

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

THAISE ALONSO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DAS CONDIÇÕES
DE CORTE NO MICROFRESAMENTO DO AÇO
FERRAMENTA AISI H13**

Uberlândia

2023

THAISE ALONSO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DAS CONDIÇÕES
DE CORTE NO MICROFRESAMENTO DO AÇO
FERRAMENTA AISI H13**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como 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

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A454
2023 Alonso, Thaise, 1997-
Análise Experimental do Efeito das Condição de Corte
no Microfresamento do Aço Ferramenta AISI H13 [recurso
eletrônico] / Thaise Alonso. - 2023.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.20>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

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

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074


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 625, PPGEM				
Data:	31/01/2023	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	12112EMC005				
Nome do Discente:	Thaise Alonso				
Título do Trabalho:	Análise Experimental do Efeito das Condições de Corte no Microfresamento do Aço Ferramenta AISI H13				
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; Amauri Hassui - UNICAMP; e Márcio Bacci da Silva - FEMEC/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Márcio Bacci da Silva, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da 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):

Aprovada.

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 **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/01/2023, às 11:16, 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 **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/01/2023, às 11:17, 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 **Amauri Hassui, Usuário Externo**, em 31/01/2023, às 11:17, 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 **4223086** e o código CRC **8C8B27DE**.

À minha família, pelo apoio e carinho

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos proporcionadas ao longo da graduação e pós-graduação.

Ao meus pais José Roberto Alonso e Marilene Sparapani Santiago Alonso, a minha irmã Vanessa Cristina Alonso e ao meu cunhado Diego de Mendonça Fernandes que sempre confiaram e apoiaram a minha jornada acadêmica.

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

Aos meus colegas do LEPU que sempre estiveram disponíveis para me ajudar: Dra. Milla Gomes, Me. Samuel Alves, Dr. Walter Mota, Me. Thamires Botelho, Me. Lucas Barbosa, Me. Júlia Abrão, Eng. Igor Cezar, Me. Letícia Amaral e Me. Elhadji Cheikh.

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 dado esta oportunidade, e aos amigos do Laprosolda que sempre me acolheram e me aconselharam.

Aos técnicos do laboratório, Alcione dos Reis, Thiago Pereira e Thiago Menezes, por todo auxílio.

Ao engenheiro Marcello Montagnani, da empresa (Taylor Hobson), agradeço a cessão do equipamento utilizado na medição das peças.

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

E, por fim, agradeço a todas as pessoas que contribuíram e/ou incentivaram a realização desta pesquisa.

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.

RESUMO

O processo de microfresamento permite a fabricação de peças miniaturizadas e usinagem de microdetalhes em diversificadas áreas da engenharia. Entre as aplicações na indústria metal mecânica, destaca -se o microfresamento de aços ferramenta para fabricação de moldes e matrizes. Entretanto, o microfresamento aplicado à aços ferramenta é um desafio, em razão da curta vida da ferramenta. Assim, o estudo da influência ou seleção dos parâmetros de corte no processo de microfresamento é de grande importância para aliar a vida de ferramenta e qualidade da superfície usinada. Desta forma, o presente trabalho investiga experimentalmente o efeito de diferentes condições de corte, com variação do avanço (1 $\mu\text{m}/\text{dente}$, 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$ e 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$) e profundidade de corte (10 μm , 20 μm e 40 μm) na usinagem do aço ferramenta AISI H13 no estado recozido durante o processo de microfresamento. Para isto, utilizou-se microfresas de topo reto de 400 μm de diâmetro, revestida de (Al, Ti) N. Os ensaios consistiram na usinagem de microcanais utilizando uma microfresadora com rotação máxima do eixo árvore de 60 000 rpm. Foram investigados o desgaste das microferramentas, o comportamento dos parâmetros de rugosidade Ra e Rq e formação de rebarbas. O desgaste das microferramentas foi avaliado através de comparação de imagens das ferramentas novas e desgastadas obtidas no MEV. Os microcanais usinados foram observados no MEV para análise visual da superfície usinada e das rebarbas formadas. Os resultados obtidos para o parâmetro Ra variaram de 0,131 a 0,1648 μm e os valores de Rq foram de 0,1631 μm a 0,2254 μm . Verificou-se a presença do cavaco esferoidal. O maior avanço utilizado, 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$ resultou no menor desgaste da ferramenta e a maior profundidade de corte, 40 μm resultou no menor desgaste da ferramenta.

Palavras-chave: Microusinagem, Microfresamento, Aço AISI H13; Rebarbas.

ALONSO, T Experimental Analysis of the Effect of Cutting Conditions on Micromilling of Tool Steel AISI H13.. 2023, 115f. M.Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

ABSTRACT

The micromilling process allows the manufacture of miniaturized parts and machining of micro details in different that meets strict quality requirements. Among the applications in the metalworking industry, the micromilling of tool steels for the manufacture of molds and dies stands out. However, micromilling applied to tool steels is a challenge due to the short tool life when machining these steels. Thus, the study of the influence or selection of cutting parameters on the micromilling process is of great importance to combine tool life and quality of the machined surface. Thus, the present work experimentally investigates the effect of different cutting conditions, with variation in feed rate (1 $\mu\text{m}/\text{tooth}$, 5 $\mu\text{m}/\text{tooth}$ and 10 $\mu\text{m}/\text{tooth}$) and depth of cut (10 μm , 20 μm and 40 μm) in the machining of AISI H13 tool steel in the annealed condition during the micromilling process. For this purpose, 400 μm diameter carbide end micromills coated with (Al, Ti) N were used. The tests consisted of machining microchannels using a micromilling machine tool with a maximum spindle speed of 60 000 rpm. The wear of the microtools, surface roughness parameters Ra and Rq, burr formation and chips types were investigated. The wear of the microtools was evaluated by comparing images of new and worn tools obtained by scanning electron microscope (SEM). The machined microchannels were also observed in the SEM for visual analysis of the machined surface and the generated burrs. The results obtained for the Ra parameter ranged from 0.1310 to 0.1648 μm and the Rq values ranged from 0.1631 μm to 0.2254 μm . Machining under the highest feed of 10 $\mu\text{m}/\text{tooth}$, resulted in the lowest tool wear, whereas under the highest depth of cut, 40 μm , resulted in the lowest tool wear.

Keywords: Micromachining, Micromilling, AISI H13 tool steel; Burr formation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Aplicações de ferramentas de micro corte em vários campos (a) Fabricação de micro bicos, (b) Perfuração de ligas aeroespaciais, (c) Indústria de relojoaria, (d) Desenvolvimento de micro agulhas (VENKATESH et al., 2016).	2
Figura 1.2 – (a) Fresa de topo plana de tamanho convencional de 2 mm e (b) fresas de topo plano de 400 µm.	3
Figura 1.3 - Relação da quantidade de publicações de microusinagem e microfresamento de 1996 a 2023. (acessado em 10/12/2022 às 9 h).	4
Figura 2.1 - Microestrutura do aço ferramenta AISI H13 (GABARDO, 2008).	9
Figura 2.2 - Efeito do tempo e temperatura de revenimento sobre a dureza do aço ferramenta H13 (VENDRAMIM, 2014).	9
Figura 2.3 - Comparação entre o tamanho dos grãos do material usinado e o raio da aresta de corte (a) usinagem convencional e (b) microusinagem (Adaptado de ELKASEER et al., 2018).	13
Figura 2.4 - Esquema da aresta de corte em (a) macroescala convencional e (b) corte em microescala (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005; ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).	13
Figura 2.5 – Variação da espessura de corte no microfresamento de topo, vista no plano de trabalho.	14
Figura 2.6 - Formação do cavaco em relação a mínima espessura de corte (adaptado de CHAE et al., 2006).	14
Figura 2.7 - Pressão específica em função da espessura do material no corte ortogonal de alumínio (DA SILVA, 2014).	16
Figura 2.8 - Influência do avanço de corte na pressão específica (FERRARESI, 1970).	17
Figura 2.9 - Geometria genérica de uma microfresa de 4 arestas: (a) ferramenta inteira, (b) vista lateral e (c) vista de topo (adaptado de CHEN et al., 2021).	18
Figura 2.10 - Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte. (MACHADO et al., 2011).	19
Figura 2.11 -Formas de desgaste da ferramenta (DEARNLEY; TRENT, 1982 apud MACHADO et al., 2011).	20
Figura 2.12 - Desgaste medido da superfície principal de folga (ZIBEROV et al., 2020).	21

Figura 2.13 - Medição do desgaste da superfície de folga secundária (GOMES et al., 2020).	22
Figura 2.14 - Comparação do tamanho da peça e a rugosidade (Ra) de diversos processos (adaptada de BYRNE et al., 2003).	23
Figura 2.15 - Desvios de forma da superfície.....	24
Figura 2.16 - Representação do Ra (Olympus, 2021).	25
Figura 2.17 - Representação do Rq (Olympus, 2021).	26
Figura 2.18 - Influência da relação entre a espessura do cavaco não deformado e o raio da aresta de corte no acabamento da superfície (ARAMCHAROEN E MATIVENGA,2009).	27
Figura 2.19 - Classificação das rebarbas quanto à posição (adaptado de LEE; DORNFELD, 2002).	29
Figura 2.20 -Tipos de rebarbas encontrados na microusinagem quanto ao tipo: (a) primária, (b) agulha, (c) pena e (d) menor (CHERN et al. 2006).	30
Figura 2.21 - Progressiva formação de rebarba ao longo do desgaste da ferramenta. *escala da régua em polegadas (BAO; TANSEL, 2000).	30
Figura 2.22 Relação entre largura da rebarba e parâmetros de corte: avanço e profundidade de corte (adaptado de CHEN et al., 2020)	31
Figura 3.1 - Corpo de prova com as respectivas dimensões.....	33
Figura 3.2 - Microestrutura do aço ferramenta AISI H1	34
Figura 3.3 - Parâmetros geométricos das microferramentas (MITSUBISHI MATERIALS, 2022).	36
Figura 3.4 - Microfresadora CNC modelo Mini-mill/GX utilizada nos ensaios (MINITECH MACHINERY, 2022).	37
Figura 3.5 - Configuração experimental.	37
Figura 3.6 - Fixação do corpo de prova.	38
Figura 3.7 - Posicionamento da microferramenta sobre o corpo de prova (ZIBEROV, 2018).	39
Figura 3.8 - Direção de aplicação do fluido de corte.....	40
Figura 3.9 - Processo de verificação das arestas de corte da microferramentas.....	41
Figura 3.10 - Medição do diâmetro inicial da microferramenta (a) nova e (b) após usinagem de 100 mm.	42
Figura 3.11 - Superfície de folga principal de uma microfresa desgastada.....	42
Figura 3.12 - Trajetória do apalpador.	43

Figura 3.13 - Perfil de rugosidade obtido em um microcanal.	44
Figure 4.1 - Superfície secundária de folga antes e após a microusinagem do Aço ferramenta AISI H13 com diferentes parâmetros de corte.	47
Figura 4.2 - Ampliação do desgaste na ponta para Ferramenta 2.1.....	49
Figura 4.3 - Ampliação do desgaste na ponta (a) e desgaste de flanco secundário (b) para ferramenta 3.....	50
Figura 4.4 - Superfície de saída.....	50
Figure 4.5 - Superfície principal de folga das ferramentas após a microusinagem.....	51
Figure 4.6 - Percentual de redução do diâmetro das microferramentas com a variação do avanço por dente (1 $\mu\text{m}/\text{dente}$, 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$ e 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$, respectivamente, com profundidade de corte constante de 40 μm).....	52
Figure 4.7 - Percentual de redução do diâmetro das microferramentas com a variação da profundidade de corte (10 μm , 20 μm e 40 μm , respectivamente, com avanço por dente constante de 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$).....	53
Figure 4.8 - Comportamento do desgaste da aresta de corte. Onde: (a) microferramenta nova e (b) após 100 mm usinados.....	54
Figure 4.9 – Superfície de saída de ferramenta com avaria observada no MEV.....	55
Figure 4.10 - EDS realizada na superfície na superfície principal de folga após a quebra da ferramenta.....	55
Figure 4.11 - Influência das qualidade da ferramenta na qualidade superficial.....	56
Figure 4.12 - Influência das qualidade da ferramenta na formação de rebarbas.....	57
Figura 4.13 - Presença de partículas e microvazios na superfície.....	58
Figure 4.14 - Detalhes de cavaco esférico para microfresamento de Inconel 718 (DE OLIVEIRA et al., 2019).....	59
Figure 4.15 - Cavaco esférico no aço ferramenta AISI H13.....	60
Figure 4.16 - Cavaco esférico no aço ferramenta AISI H13.....	60
Figure 4.17 - Cavaco esférico com superfície dentrificada no aço ferramenta AISI H13.....	61
Figure 4.18 – Localização de um cavaco esférico em um dos microcanais usinados.....	62
Figure 8.19 – Resultados de EDS no cavaco esférico do aço ferramenta AISI H13.....	62
Figure 4.20 - Influência da variação do avanço por dente (1 $\mu\text{m}/\text{dente}$, 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$ e 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$) na rugosidade R_a	64
Figure 4.21 - Influência da variação da profundidade de corte (10 μm , 20 μm e 40 μm) na rugosidade R_a do Aço ferramenta AISI H13.....	65

