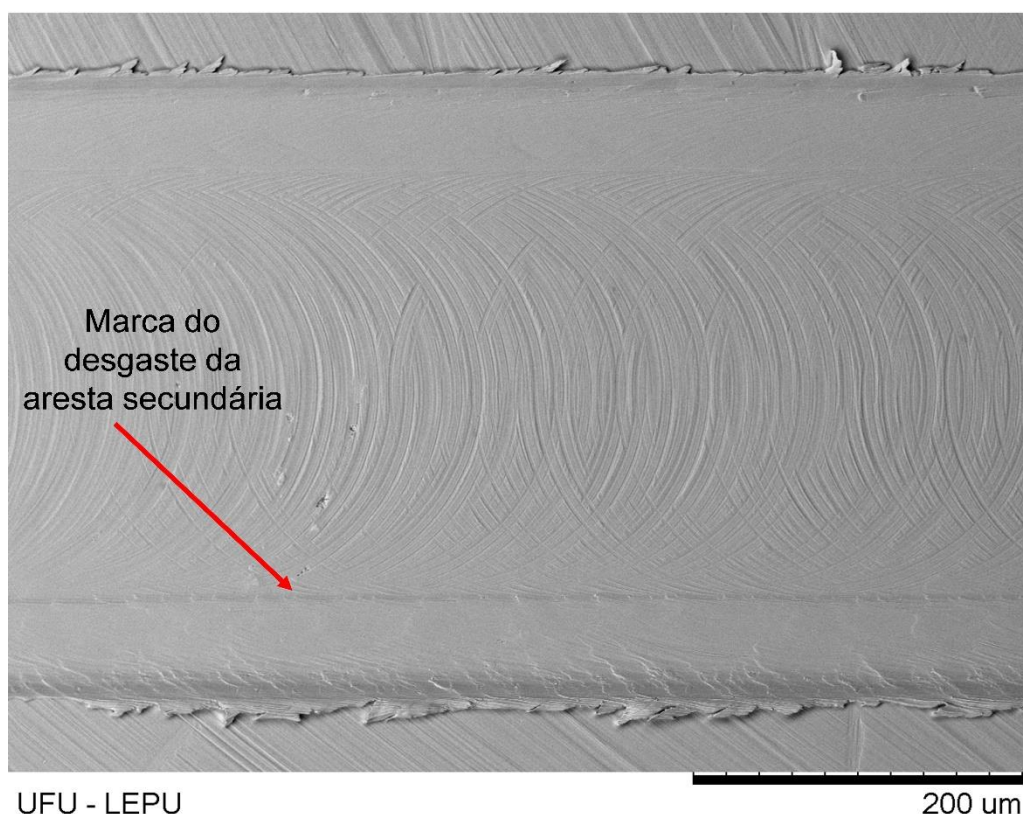


Figura 4.19 - Marca paralela à borda do canal presente em todas condições de usinagem.

Na superfície dos canais também foram observados destacamento do material como apresentados na Figura 4.20. Esse destacamento pode ocorrer devido à presença de precipitados duros encontrados na liga ou da tendência de o material aderir à ferramenta, o que em ambos os casos acarreta em um maior desgaste da ferramenta durante o processo de usinagem.