Figure 4.22 - Rugosidade Ra no comprimento usinado (Teste 1: $ap = 40 \mu\text{m}$ e $fz = 1 \mu\text{m/dente}$).	66
.....	
Fligura 4.23 - Rugosidade Ra no comprimento usinado (Teste 2: $ap = 40 \mu\text{m}$ e $fz = 5 \mu\text{m/dente}$).	66
.....	
Figure 4.24 - Rugosidade Ra no comprimento usinado (Teste 3: $ap = 40 \mu\text{m}$ e $fz = 10 \mu\text{m/dente}$).	67
.....	
Figure 4.25 - Rugosidade Ra no comprimento usinado (Teste 4: $ap = 20 \mu\text{m}$ e $fz = 5 \mu\text{m/dente}$).	67
.....	
Figure 4.26 - Rugosidade Ra no comprimento usinado (Teste 5: $ap = 10 \mu\text{m}$ e $fz = 5 \mu\text{m/dente}$).	68
.....	
Figure 4.27 - Superfície usinada (a) do primeiro canal e (b) do último canal nas condições de corte do Teste 4 ($ap = 20 \mu\text{m}$ e $fz = 5 \mu\text{m/dente}$).	69
Figure 4.28 - Perfil de rugosidade do primeiro canal do Teste 4 ($ap = 20 \mu\text{m}$ e $fz = 5 \mu\text{m/dente}$).	69
.....	
Figure 4.29 - Perfil de rugosidade do último canal do Teste 4 ($ap = 20 \mu\text{m}$ e $fz = 5 \mu\text{m/dente}$).	69
.....	
Figure 4.30 - Influência da variação do avanço por dente no aço ferramenta AISI H13.	71
Figure 4.31 - Influência da variação da profundidade de corte no aço ferramenta AISI H13.	71
Figure 4.32 - Superfícies usinadas.	73
Figure 4.33 - Perfil de rugosidade, espectro de frequência e comprimento de ondas encontrado para a condição de corte do Teste 1.	74
Figure 4.34 - Perfil de rugosidade, espectro de frequência e comprimento de ondas encontrado para a condição de corte do Teste 2.	75
Figure 4.35 - Perfil de rugosidade, espectro de frequência e comprimento de ondas encontrado para a condição de corte do Teste 3.	76
Figure 4.36 - Perfil de rugosidade, espectro de frequência e comprimento de ondas encontrado para a condição de corte do Teste 4.	77
Figure 4.37 - Perfil de rugosidade, espectro de frequência e comprimento de ondas encontrado para a condição de corte do Teste 5.	77
Figure 4.38 - Topografia da superfície em 3D com comprimento de 4 mm.	78
Figure 4.39 - Média Aritmético da altura (S_a).	79
Figure 4.40 - Rugosidade S_a no comprimento usinado.	79
Figure 4.41 - Topografia da superfície em 3D e perfil de rugosidade 2D.	80

Figure 4.42 - Topografia da superfície em 2D com área de	80
Figure 4.43 - Comportamento do parâmetro Ra através do Interferômetro e Perfilômetro	81
Figure 4.44 - Tipos de rebarbas encontradas na microusinagem do aço ferramenta AISI H13.	82
Figure 4.45 - Rebarba do tipo onda do lado concordante e em de rebarbas do tipo menor de lado discordante.....	83
Figure 4.46 - Rebarba tipo agulha maior	84
Figure 4.47 - Rebarba do tipo pena do lado concordante e em de rebarbas do tipo primárias de lado discordante.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação AISI de aços ferramenta.....	7
Tabela 2.2 - Composição química nominal, em massa, do aço ferramenta AISI H13 (ASM Internacional, 2005).....	8
Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas do AISI H13 (ASM INTERNATIONAL, 1990; BRYSON, 2009; MACHADO et al., 2015).....	8
Tabela 2.4 - Parâmetros a serem analisados no microfresamento (GOMES, 2022, CÂMARA et al., 2012 e CHUKEWAD, 2014).....	12
Tabela 3.1 - Composição química, em concentração, do aço AISI H13.....	34
Tabela 3.2 - Parâmetros Geométricos das Microferramentas (MITSUBISHI MATERIALS, 2022).....	35
Tabela 3.3 - Parâmetros de corte.	38
Tabela 4.1 - Resultados da ANOVA para a rugosidade superficial Ra.....	70
Tabela 4.2 - Resultados da ANOVA para a rugosidade superficial Ra.....	70

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_e	Penetração de trabalho [μm]
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANOVA	Análise de Variância
a_p	Profundidade de corte [μm]
ASM	<i>American Society for Metals</i>
CNC	Comando numérico computadorizado
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
f_z	Avanço por dente [$\mu\text{m}/\text{dente}$]
H	Espessura de corte [mm]
H	Comprimento de corte da microfresa (cabeça da microfresa) [mm]
H1	Hipótese alternativa na análise de variância
Hm	Espessura mínima de corte [mm]
Ho	Hipótese nula na análise de variância
L	Comprimento total da microfresas [mm]
Lc	Comprimento de corte da microfresas
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQL	Mínima quantidade de fluido (de corte)
Ra	Desvio aritmético médio [μm]
Rq	Desvio médio quadrático [μm]
Rz	Raio de ponta [μm]
Rt	Altura total do perfil [μm]
Rb	Raio de aresta [μm]
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
v_c	Velocidade de corte [m/min]
v_f	Velocidade de avanço [m/min]
α	ângulo de saída da ferramenta [$^\circ$]

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Objetivo	5
1.3 Estruturação do trabalho	5
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Aço Ferramenta AISI H13.....	6
2.2 Microfresamento.....	10
2.3 Efeito Escala	12
2.4 Energia Específica de Corte	15
2.5 Microferramentas.....	17
2.5.1 Desgaste das microferramentas	19
2.6 Rugosidade	22
2.6.1 Influência dos Parâmetros de Corte na qualidade superficial.....	26
2.7 Rebarbas	28
CAPÍTULO III - METODOLOGIA	32
3.1 Caracterização das Amostras de Aço H13	32
3.1.1 Ensaio de microdureza.....	34
3.2 Microferramentas.....	35
3.3 Medição de desgaste das ferramentas e análise da superfície usinada.....	36
3.4 Microfresadora.....	36
3.5 Ensaio de Microfresamento	37
3.5.1 Configuração experimental.....	38
3.5.2 Posicionamento das microferramentas	39
3.5.3 Fluido de corte	40
3.6 Medição do Desgaste da Microferramenta.....	40
3.7 Medição de Rugosidade.....	43
3.8 Análise da qualidade superficial das superfícies usinadas	44
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1 Desgaste da Microferramenta.....	45
4.1.1 Influência da qualidade da ferramenta nos microcanais.....	53

4.2 Cavaco esferoidal	58
4.3 Rugosidade	63
4.3.1 Análise da superfície usinada no MEV	72
4.3.2 Interferômetro	78
4.3.3 Formação de Rebarbas.....	81
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O avanço tecnológico da indústria mecânica fez aumentar consideravelmente a necessidade de produzir equipamentos cada vez menores e mais compactos com tolerâncias estreitas e de alta qualidade superficial, além da necessidade de utilizar uma ampla variedade de materiais (CHAE; PARK; FREIHET, 2006). A ciência e tecnologia que deu origem às engrenagens de relógios, atualmente está presente em diversas áreas como a médica, de transporte, ambiental e de eletrônicos (VENKATESH et al., 2016), exemplos de aplicação são mostradas na Figura 1.1.

Para atender as necessidades de produção e pós-processamento das peças miniaturizadas, utiliza-se do processo de microusinagem, sendo capaz de produzir superfícies complexas e com acabamento superficial que atende rigorosas exigências de qualidade. Em se tratando de microusinagem com ferramenta de corte, o processo de microusinagem pode ser definido como um processo convencional de usinagem que utiliza ferramentas com dimensões de 1 μm a 1 000 μm (CÂMARA et al., 2012). Entretanto, a microusinagem apresenta particularidades em relação à usinagem convencional macro em virtude da presença principalmente, do efeito escala (LIU et al., 2017, BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005).

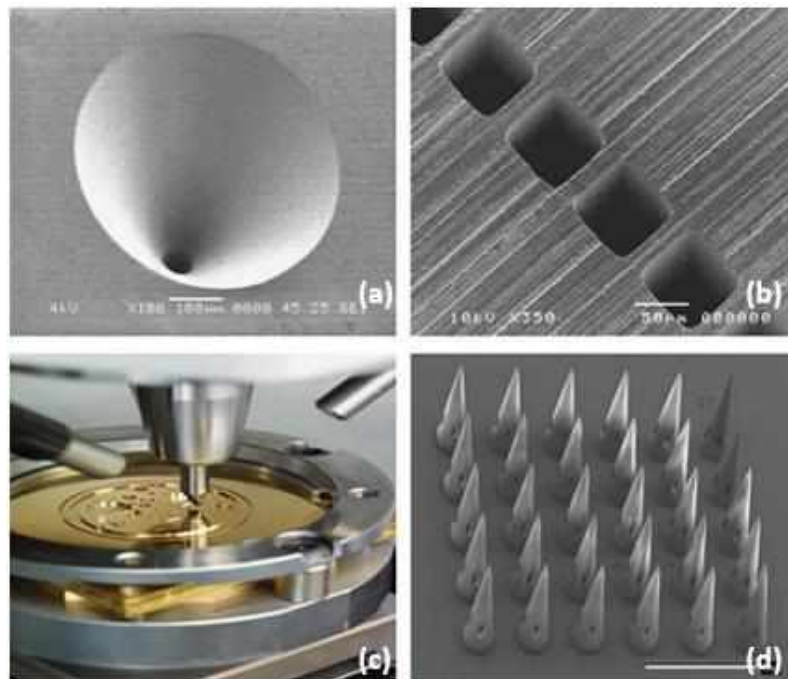


Figura 1.1 - Aplicações de ferramentas de micro corte em vários campos (a) Fabricação de micro bicos, (b) Perfuração de ligas aeroespaciais, (c) Indústria de relojoaria, (d) Desenvolvimento de micro agulhas (VENKATESH et al., 2016).

O chamado efeito escala surge em decorrência do fato da espessura de corte e o tamanho do grão do material a ser usinado, apresentarem dimensões semelhantes ao raio de ponta da ferramenta de corte, impossibilitando a modelagem do processo de microusinagem a partir dos conhecimentos dos processos de usinagem convencionais, apesar de ambos terem a mesma cinemática (CHAE; PARK; FREIHET, 2006).

Um dos principais processos de microusinagem é o microfresamento. Para que o microfresamento produza componentes nas dimensões micrométricas, é preciso que as máquinas-ferramentas utilizadas no processo tenham elevada rigidez dinâmica, precisão de movimentação e alta capacidade de rotação, visto que a rotação das microferramentas deve às vezes atingir valores de 1 000 000 rpm para conseguir uma velocidade de corte adequada (LEE E DORNFELD, 2004).

Além da velocidade de corte, outro fator que influencia diretamente a qualidade da usinagem é a ferramenta de corte utilizada. As microfresas são similares às fresas convencionais em termos de geometria, como por exemplo, fresas de topo plano e fresas de topo esférico. As microferramentas disponíveis no mercado possuem diâmetro variando na faixa de 25 μm a

1 000 μm (CHENG; HUO, 2013). Na Figura 1.2, são apresentadas duas fresas de topo plana, uma de diâmetro 2,00 mm e outra de diâmetro 400 μm , para fins de comparação de suas dimensões.