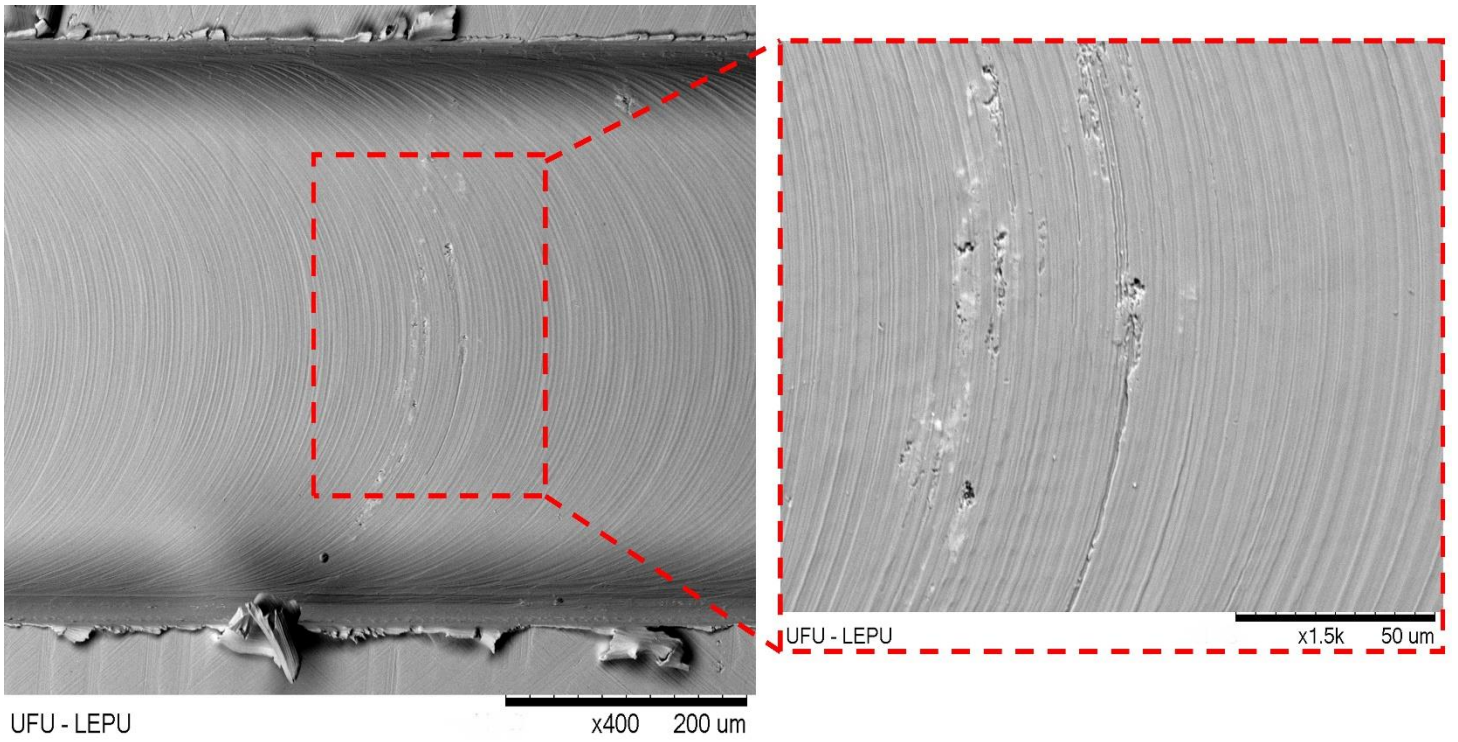


Figura 4.20 – Destacamento de material do fundo do canal durante a usinagem.

CAPITULO V

CONCLUSÕES

Após os ensaios de microfresamento da liga de níquel Inconel 718 com ferramentas de metal duro com 400 μm de diâmetro, revestidas com TiNAl, em diferentes condições de usinagem, é possível concluir que:

Em relação ao desgaste das microferramentas:

- Todas as condições usinadas promoveram um desgaste severo nas ferramentas após um comprimento de usinagem de 108 mm, ou seja, 9 canais;
- Elevadas profundidades de corte acarretam em uma grande quantidade de material aderido na ferramenta, provocando maiores desgaste;
- O parâmetro de usinagem que mais influenciou o desgaste da ferramenta foi a profundidade de corte, visto que, as ferramentas que usinaram nas maiores profundidades apresentaram as maiores reduções no diâmetro;
- O aumento da velocidade de corte apresentou elevação do desgaste em baixas profundidades de corte, porém em maiores profundidades de corte o aumento da velocidade de corte acarretou no decréscimo do desgaste;
- O avanço por dente não representou influência significativa no desgaste em relação à redução do diâmetro, aresta principal de corte, porém os baixos valores de avanço foram responsáveis por maiores desgastes da aresta secundária de corte;
- A melhor condição em relação ao desgaste da microferramenta foi a que apresentou menores valores de velocidade e profundidade de corte e maior valor de avanço, a condição F4 ($v_c = 12,6 \text{ m/min}$, $a_p = 10 \mu\text{m}$ e $f_z = 10 \mu\text{m/z}$).