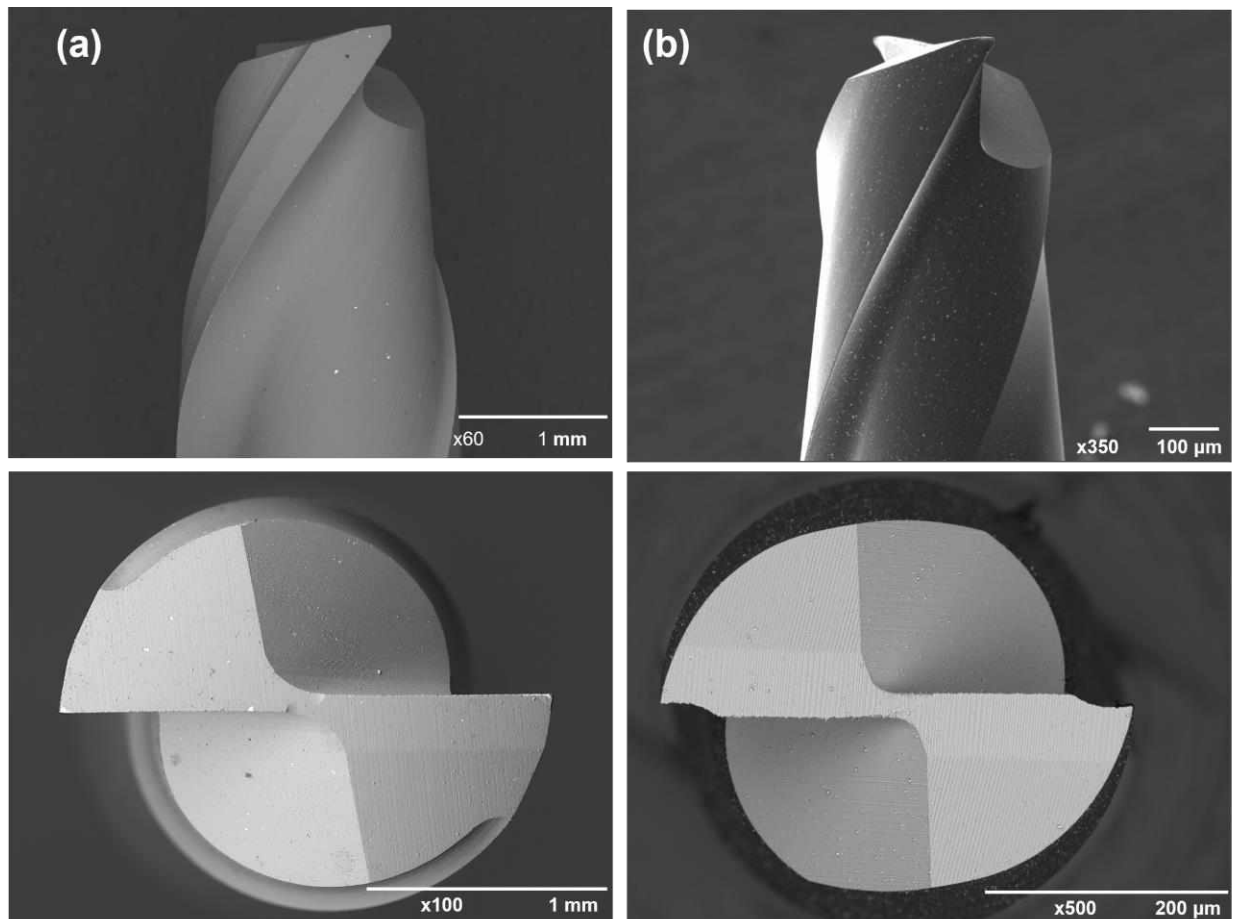


Figura 1.2 – (a) Fresa de topo plana de tamanho convencional de 2 mm e (b) fresas de topo plano de 400 μm .

A relevância da microusinagem e microfresamento para a ciência se torna evidente com o crescente número de artigos das últimas décadas, conforme mostrado na Figura 1.3. Entretanto, este tema ainda representam uma pequena parcela das pesquisas na área de usinagem, evidenciando a necessidade de mais pesquisas e projetos dentro da área de processo de fabricação. Para elaborar o gráfico da Figura 1.3, foram pesquisados temas com as seguintes palavras-chaves: *micromachining*, *micromilling/micro-milling* na *Engineering Village* (www.engineeringvillage.com) em dezembro de 2022.

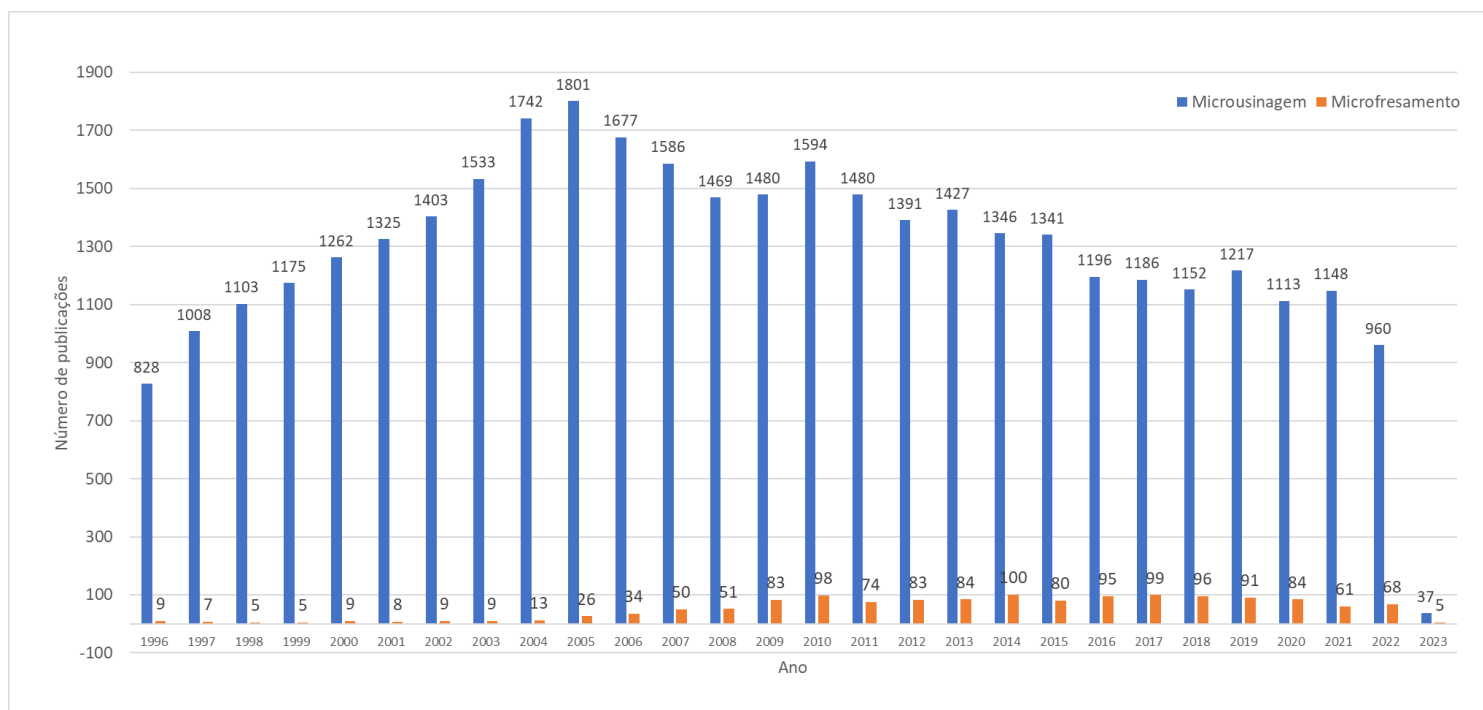


Figura 1.3 - Relação da quantidade de publicações de microusinagem e microfresamento de 1996 a 2023. (acessado em 10/12/2022 às 9 h).

Dentre as aplicações na indústria metal mecânica, destaca-se o microfresamento de aços ferramenta, em particular o AISI H13, para fabricação de moldes, matrizes e componentes de máquinas, seja para trabalho a quente ou a frio (SHIVPURI, 2005, LI et al., 2018). O aço ferramenta AISI H13 apresenta alta resistência a temperaturas elevadas, boa resistência à corrosão, alta dureza e boa resistência ao desgaste (CHIAVERINI, 1979, FALLBÖHMER et al., 2000).

Em virtude da aplicabilidade deste material, é preciso que estabeleça critérios de fabricação para suprir as condições exigidas. Brinksmeier et al. (2010), sugere que os estudos sejam voltados à otimização dos parâmetros para melhorar o acabamento da peça. Desta forma surge a necessidade de investigar a influência das condições de corte do microfresamento do aço ferramenta AISI H13. Destacando a importância deste trabalho para produção científica e crescente demanda da indústria.

1.2 Objetivo

O principal objetivo desta dissertação de mestrado é estudar a usinabilidade do aço ferramenta AISI H13 no processo de microfresamento através da investigação experimental do efeito das condições de corte na rugosidade da superfície usinada, desgaste das microferramentas, formação de rebarbas.

1.3 Estruturação do trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos a seguir:

O Capítulo I contém a introdução do tema proposto, discorrendo sobre a importância do processo de microusinagem na indústria metal-mecânica, além de apresentar os objetivos a serem desenvolvidos no trabalho.

O Capítulo II contém a revisão bibliográfica sobre processo de microfresamento, com ênfase nos seguintes tópicos: aços ferramenta AISI H13, efeito escala, desgaste de ferramenta, rugosidade e formação de rebarbas.

No Capítulo III é descrito o procedimento experimental utilizado, abordando a caracterização do aço ferramenta AISI H13, máquina-ferramenta, ensaios de microfresamento, desgaste de ferramentas, medição da rugosidade e análise de rebarbas.

O Capítulo IV contém os resultados dos experimentos e discussões envolvidas.

Finalmente, no Capítulo V apresenta as conclusões gerais do trabalho, seguido de sugestões para trabalhos os próximos trabalhos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Visando o estudo das condições de corte do microfresamento do aço ferramenta AISI H13, este trabalho reúne os principais conceitos do processo de microfresamento. Na seção 2.1, são apresentadas a classificação dos aços ferramenta, aplicabilidade e propriedades, em específico do aço ferramenta AISI H13. Na sessão 2.2, as principais definições de microusinagem e suas aplicações, e posteriormente, na seção 2.3 introduz-se o processo de microfresamento, com as suas particularidades em comparação com o fresamento. Nas sessões 2.4, 2.5, 2.6, apresenta-se o estudo das ferramentas de corte, rugosidade superficial e formação de rebarbas.

2.1 Aço Ferramenta AISI H13

Os aços ferramenta desempenham uma grande relevância na indústria metal-mecânica, em diversos setores, em razão das propriedades mecânicas, disponibilidade e baixo custo que estes materiais apresentam. Segundo Gabardo (2008), os aços ferramenta constituem uma das bases do desenvolvimento dos processos industriais.

Os aços ferramenta são ligas com alto teor de carbono contendo, geralmente cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio, esses elementos de liga combinam-se com o carbono para formar carbonetos, muito duros e resistentes ao desgaste (CALLISTER, 2000). Os aços ferramenta foram desenvolvidos para obter alta resistência a temperaturas elevadas, boa resistência à corrosão, alta dureza e boa resistência ao desgaste (CHIAVERINI, 1979, FALLBÖHMER et al., 2000).

A Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE), o Instituto Americano de Ferro e Aço (AISI - *American Iron and Steel Institute*) e a Sociedade Mecânica para Ensaio de Materiais

(ASTM) são responsáveis pela classificação e especificações dos aços e de outras ligas. O AISI classifica os aços conforme sua composição química, tratamento térmico e aplicações, como mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação AISI de aços ferramenta.

	Símbolo	Descrição
	W	Aço temperáveis em água (Water)
	S	Aços resistentes aos choque (Shock)
Aços para fins especiais	L	Tipo baixa liga
	F	Tipo carbono-tungstênio
	P	Aços para moldes
Aços para trabalho a frio	O	Aços temperáveis em óleo
	A	Aços média liga, temperáveis ao ar
	D	Aços de alto carbono, alto cromo
Aços para trabalho a quente	H01 - H19	A base de cromo
	H20 - H39	A base de tungstênio
	H40 - H59	A base de molibdênio
Aços rápidos	T	A base de tungstênio
	M	A base de molibdênio

Dentre os aços para trabalho a quente (série H), os mais comercializados são os aços a base de cromo, especialmente H11, H12 e H13. Esses aços foram desenvolvidos originalmente para a fundição de ligas de alumínio, em virtude da resistência às trincas.

Segundo Chiaverini (1979), o aço ferramenta H13 é o material mais conhecido e mais utilizado para a fabricação de matrizes que são usadas em fundição, extrusão e forjamento.

Os pesquisadores Robert, Krauss e Kennedy (1998) citam ainda que o aço ferramenta AISI H13 apresenta alta temperabilidade e tenacidade, a superfície de contato é propensa a desgastes consideráveis, caso seja submetida a altas cargas, temperaturas e ambientes corrosivos. A fabricação de moldes e matrizes exige um tratamento térmico adicional do aço ferramenta AISI H13 para melhorar a resistência ao desgaste e sustentar a temperatura elevada dos metais fundidos (ROBERTS et al., 1998)

A composição química e as propriedades mecânicas do aço ferramenta AISI H13, são mostradas, respectivamente, nas Tabela 2.2 e 2.3:

Tabela 2.2 - Composição química nominal, em massa, do aço ferramenta AISI H13 (ASM Internacional, 2005).

Elementos	Carbono (C)	Silício (Si)	Manganês (Mn)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Molibdênio (Mo)	Vanádio (V)
Concentração (%)	0,32 – 0,45	0,80 – 1,20	0,20 -0,50	4,75 – 5,30	0,30 máx	1,10 – 1,75	0,80 – 1,20

Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas do AISI H13 (ASM INTERNATIONAL, 1990; BRYSON, 2009; MACHADO et al., 2015).

Densidade (g/cm³)	Dureza (HRC) a quente 540 °C	Dureza (HRC) Usual de trabalho	Energia de impacto (J)	Coefficiente de expansão térmica (μm . m⁻¹. K⁻¹)	Usinabilidade (%)
7,87	55 / 42	40-53	92	10,4 e 13,1	70

O aço ferramenta AISI H13 recozido apresenta uma matriz ferrítica com uma quantidade considerável de carbonetos secundários esferoidizados (partículas escuras), (GABARDO, 2008) sendo um material bastante homogêneo, com estrutura de grão muito fino. A fração volumétrica de carbonetos é de aproximadamente 3,5 a 4,5 % (VENDRAMIM, 2014). A representação da microestrutura desse material é mostrada na Figura 2.1.