Em relação à rugosidade da superfície usinada:

- Em geral as superfícies usinadas apresentaram baixos valores de rugosidade, com a rugosidade média quadrática (R_q) variando entre 0,080 μm à 0,200 μm ;

- A velocidade de corte e a profundidade de corte foram os parâmetros que apresentaram influência significativa quanto à variação da rugosidade dos canais;
- A mudança nos valores do avanço por dente não afetou significativamente a rugosidade;
- As condições que apresentaram melhores valores de rugosidade foram as de menor velocidade e profundidade de corte, independentemente dos valores de avanço.

Em relação à formação de rebarbas e qualidade da superfície usinada:

- Maiores profundidades de corte ocasionaram elevada formação de rebarbas, apresentando um crescimento das rebarbas com o comprimento usinado;
- Para os menores valores de profundidade de corte não houve grande diferença qualitativa quanto à formação de rebarbas, mesmo em diferentes valores de velocidade de corte e avanço;
- Houve um decréscimo de rebarbas formadas com o comprimento usinado em profundidades de corte menores;
- Aumentar a profundidade de corte pode ocasionar deflexão da ferramenta, já que nessas condições as marcas no fundo dos canais foram observadas em apenas no sentido de avanço da ferramenta;
- Em todas as condições observou-se o destacamento de material do fundo do canal, contribuindo para maiores valores de rugosidade e desgaste das microferramentas.

Sugestões para trabalhos futuros

- Aumentar a variação dos parâmetros utilizados nas análises;
- Avaliar a influência do fluido de corte no microfresamento da liga;
- Aumentar o comprimento usinado com o intuito de avaliar sua influência nas variáveis de saída.
- Analisar quantitativamente as rebarbas formadas para cada condição de usinagem;

- Investigar a resistência ao desgaste das ferramentas através de um ensaio do tipo pino-disco;
- Analisar os parâmetros de usinagem quanto à deflexão da ferramenta durante o processo de microfresamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAUDDIN, M.; EL BARADIE, M.A.; HASHMI, M.S.J. Tool-life testing in the end milling of Inconel 718. **Journal of Materials Processing Technology**, 1995. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02035-7](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02035-7)

ALHADEFF, L.L.; MARSHALL, M. B.; CURTIS, D. T.; SLATTER, T. Protocol for tool wear measurement in micro-milling. **Wear**. v. 420 – 42, p. 54 – 67, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.018>

ALONSO, T. **Análise Experimental do Efeito das Condição de Corte no Microfresamento do Aço Ferramenta AISI H13**. 2023, 115f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – MG.

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. **Precision Engineering**, v. 33, n. 33, p. 402-407, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.002>.

ASM. **Properties and Selection – Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. 10.Ed. ASM International, 1990. 3470p. Handbook Vol. 2.

AURICH, J. C.; DORNFELD, D.; ARRAZOLA, P. J.; FRANKE, V.; LEITZ, L.; MIN, S. Burrs - analysis, control and removal. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v.58, n.2, p.519-542 ,2009. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.004>.

AURICH, J. C., BOHLEY, M., REICHENCHACH, I. G., KIRSCH, B., Surface quality in micro milling: Influences of spindle and cutting parameters, **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v.66, 2017, p. 101-104. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.029>

BISSACCO, G.; HANSEN, H.N.; CHIFFRE, L. de. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 167, n. 2-3, p. 201-207, ago. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.029>.

CÂMARA, M.A.; RUBIO, J.C. Campos; ABRÃO, A.M.; DAVIM, J.P.. State of the Art State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. **Journal Of Materials Science & Technology**, [S.L.], v. 28, n. 8, p. 673-685, ago. 2012. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1005-0302\(12\)60115-7](http://dx.doi.org/10.1016/s1005-0302(12)60115-7).

CHAE, J.; PARK, S.s.; FREIHEIT, T.. Investigation of micro-cutting operations. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [S.L.], v. 46, n. 3-4, p. 313-332, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015>.

CHENG, K.; HUO, D., **Micro-cutting: fundamentals and applications**. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2013.

CHEN, N.; LI, H. N.; WU, J.; LI, Z.; LI, L.; LIU, G.; HE, N.. Advances in micro milling: from tool fabrication to process outcomes. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [S.L.], v. 160, p. 103670, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103670>.

CHEN, L.; DENG, D.; PI, G.; HUANG, X.; ZHOU, W. Burr Formation And Surface Roughness Characteristics In Micro-Milling Of Microchannels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** (2020) 111:1277–1290. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06170-4>.