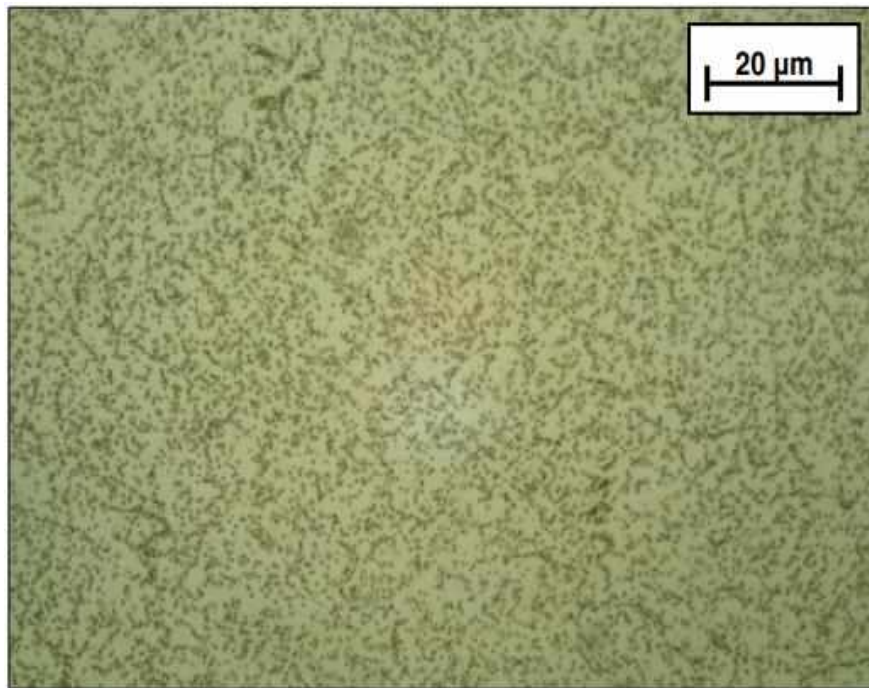


Figura 2.1 - Microestrutura do aço ferramenta AISI H13 (GABARDO, 2008).

O aço ferramenta AISI H13 é capaz de atingir o endurecimento secundário e, portanto, as melhores propriedades, quando o revenimento alcança temperaturas superiores a 500 °C, conforme apresentado na Figura 2.2:

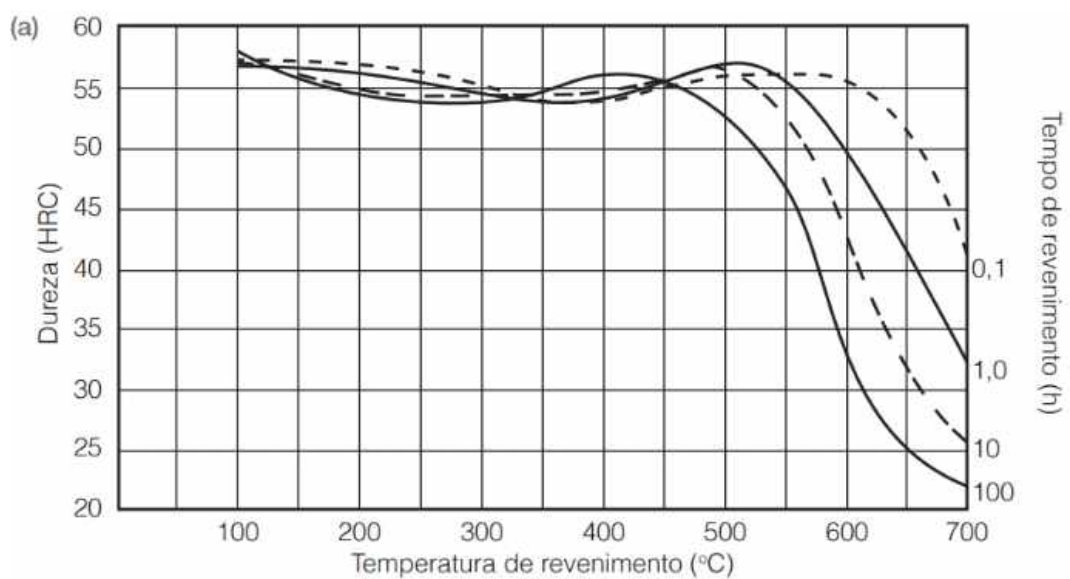


Figura 2.2 - Efeito do tempo e temperatura de revenimento sobre a dureza do aço ferramenta H13 (VENDRAMIM, 2014).

O resfriamento da matriz após o forjamento deve ser feito de forma lenta, para que não ocorra a transformação da martensita, que pode ocasionar a formação de trincas (GABARDO, 2008).

As operações de fresamento com aços endurecidos têm sido amplamente utilizadas na fabricação de moldes e matrizes devido ao seu alto desempenho em condições de operação (ARRUDA, 2019).

Para Umbrello (2011), a integridade superficial do ferramental é um dos requisitos mais específicos dos clientes. Segundo o autor, em geral, as principais indicações da integridade superficial de peças usinadas são a rugosidade e a tensão residual. O fresamento de aços endurecidos com altas velocidades oferece tolerâncias dimensionais apertadas e excelentes acabamentos superficiais em tempos de usinagem relativamente curtos, razão pela qual o processo substitui a eletroerosão em determinadas aplicações (ORTNER, 2007).

Segundo Sudhakar (2007) e Grzesik (2008), os fabricantes de moldes e matrizes têm utilizado regularmente técnicas de fresamento de aços endurecidos com altas velocidades para minimizar os custos por peça enquanto se prolonga a vida do molde ou matriz. A microusinagem de aço endurecido apresenta uma diferença nos requisitos funcionais das ferramentas de corte, sendo um desafio devido à imprevisível vida da ferramenta.

2.2 Microfresamento

O processo de fabricação de uma peça metálica passa por diversas fases, dentre elas, a produção do material na forma de um produto semiacabado: barras, chapas ou fios, obtidos pelos processos de fundição, laminação, entre outros. Em seguida, por sua vez o produto passa por processos de estampagem ou usinagem, a fim de dar forma e atingir os requisitos necessários do projeto (CHIAVERINI, 2008).

Segundo Ferraresi (1969), o processo de usinagem pode ser definido como uma operação que confere à peça forma, dimensões ou acabamento, e conseqüentemente produz cavaco, e este entende-se como a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular.

Ao diminuir a escala do processo convencional de fresamento, utiliza-se ferramentas de diâmetro micrométricos, e denomina-se como processo de microfresamento (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2006). A classificação dos processos de microusinagem é análogo aos processos de usinagem convencional e é dividido em: microusinagem convencionais, não

convencionais e híbridos. No processo de microusinagem convencional, ocorre a interação entre uma ferramenta e uma peça que resulta em uma ação de cisalhamento e ocorre a remoção do material, como no microtorneamento, microfresamento e microretificação.

A microusinagem é um dos principais processos de manufatura que permite a fabricação das peças miniaturizadas e a usinagem de microdetalhes. A miniaturização tem o desafio de produzir componentes cada vez menores, com redução de massa, consumo de energia e espaço. (SERJE, PACHECO, DIEZ, 2020).

A fabricação de características na microescala é mais desafiadora, e tem sido o tema de pesquisa intensiva e desenvolvimento. A necessidade de maior exatidão e precisão, mesmo para detalhes do produto acabado (que também pode ter dimensões muito pequenas), só pode ser atendida com usinagem micromecânica. A microfabricação também contribui para o desenvolvimento de características estruturais pequenas e complexas em peças grandes, aprimorando a funcionalidade delas.

Um requisito das peças microfesadas é a fabricação com estreitas tolerâncias dimensionais. A microusinagem é normalmente utilizada para usinar componentes em três dimensões em diferentes aplicações (MOUGO, 2016), sendo possível alcançar resultados de ultra precisão em relação a rugosidade e integridade da superfície usinada (CHENG; HUO, 2013).

Definir o processo de microusinagem não se tornou uma tarefa fácil, visto que há diferentes definições entre os pesquisadores. Câmara et al. (2012), entende que a microusinagem requer que a espessura mínima de corte e os grãos do material possuem dimensões comparáveis ao raio da ferramenta. Masuzawa (1997), define o processo de microusinagem diante do tamanho da ferramenta utilizada, no qual deve possuir dimensões entre 1 μm e 999 μm .

Segundo Chae, Park e Freiheit (2006) algumas particularidades da tecnologia de usinagem convencional são equivalentes, aos do processo de microusinagem, no entanto, existem algumas características específicas associadas à microfabricação. (CHAE, PARK e FREIHEIT, 2006).

Diante de uma escala tão reduzidas, fatores como relação entre raio da aresta de corte e a espessura mínima do material não deformado, tamanho de grão e propriedades mecânicas do material usinado, geometria e material da ferramenta de corte e forças de usinagem passam a governar o processo e não podem ser desconsiderados (LAI et al., 2008; LIU, SHI e WAN, 2013). Na Tabela 2.4, são apresentados os parâmetros que comandam o processo de

microfresamento, segundo o material, ferramenta de corte e máquina-ferramenta. (CÂMARA et al., 2012 e CHUKEWAD, 2014)

Tabela 2.4 - Parâmetros a serem analisados no microfresamento (GOMES, 2022, CÂMARA et al., 2012 e CHUKEWAD, 2014).

Material	Ferramenta de corte	Máquina-Ferramenta
Tamanho do Grão	Material	Velocidade de corte
Dureza	Rigidez	Precisão do posicionamento
Homogeneidade	Raio da aresta de corte	Rigidez
Defeitos	Tamanho do grão	Amortecimento
Impurezas	Revestimentos	Estabilidade térmica
Recuperação Elástica	Consistência do lote	Compensação de erros

2.3 Efeito Escala

Diante das reduções da escala presentes no processo de microfresamento, surge o fenômeno denominado efeito escala, que afeta forças de corte, desgaste da microferramenta e formação de cavacos (SIMONEAU; NG; ELESTAWI, 2006). O fenômeno é capaz de explicar como um material se comporta diferente em processos com escala reduzida. (MOUGO., 2016)

De acordo com o Bissacco et al. (2005), a remoção de material por cada aresta em corte é reduzida, entretanto o tamanho de grão do material e o raio de aresta da ferramenta não reduzem na mesma proporção, como ilustrado na Figura 2.3.

Sendo assim, o raio da aresta de corte (r_e) torna-se significativo em comparação com a espessura de cavaco indeformado (h). Isto faz com que o ângulo de saída efetivo passa a ser negativo ($-\alpha$) e a formação do cavaco ocorra na região do raio da aresta de corte da ferramenta (r_e) causando maiores esforços na ferramenta (ARAMCHAROEN; MANTIVENGA, 2009). Isto leva a prevalecer o efeito *ploughing*, ou sulcamento, além de cisalhamento para formação do cavaco. Esta situação está ilustrada na Figura 2.4.

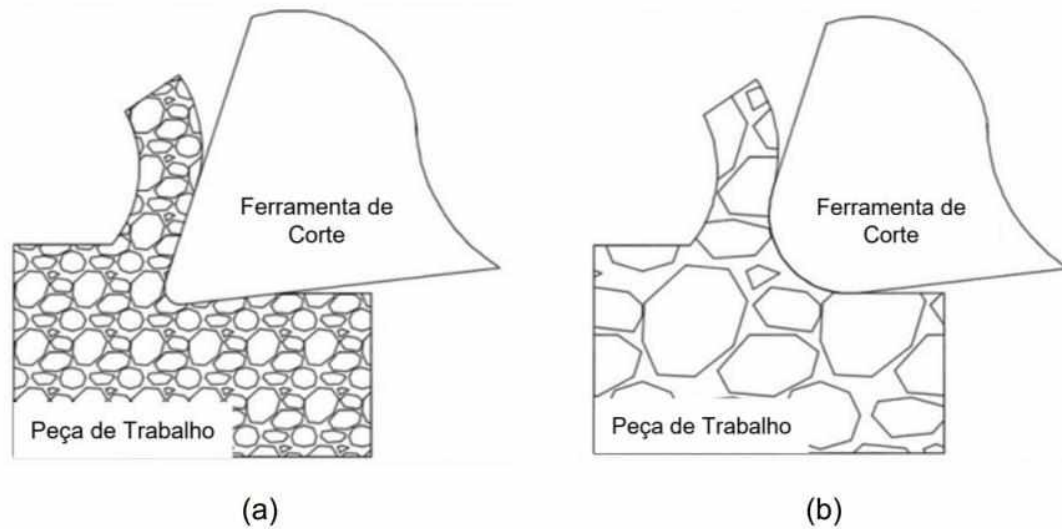


Figura 2.3 - Comparação entre o tamanho dos grãos do material usinado e o raio da aresta de corte (a) usinagem convencional e (b) microusinagem (Adaptado de ELKASEER et al., 2018).

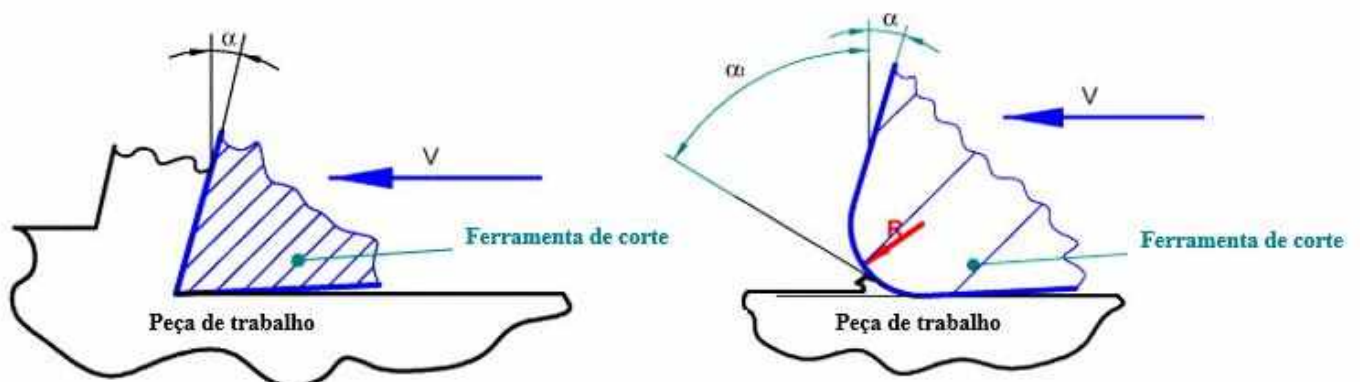


Figura 2.4 - Esquema da aresta de corte em (a) macroescala convencional e (b) corte em microescala (BISSACCO; HANSEN; DE CHIFFRE, 2005; ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

O mecanismo *ploughing* ocorre quando o material se deforma elasticamente e/ou plasticamente com a ação da ferramenta, causando efeitos significativos na formação de rebarbas, a rugosidade da superfície e o desgaste da ferramenta (DRIVER; MATIVENGA, 2009), visto que apenas uma região do material sofre deformação plástica (FILIZ et al., 2007).

Numa operação de microfresamento de topo, o *ploughing* será predominante na entrada e saída da ferramenta, e a formação de cavaco ocorre na região cisalhamento, quando o a espessura de corte se torna maior que uma espessura mínima necessária para que ocorra o cisalhamento, como mostrado na Figura 2.5, que mostra a variação da espessura de corte numa vista no plano de trabalho. A espessura de corte (h) varia de zero até o avanço por dente durante o fresamento discordante e depois retorna para zero no fresamento concordante.

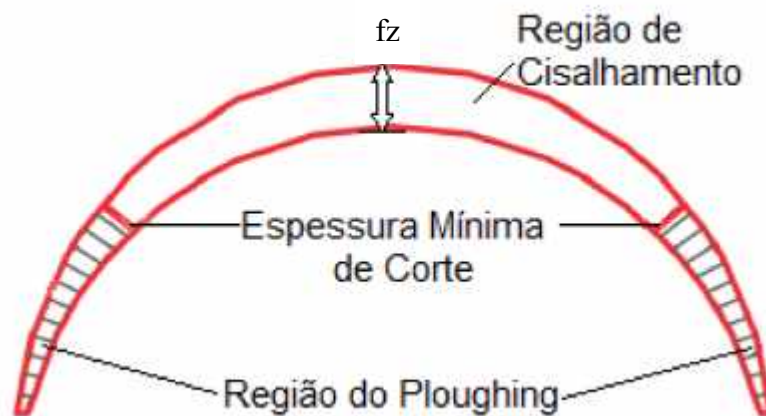


Figura 2.5 – Variação da espessura de corte no microfresamento de topo, vista no plano de trabalho.

A remoção de material depende da espessura de corte (h) e a espessura mínima (h_m), conforme mostrado na Figura 2.6 (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006). Segundo Chae et al. (2006), o valor da espessura mínima está relacionado diretamente com o raio da aresta de corte e o material da peça.

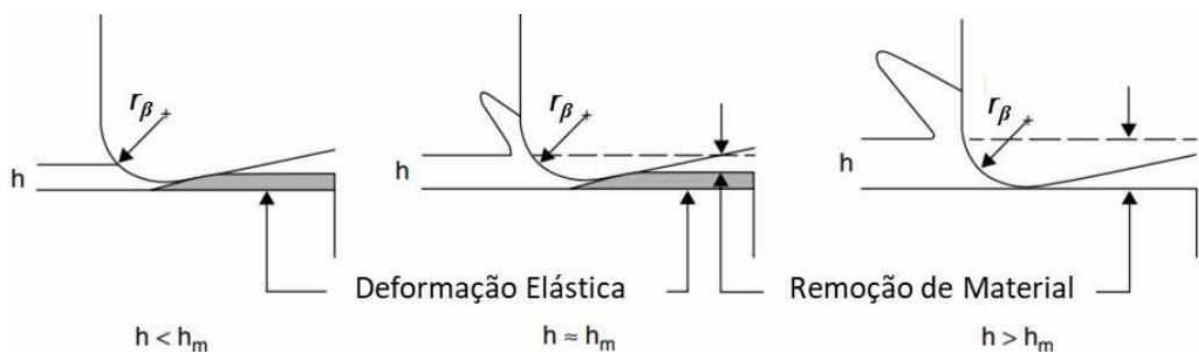


Figura 2.6 - Formação do cavaco em relação a mínima espessura de corte (adaptado de CHAE et al., 2006).

Observa-se que em:

- (a) $h < h_m$, ocorre deformação elástica e a microfresa não remove nenhum material da peça. A relação entre os ângulos da superfície de folga da ferramenta e da superfície da peça possuem um baixo valor;
- (b) $h \approx h_m$, ocorrência do efeito *ploughing*, no qual a espessura de corte se aproxima da espessura mínima e os cavacos removido por cisalhamento enquanto outra porção de material sofre deformações plástica e elástica;
- (c) $h > h_m$, remoção do material por cisalhamento, podendo desprezar a deformação do material.

Segundo Vázquez et al., (2015), para que ocorra a estabilidade do processo de microfresamento é preciso que o avanço por dente seja ao menos 30% do raio da aresta de corte. Liu et al., (2006), afirma que também é preciso considerar as propriedades do material e a velocidade de corte. Para Yuan et al (1996), determina que espessura mínima de corte esteja entre 20 e 40% do raio de aresta.

2.4 Energia Específica de Corte

Um das consequências do efeito escala na microusinagem é o aumento não linear da energia específica de corte com a redução da espessura de corte, ou seja, o aumento da energia por unidade de volume de material removido (LIU E MELKOTE, 2007).

Para entender este aumento da energia específica de corte, é necessário compreender a definição da energia específica. A pressão específica, (k_s) é matematicamente definida pela Equação 1 (Ferraresi, 1970):

$$k_s = \frac{F_c}{A} = \frac{F_c}{a_p \cdot f_c} \quad (1)$$

onde F_c é a força de corte e a A é a área da seção transversal de corte, determinada pelo produto da profundidade ou largura de corte a_p com o avanço f_c , para um corte ortogonal. A pressão específica de corte é dada em N/mm².

Ao multiplicar o numerador e o denominador da Equação 1 pela velocidade de corte v_c , define-se um importante fenômeno de usinagem, denominado energia específica de corte u , que é a energia necessária para remover uma unidade de volume de material na unidade de

tempo. Segundo Rodrigues (2005), a manipulação algébrica mostrada na Equação 2 não altera matematicamente o resultado.

$$u = \frac{F_c}{a_p \cdot f_c} \cdot \frac{v_c}{vc} \quad (2)$$

Nos processos convencionais de usinagem é esperado que a energia específica de corte seja constante para um determinado material, independente das condições de corte. No entanto, quando se tentar estimar a energia específica de corte para um processo de microusinagem, observa-se um aumento não linear da mesma com a diminuição da espessura de corte. A Figura 2.7, mostra um exemplo da variação da pressão específica de corte para um alumínio comercialmente puro. Neste caso, como a velocidade de corte é constante, a variação da energia específica acompanha a variação da pressão específica de corte.

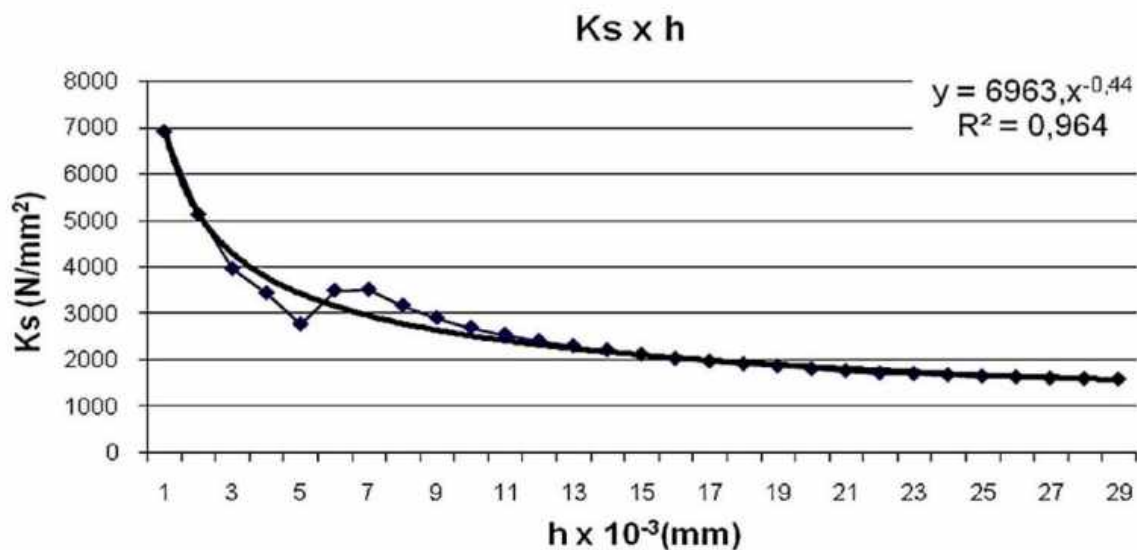


Figura 2.7 - Pressão específica em função da espessura do material no corte ortogonal de alumínio (DA SILVA, 2014).

Pesquisas desenvolvidas por Kopalinsky e Oxley (1984) no aço 1045 apontam que a espessura de corte (h) reduzida entre 0,20 mm e 0,01 mm faz com que a pressão específica de corte mais do que duplique. A Figura 2.8 mostra alguns exemplos da literatura. Observa-se por exemplo, que a diminuição do avanço, faz com que a pressão específica de corte para um aço ferramenta ultrapasse o valor de 5 000 N/mm^2 .

Esse aumento da energia específica de corte, ou da pressão específica de corte, pode ser explicado, em parte, pela contribuição do trabalho redundante na microusinagem devido a forças de atrito e deformação elástica/plástica dos materiais envolvidos. Contribuição que pode ser desprezada nos processos de usinagem convencional, devido à grande energia necessária para cisalhar o material e formar cavaco.

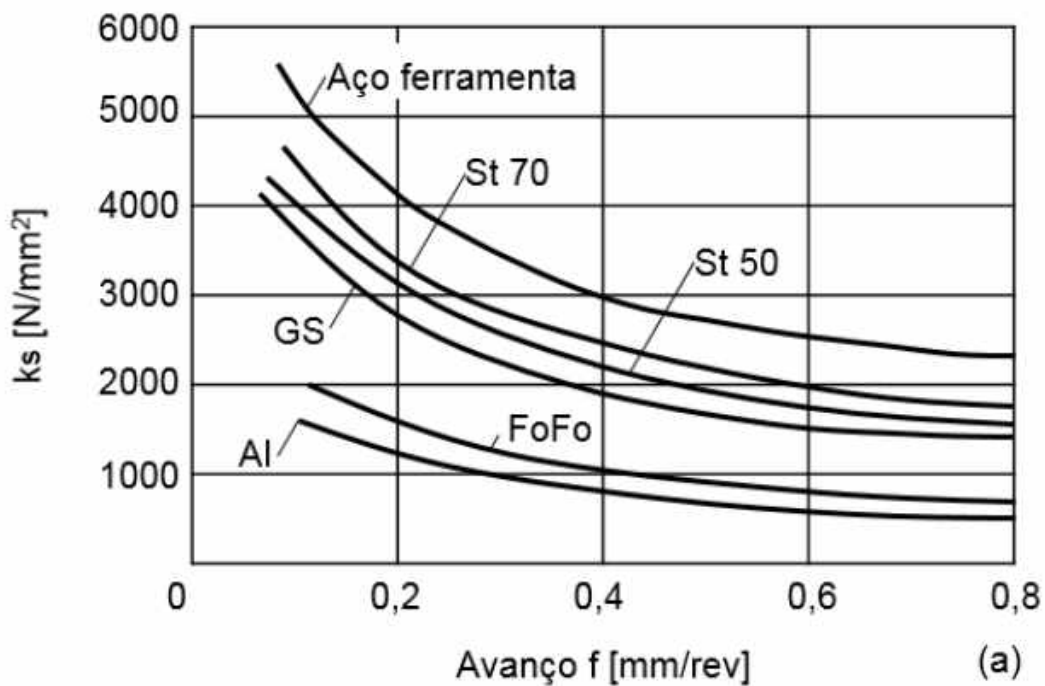


Figura 2.8 - Influência do avanço de corte na pressão específica (FERRARESI, 1970).