CHERN, G., WU, Y. E., CHENG, J., YAO, J., Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM, **Precision Engineering**, v.31, 2007, p.122-129. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2006.04.001>

DE OLIVEIRA, D. **Efeito Escala e Integridade Superficial no Microfresamento da Liga de Níquel Inconel 718**. 2019. 154 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

DOLINŠEK, S.; KOPAČ, J. Acoustic emission signals for tool wear identification. **Wear**, v. 225, p. 295-303, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00363-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00363-9)

DORNFELD, D., MIN, S., TAKEUCHI, Y. Recent Advances in Mechanical Micromachining, **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 55, n°2, pp. 745-768, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.006>

DUPONT, J. N.; LIPPOLD, J. C.; KISER, S. D. **Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2009.

EZUGWU, E.O.; WANG, Z.M.; MACHADO, A.R.. The machinability of nickel-based alloys: a review. **Journal of Materials Processing Technology**. Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00314-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00314-8)

FILIZ, S.; CONLEY, C.M.; WASSERMAN, M.B.; OZDOGANLAR, O. B., An experimental investigation of micromachinability of copper 101 using tungsten carbide micro-end-mills. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, p. 1088–1100, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.024>

GEDDES, B.; LEON, H.; HUANG, X. **Superalloys: Alloying and Performance**. Metals Park, Ohio: ASM International, 2010

GILLESPIE L. K., BLOTTER P. T., The Formation and Properties of Machining Burrs. **Transactions of ASME Journal of Engineers for Industry**, v.98, n. 1, p.66–74, 1976. DOI: [10.1115/1.3438875](https://doi.org/10.1115/1.3438875).

GOMES, M. C. **Estudo experimental do microfresamento do aço AISI 316L**. 2019. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

HASHIMURA, M.; HASSAMONTR, J.; DORNFELD, D. A. Effect of In-Plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 121, n.1, p. 13-19, 1999. DOI:[10.1115/1.2830566](https://doi.org/10.1115/1.2830566)

HITACHI HIGH-TECHNOLOGIES CORPORATION. **Tabletop Microscope**. 20p, 2013.

HUTCHINGS, I. M., **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**, 4^a Ed., Londres: Arnold, 1996. 273p.

ISO 4287. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization, 25p, 1997.

ISO 8688-1. Tool life testing in milling – Part 1: Face milling. International Organization for Standardization. 27p, 1989.

ISO 8688-2. Tool life testing in milling – Part 2: End milling. International Organization for Standardization. 26p, 1989.

JACKSON, M. J. Micro and nanomachining. In: DAVIM, J. P. Machining: fundamentals and recent advances. London: Springer, 2008. p. 271-298.

JIN, S. Y.; PRAMANIK, A.; BASAK, A. K.; PRAKASH, C.; SHANKAR, S.; DEBNATH, S., Burr formation and its treatments—a review. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 107, n. 5-6, p. 2189-2210, mar 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-05203-2>.

LIN, Y.S., YANG, C.H., WANG, C.Y, CHANG, F.R., HUANG, K.S., HSIEH, W.C. An aluminum microfluidic chip fabrication using a convenient micromilling process for fluorescent poly (DL-lactide-co-glycolide) microparticle generation, **Sensors**, 12 (2012) 1455-1467. <https://doi.org/10.3390/s120201455>

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; DA SILVA, M.B., **Teoria da Usinagem dos Materiais**, Editora Edgard Blucher, São Paulo – SP, 2ª Edição, 2011.

MARQUES, A. Torneamento de Inconel 718 Com Aplicação de Lubrificantes Sólidos. 2015. 226 f. **Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.**

MASATO D., SORGATO M., PARENTI P., ANNONI M., LUCCHETTA G., Impact of deep cores surface topography generated by micro milling on the demolding force in

micro injection molding, **Journal of Materials Processing Technology**, 246 (2017) 211-223. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.028>

MASUZAWA, T.; TÖNSHOFF, H.K.. Three-Dimensional Micromachining by Machine Three-Dimensional Micromachining by Machine Tools. **Cirp Annals**, [S.L.], v. 46, n. 2, p. 621-628, 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60882-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60882-8).

MIAN, A. J.; DRIVER, N.; MATIVENGA, P. T. Identification of factors that dominate size effect in micro-machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 5, p. 383-394, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.004>

MINITECH MACHINERY (Eua). **The GX Granite Base Super Precision**. 2022. <https://minitechcncmachines.com/the-gx-granite-base-super-precision/>

MITSUBISHI MATERIALS. Torneado / Fresado / Soluções em Ferramental. Disponível em

<http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/7814/6475/6277/catalog_c007sa_full.pdf>.

OLVERA, O.; BARROW, G. An Experimental Study of Burr Formation in Square Shoulder Face Milling. v. 36, n. 9, p. 1005–1020, 1996. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(96\)00014-4](https://doi.org/10.1016/0890-6955(96)00014-4)

POLLOCK, T. M.; TIN, S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties. **Journal of Propulsion and Power**, v. 22, n. 2, p. 361-374, 2006. <https://doi.org/10.2514/1.18239>

QUEIROZ, L. B. **Avaliação de Diferentes Ferramentas de Corte No Microfresamento do Aço Ferramenta ABNT H13**. 2022, 100f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – MG.

RANGEL, D. A.; ROJAS, F. A.; ARTEAGA, N. A. Development of a CNC Micro-lathe for Bone Microimplants. **Revista EIA**, n. 15, p. 113-127, 2011.

REED, R. C. *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. 1st.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

SERJE, D.; PACHECO, J.; DIEZ, E.. Micromilling research: current trends and future prospects. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 111, n. 7-8, p. 1889-1916, 19 out. 2020. Springer Science and Business <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-06205-w>

SHAW, M.C. **Metal Cutting Principles**. Oxford University Press, Londres, 1986.

SILVA, C. C. **Revestimentos de ligas de níquel depositadas pelo processo TIG com alimentação de arame frio - aspectos operacionais e metalúrgicos**. 2010. 319 f. (Tese). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

SILVA, L. C. **Microfresamento do Aço Inoxidável 316L Obtido por Fusão Seletiva a Laser (SLM) Utilizando Ferramentas de Metal Duro com Diferentes Tipos de Revestimentos**. 2022. 155 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

TANSEL, I., RODRIGUEZ, O., TRUJILLO, M., PAZ, E., LI, W. Micro-end-milling – I: Wear and breakage. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 38. p.1419-1436. Pergamon, 1998.

TAYLOR HOBSON. **Manual de Instruções Form Talysurf Intra**. 12p, 2012.

TRENT, E. M., WRIGTH, P. K., **Metal Cutting**. 4th Ed., Butterworth, Boston, USA, 2000, 446p.

UCUN, I., ASLANTAS, K., BEDIR, F., The performance of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of Inconel 718, **Precision Engineering**, n.41, 2015, p.135-144. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.01.002>

UHLMANN, E.; KÖNIG, J.; SAMMLER, Fi.; RICHARZ, S.. Tribology of Treated and Coated Cutting Tool Surfaces. **Encyclopedia Of Tribology**, [S.L.], p. 3896-3905, 2013. Springer US. http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_615.

WANG, Y.; ZOU, B.; HUANG, C., Tool wear mechanisms and micro-channels quality in micro-machining of Ti-6Al-4V alloy using the Ti(C7N3)-based cermet micro-mills. **Tribology International**, [S.L.], v. 134, p. 60-76, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.030>.

WENTIAN, S.; YUDE, L. Fabrication of micro gear based on micromilling, **International Conference on Computer, Mechatronics**, v. 1. p. 608-611, 2010 <https://doi.org/10.1504/IJNM.2013.057595>.

YANG, D., YAN, W., DING, G., JIN, Z., WANG, G., Numerical and experimental analysis of cooling performance of single-phase array microchannel heat sinks with different pin-fin configurations, **Applied Thermal Engineering**, 112 (2016) 1547-1556. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.211>.

ZIBEROV, M.; OLIVEIRA, D.; SILVA, M. B.; HUNG, W. N. P.. Wear of TiAlN and DLC coated microtools in micromilling of Ti-6Al-4V alloy. **Journal Of Manufacturing Processes**, [S.L.], v. 56, p. 337-349, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.082>

ZIBEROV, M. **Microfresamento da Liga Ti-6Al-4V com Microferramentas com Diferentes Revestimentos e Aplicação de MQL**. 2018. 121 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.