2.5 Microferramentas

A geometria das microfresas disponíveis comercialmente, são normalmente variações em escala micrométrica das fresas convencionais. É possível encontrar microfresas com diâmetros na faixa de 25 μm a 1000 μm . Geralmente as microferramentas possuem duas ou quatro arestas (CHENG; HUO, 2013).

A geometria das fresas é constituída por superfícies de folga principal e secundária, superfície de saída e arestas de corte principal e secundária, conforme observa-se na Figura 2.9:

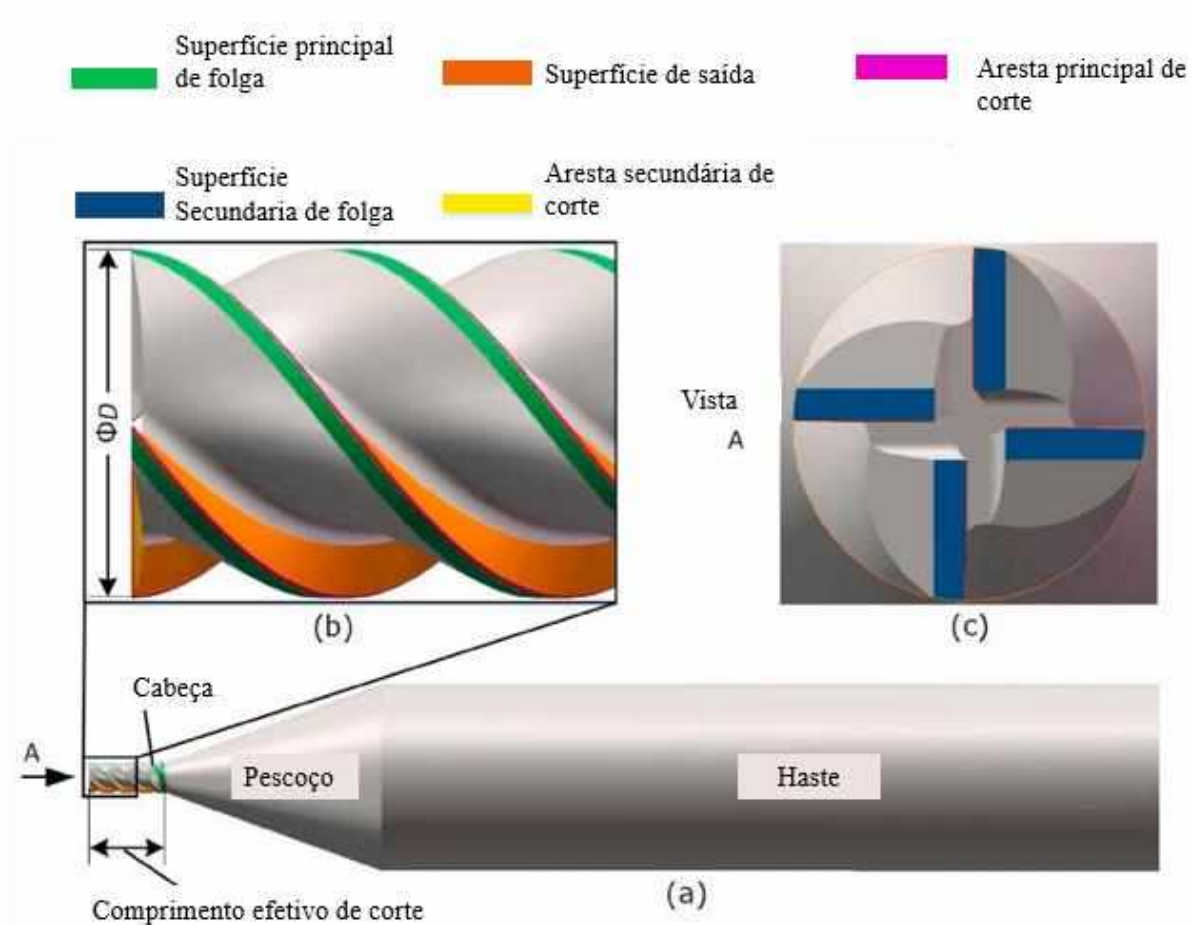


Figura 2.9 - Geometria genérica de uma microfresa de 4 arestas: (a) ferramenta inteira, (b) vista lateral e (c) vista de topo (adaptado de CHEN et al., 2021).

Observa-se que as ferramentas disponíveis para microfresamento possuem as mesmas geometrias e os mesmos elementos das ferramentas utilizadas convencionalmente. (FLEISCHER et al., 2008). Sendo assim, são projetadas e fabricadas de acordo com o conhecimento dos processos convencionais. Destaca-se que, no caso de microfresas, o raio de aresta fica em torno de 1 a 5 μm (URIARTE; AZCARATE; HERRERO, 2006). Pode-se destacar que as principais propriedades necessárias para os materiais de ferramentas de corte são: dureza, tenacidade, resistência ao desgaste, estabilidade química e resistência à fadiga, alta resistência à tração e ao cisalhamento (EZUGWU; WANG, 1997 e KALPAKJIAN; SCHMID, 2008). O principal material utilizado para fabricação de microfresas é o metal duro, que representa cerca de 85% das ferramentas utilizadas, com ou sem revestimento (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Também é possível encontrar microfresas com os mesmos revestimentos normalmente utilizados em fresas convencionais. Os revestimentos mais utilizados são: TiN, AlCrN, AlTiN e TiAlN (CHEN et al., 2021). Além de alterar as propriedades da ferramenta, espera-se reduzir o desgaste da ferramenta e melhorar o desempenho do processo.

A fabricação das microferramentas necessita ser rigorosa para que haja alta exatidão e baixos desvios dimensionais, tendo em vista que erros provocados pela alterações no diâmetro da ferramenta pode-se tornar grande quando comparados com os parâmetros do processo, (JUN et al., 2007). O desempenho das microferramentas é influenciado por pequenas vibrações e forças excessivas, que podem prejudicar a vida das ferramentas e as tolerâncias das peças microusinadas.

2.5.1 Desgaste das microferramentas

A análise de desgaste de microferramentas segue o mesmo tratamento das ferramentas convencionais. As arestas de corte de uma ferramenta de usinagem normalmente se desgastam seguindo o padrão ilustrado na Figura 2.10. Este padrão de comportamento do desgaste é observado em diversos processos de usinagem, incluindo rosqueamento. Neste padrão, a taxa de desgaste pode ser dividida em três estágios: I, II e III.

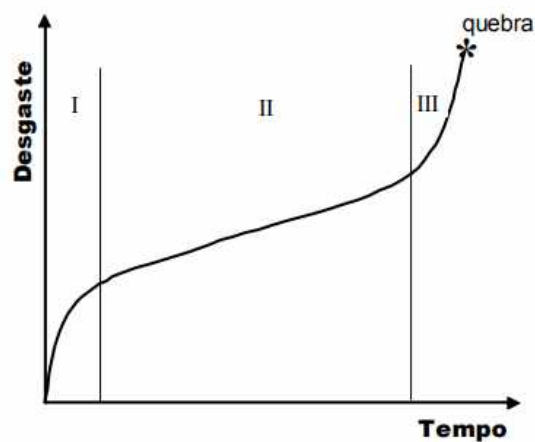


Figura 2.10 - Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte. (MACHADO et al., 2011).

Inicialmente, nos primeiros minutos de corte, a ferramenta sofre um desgaste acelerado, em razão da adequação do sistema tribológico, como se a cunha cortante estivesse se acomodando ao processo. No estágio II, evidencia-se uma taxa de desgaste constante ao longo do tempo. A ferramenta se adequa ao processo e os mecanismos específicos de desgaste operam numa taxa constante, até atingir uma nova inflexão. No estágio III, verifica-se o início de uma aceleração no desgaste, aumentando acentuadamente a taxa de desgaste, promovendo em curto espaço de tempo a quebra da ferramenta. (MACHADO et al., 2011).

Além do desgaste das arestas de corte, existem outras causas para a substituição da ferramenta no processo de usinagem. Em consequência dos choques térmicos e mecânicos presentes em cortes interrompidos. O lascamento devido a choque mecânico pode ser comum em microfresamento, devido à fragilidade da ferramenta.

Os mecanismos de desgastes mais comuns para ferramentas de corte são: adesão, abrasão e difusão, apesar de diferentes autores considerarem outros mecanismos de desgaste (UHLMANN et al., 2013). É possível classificar também a forma de desgaste, sendo eles: desgaste de cratera, desgaste de flanco e desgaste de entalhe, que podem ser identificados conforme a Figura 2.11.

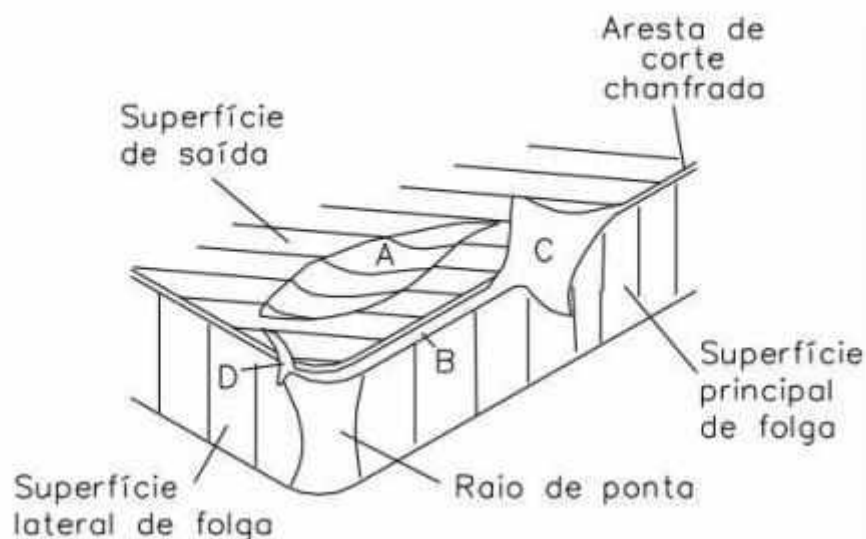


Figura 2.11 - Formas de desgaste da ferramenta (DEARNLEY; TRENT, 1982, MACHADO et al., 2011).

O desgaste das microferramentas é um tema bastante discutido nos estudos de microfresamento, visto que as ferramentas apresentam um comportamento imprevisível, podendo levar a falhas catastróficas (CÂMARA et al., 2012), além de apresentarem uma vida menor se comparando com usinagem convencional (TANSEL et al., 2000)

A avaliação do desgaste em microferramentas é mais complexa devido ao tamanho reduzido das arestas de corte, sendo necessário até mesmo, por exemplo, o uso de microscópio eletrônico de varredura para averiguar a integridade das microfresas (lascamento, quebra etc.).

A norma ISO 3685 (1993) determina procedimentos para definir a vida de ferramentas convencionais. Entretanto, esta norma não pode ser aplicada em processos de microfresamento e ainda não há uma norma específica ou padronização ou mesmo adaptação dos procedimentos existentes. Assim, encontra-se diversas propostas de metodologias na literatura.

Uma das propostas de medição de desgaste utilizadas no LEPU para avaliar o desempenho de microfresas, foi sugerida por Ziberov et al. (2020). Este autores estudaram o microfresamento da liga de titânio Ti6Al4V com microfresas de metal duro revestidas com TiAlN e DLC. Foi proposta uma metodologia para medir os desgastes na superfície principal de folga, denominados (D1) e (D2), conforme ilustrado na Figura 2.12. Os valores de desgaste D1 e D2 são obtidos através de sobreposição de imagem da ferramenta nova com a imagem da ferramenta desgastada, na mesma escala. As cotas de desgaste são obtidas com o auxílio do software ImageJ calibrado com a escala disponibilizada pelo MEV.

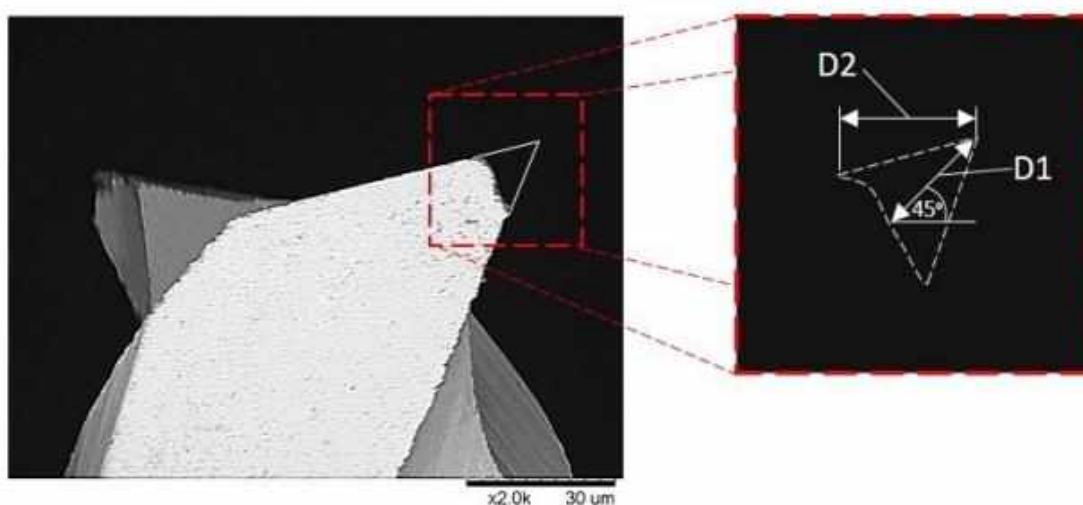


Figura 2.12 - Desgaste medido da superfície principal de folga (ZIBEROV et al., 2020).

A metodologia descrita anteriormente demanda muito tempo no MEV. Isto devido ao fato do correto posicionamento da ferramenta para obtenção da imagem. Assim, outra metodologia utilizada no LEPU foi a proposta por Gomes et al. (2020). Estes autores investigaram o microfresamento do aço inoxidável 316L, com microfresas de metal duro de diâmetro de 400 μm , revestidas com TiNAl. Neste caso, o desgaste é medido através de imagem de topo da ferramenta. Uma imagem da ferramenta desgastada é comparada com a imagem da ferramenta nova e a cota de desgaste é obtida novamente, com o auxílio do software *ImageJ*, conforme mostrado na Figura 2.13:

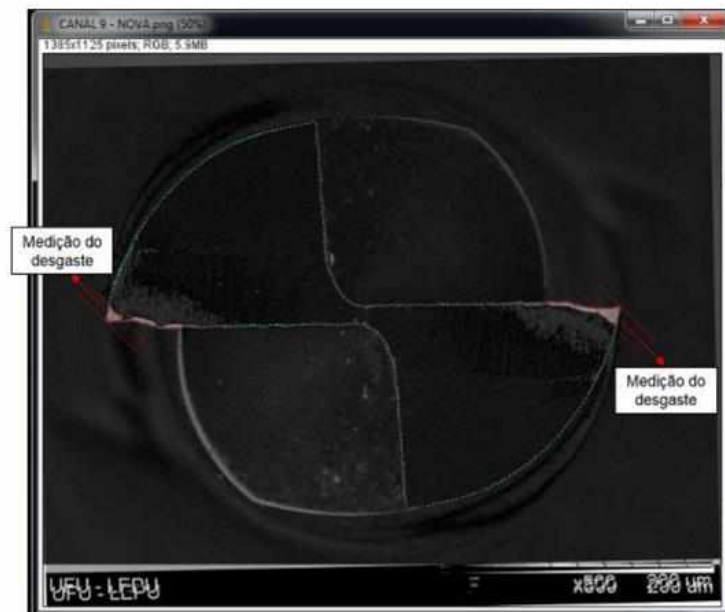


Figura 2.13 - Medição do desgaste da superfície de folga secundária (GOMES et al., 2020).

2.6 Rugosidade

O processo de microusinagem permite a obtenção de excelentes resultados de acabamento (tolerâncias dimensionais, geométrica e rugosidade). Laperrire e Reinhart (2014) afirmam que a tolerância geométrica e dimensional alcançáveis no microfresamento pode ser inferior a 5 μm , à medida que a rugosidade da superfície usinada R_a pode atingir menos de 100 nm. A Figura 2.14 compara as dimensões de superfícies com a qualidade da superfície em função da rugosidade (R_a) entre os processos de microusinagem, usinagem laser, usinagem química de silício, retificação.

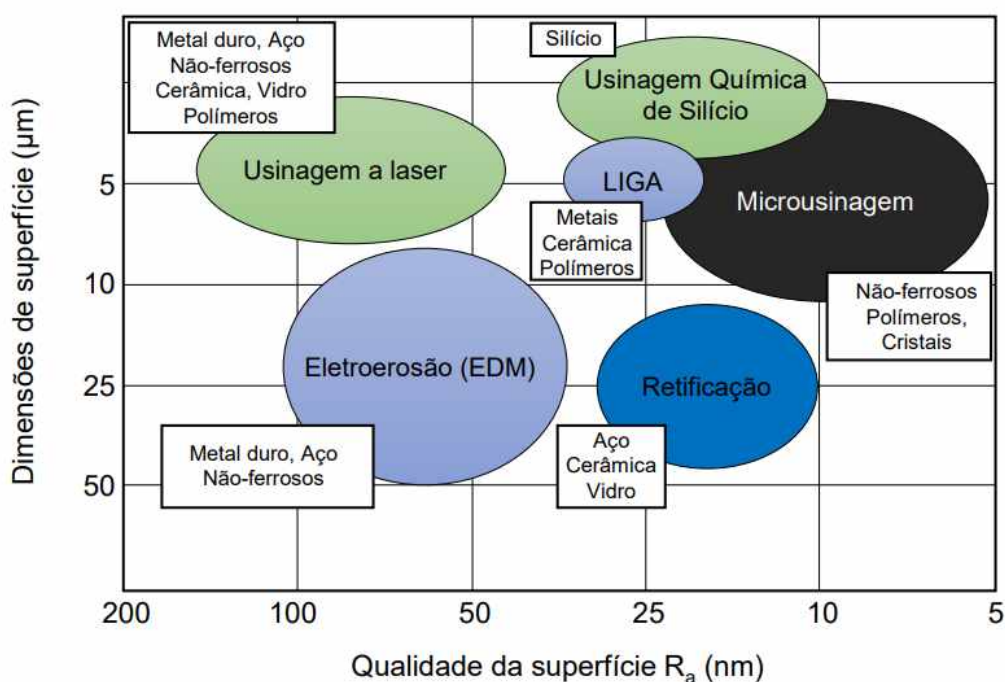


Figura 2.14 - Comparação do tamanho da peça e a rugosidade (R_a) de diversos processos (adaptada de BYRNE et al., 2003).

A qualidade de uma peça está diretamente relacionada com a rugosidade superficial, sendo na maioria dos casos, um requisito técnico, visto que a rugosidade pode afetar as propriedades ópticas e mecânicas dos materiais, alterando a funcionalidade e a confiabilidade dos componentes. (MACHADO, 2011; ARAMCHAROEN E MATIVENGA (2009); BENARDOS E VOSNIAKOS (2003).

De acordo com Ratnam (2016), diversos fatores influenciam a formação da superfície nos processos de usinagem. Os principais fatores são: máquina-ferramenta, condições de corte, geometria da ferramenta, condições ambientais, propriedades do material, formação de cavacos, desgaste da ferramenta e vibração. Em razão da complexidade do processo de microusinagem, a mínima alteração destes fatores pode danificar a superfície. A rugosidade nanométrica é facilmente influenciada por uma ampla variedade de fatores em um processo de corte complexo.

O acabamento superficial de uma superfície usinada é a combinação de vários fatores que podem ser divididos em: rugosidade, ondulações e falhas. Diferentes desvios de ordem que

são sobrepostos formam o perfil de rugosidade da superfície, como pode-se observar na Figura 2.15:

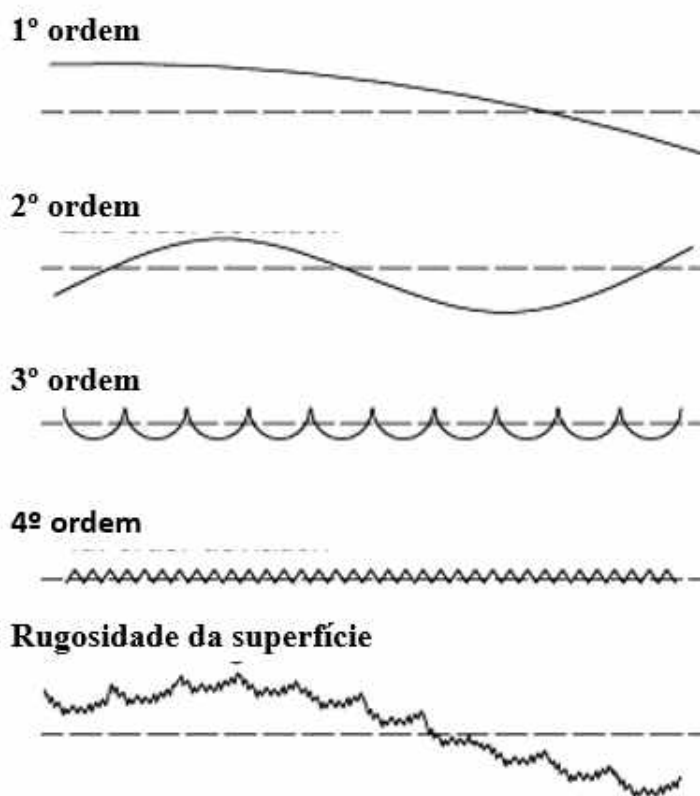


Figura 2.15 - Desvios de forma da superfície.

Sendo eles:

- i) Desvios de primeira e segunda ordem são referentes à forma, ou seja, planicidade, circularidade e ondulação, respectivamente, e são devidos a erros da máquina-ferramenta, deformação da peça, fixações errôneas, vibração e homogeneidade do material da peça.
- ii) Desvios de terceira e quarta ordem referem-se à forma e condição das arestas de corte, formação de cavacos e cinemática do processo.
- iii) Finalmente, os desvios de quinta e sexta ordem são causados pela estrutura do material da peça, que está ligada a mecanismos físico-químicos que atuam em escala de grão.

Os parâmetros de rugosidade 2D, por exemplo, desvio aritmético médio do perfil (Ra) e o desvio médio quadrático do perfil (Rq) são amplamente utilizados independentemente da aplicação da superfície avaliada.

A rugosidade (Ra) é o parâmetro mais usado universalmente para controle de qualidade geral. É definido como o desvio absoluto médio das irregularidades de rugosidade da linha média ao longo de um comprimento de amostragem. Este parâmetro é fácil de definir, fácil de medir e fornece uma boa descrição geral das variações de altura.

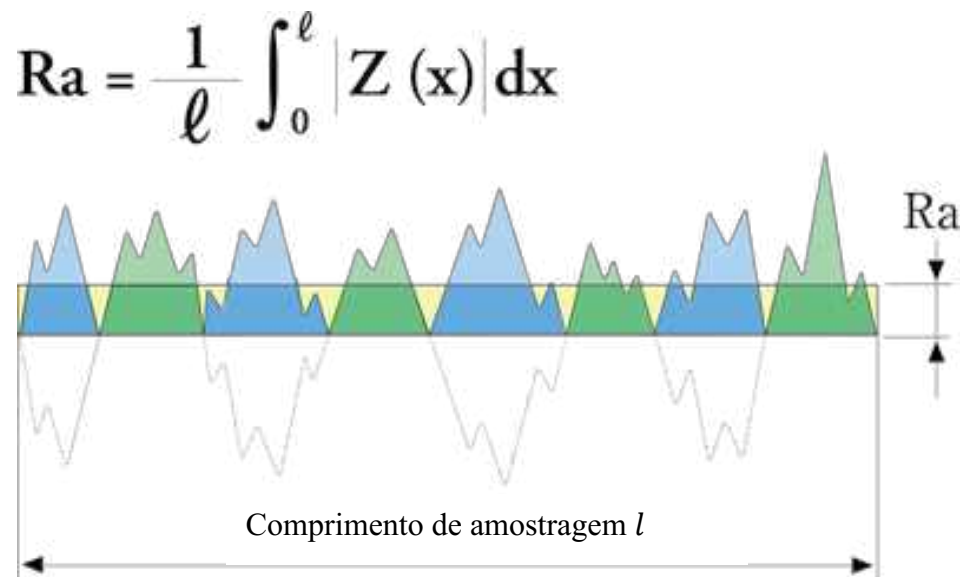


Figura 2.16 - Representação do Ra (Olympus, 2021).

A rugosidade (Rq) é o desvio padrão da distribuição das alturas superficiais, por isso é um parâmetro importante para descrever a rugosidade por métodos estatísticos. Este parâmetro é mais sensível que Ra grandes desvios da linha média.

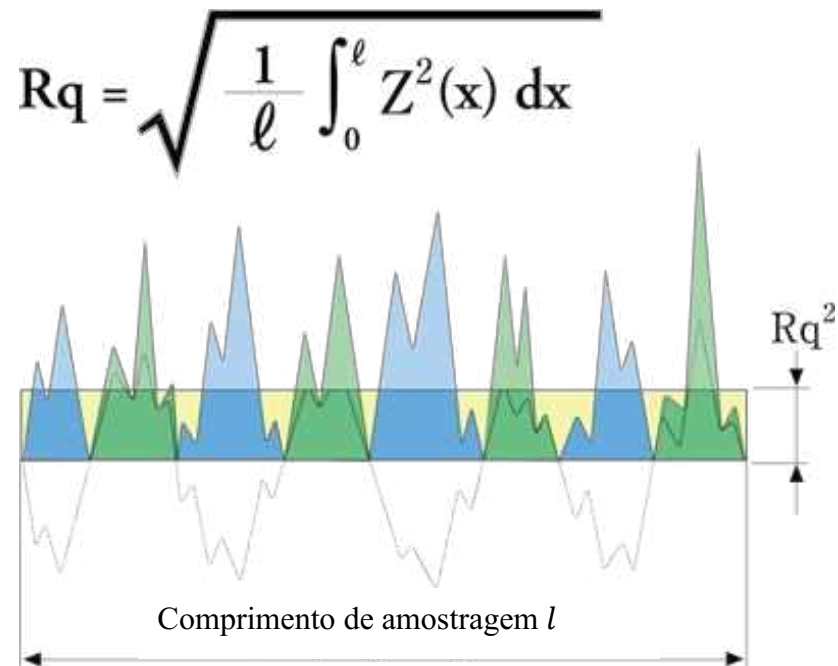


Figura 2.17 - Representação do R_q (Olympus, 2021).

2.6.1 Influência dos Parâmetros de Corte na qualidade superficial

Aramcharoen e Mativenga (2009) investigaram a rugosidade no microfresamento de aço ferramenta H13 com ferramentas de metal duro de $900 \mu\text{m}$ de diâmetro. Os resultados mostraram que a rugosidade atinge seu valor mínimo quando a espessura de corte é igual ao raio da aresta de corte, Figura 2.18. Quando a espessura de corte se torna menor do que o raio da aresta ($rr \leq 1$), ocorre o efeito *ploughing*, acarretando a diminuição da rugosidade com aumento da espessura de cavaco indeformado. Quando a espessura de corte estiver acima do valor do raio da aresta ocorre o aumento da rugosidade da superfície ($rr > 1$). Os autores também concluíram que a melhor rugosidade superficial no microfresamento do aço ferramenta H13 depende de uma combinação entre o ângulo de saída, que é muito negativo, e o efeito geométrico do avanço.

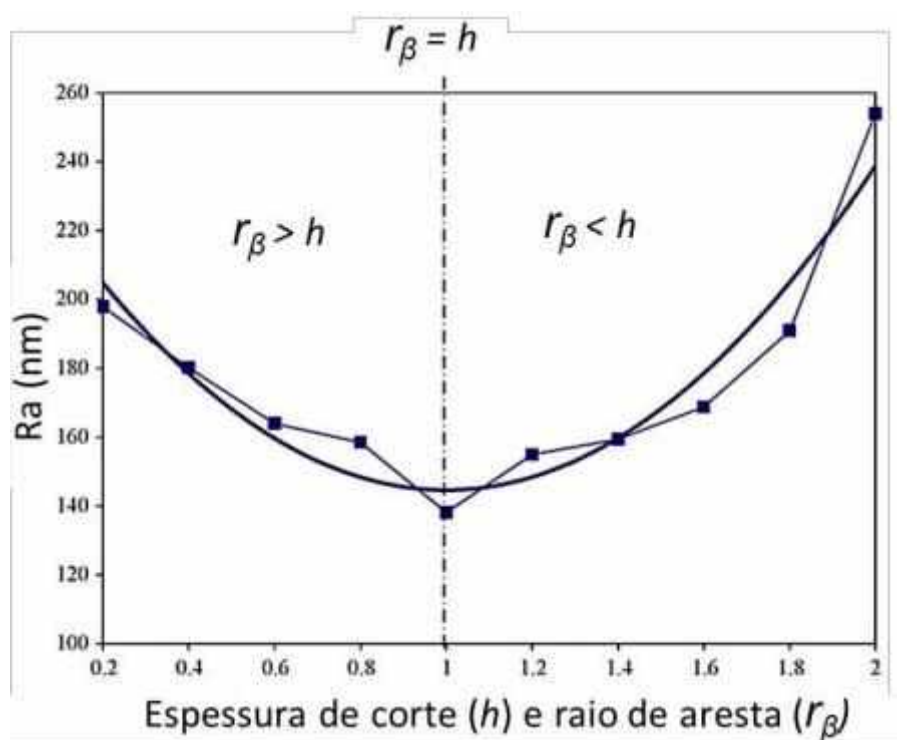


Figura 2.18 - Influência da relação entre a espessura do cavaco não deformado e o raio da aresta de corte no acabamento da superfície (ARAMCHAROEN E MATIVENGA,2009).

Segundo Cakir; Ensarioglu; Demirayak, (2009), o parâmetro mais significativo que afeta a rugosidade é o avanço, seguido da velocidade de corte. De uma maneira geral, quanto maior o avanço, maior será a rugosidade, pois o efeito do avanço é principalmente geométrico. Com relação à velocidade de corte, ocorre o efeito contrário, ou seja, a rugosidade tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte. O aumento da velocidade de corte melhora a qualidade superficial por fazer com o número de vezes que a ferramenta passe sobre a superfície gerada seja maior, além de promover uma melhor formação de cavaco (RODRIGUES, 2005)

Além das condições de corte, a rugosidade depende de outros fatores. Erros geométricos da máquina-ferramenta, vibrações, falta de rigidez do sistema, excentricidade da ferramenta e erros geométricos da própria ferramenta são exemplos de fatores que influenciam a qualidade de uma superfície microfresada. Considerando as altas rotações envolvidas no processo, baixas profundidades de corte e avanços, a qualidade do sistema (máquina ferramenta, mandril, pinça, sistema de fixação da peça etc.) tem grande influência no processo.

2.7 Rebarbas

As rebarbas são inevitáveis em qualquer processo de usinagem. Considerando as dimensões envolvidas num processo de microfresamento, as rebarbas são muito mais críticas neste processo em comparação com os processos convencionais. Olvera e Barrow (1996) e ASTM (1959), definem que rebarbas são projeções indesejáveis de material que ultrapassam os limites físicos da peça de trabalho devido à deformação plástica durante a usinagem. No processo de microfresamento, o controle da formação das rebarbas é de extrema importância, visto que elas apresentam tamanho proporcionalmente muito maiores quando comparadas com as dimensões da peça (LEKKALA, 2011).

As rebarbas prejudicam significativamente a qualidade da superfície usinada, prejudicando o desempenho almejado e as funcionalidades esperadas (O'Toole et al., 2020), como por exemplo, problemas na montagem de micropeças.

É comum qualquer utilizar um processo de remoção de rebarbas em peças usinadas. A rebarbação é uma operação para a retirada das rebarbas, porém pode provocar erros dimensionais e tensões residuais no componente mecânicos, além de aumentar o custo de produção, que pode chegar até 30% do custo total da peça. Desta forma, reduzir a formação de rebarbas, mesmo sendo um processo desafiador para o microfresamento, é a melhor solução (LEE; DORNFELD, 2005).

As rebarbas formadas num microfresamento podem ser classificadas de forma similar aos processos convencionais. Uma classificação muito utilizada é a que leva em consideração a posição e tipo de rebarba formada. Lee; Dornfeld (2002), propôs uma classificação de rebarbas para um processo de fresamento de topo, conforme a posição da rebarba, conforme ilustra a Figura 2.19.

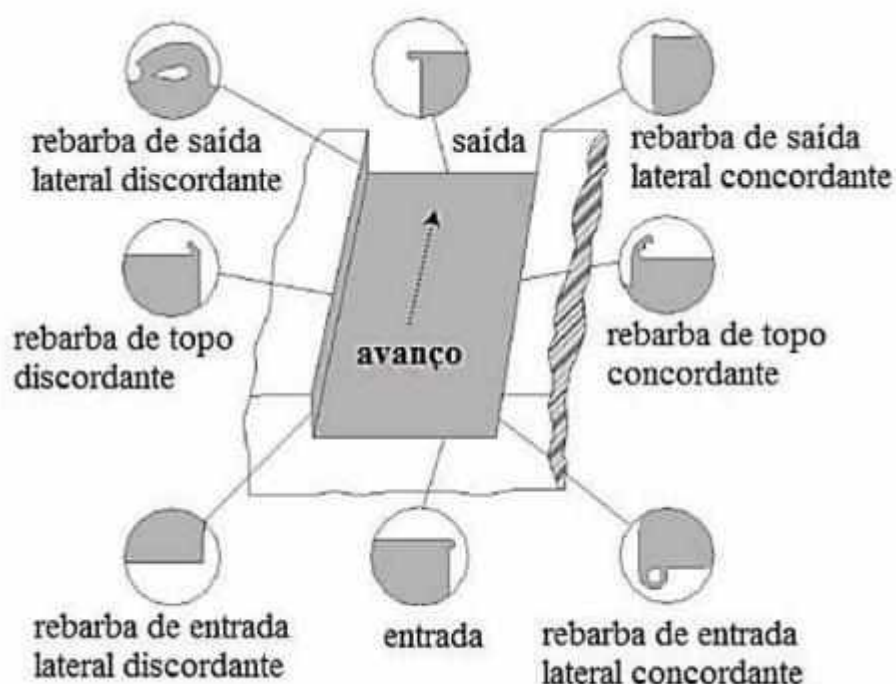


Figura 2.19 - Classificação das rebarbas quanto à posição (adaptado de LEE; DORNFELD, 2002).

Chern et al. (2007), classificou as rebarbas no microfresamento de topo quanto ao tipo na usinagem de uma liga de alumínio 6061-T6, sendo elas: (a) rebarba primária, (b) rebarba do tipo agulha, (c) rebarba do tipo pena e (d) rebarba menor, como mostrado na Figura 2.20. Estas nomenclaturas são bem adequadas para o presente trabalho.

Bao e Tansel (2000), apontaram que inicialmente a peça não se mostra livre de rebarba, mesmo com o uso de microferramentas novas, conforme a Figura 2.21. Também se verificou que as rebarbas aumentam significativamente em dimensão e densidade, com o aumento do desgaste da ferramenta.

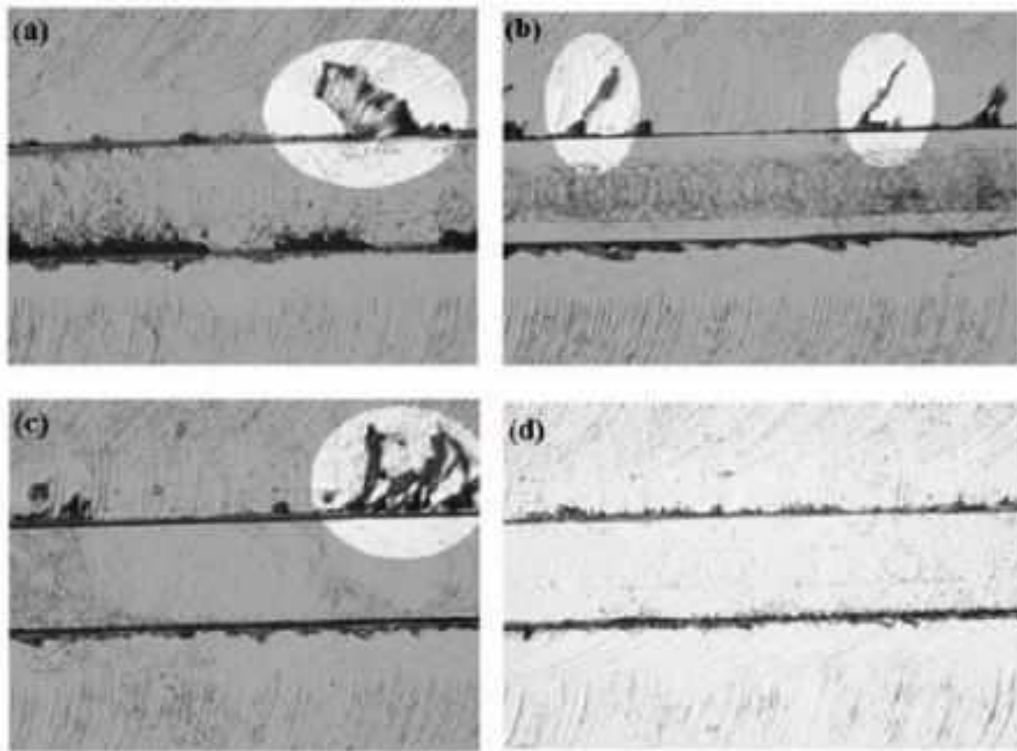


Figura 2.20 -Tipos de rebarbas encontrados na microusinagem quanto ao tipo: (a) primária, (b) agulha, (c) pena e (d) menor (CHERN et al. 2006).



Figura 2.21 - Progressiva formação de rebarba ao longo do desgaste da ferramenta. *escala da régua em polegadas (BAO; TANSEL, 2000)

Zhang, Yuan e Wang (2017) puderam analisar a influência das condições de corte no tamanho das rebarbas de topo. Os autores concluíram que com o aumento nos valores dos parâmetros ocorre um o aumento das dimensões das rebarbas.

Chen et al. (2020) também estudaram o comportamento das rebarbas de topo no microfresamento. O aumento da velocidade de avanço, proporcionou maiores rebarbas do lado concordante, entretanto com os valores menores que o raio de aresta, ocorre o fenômeno de sulcamento. Ao verificar a influência da profundidade de corte, percebe-se que para baixos valores o volume de rebarbas formadas é pequeno, e ao aumentar a profundidade, ocorre um aumento tanto nas rebarbas do lado concordante como discordante, isto ocorre devido ao aumento do volume de material deformado, os resultados são mostrados no gráfico da Figura 2.22.

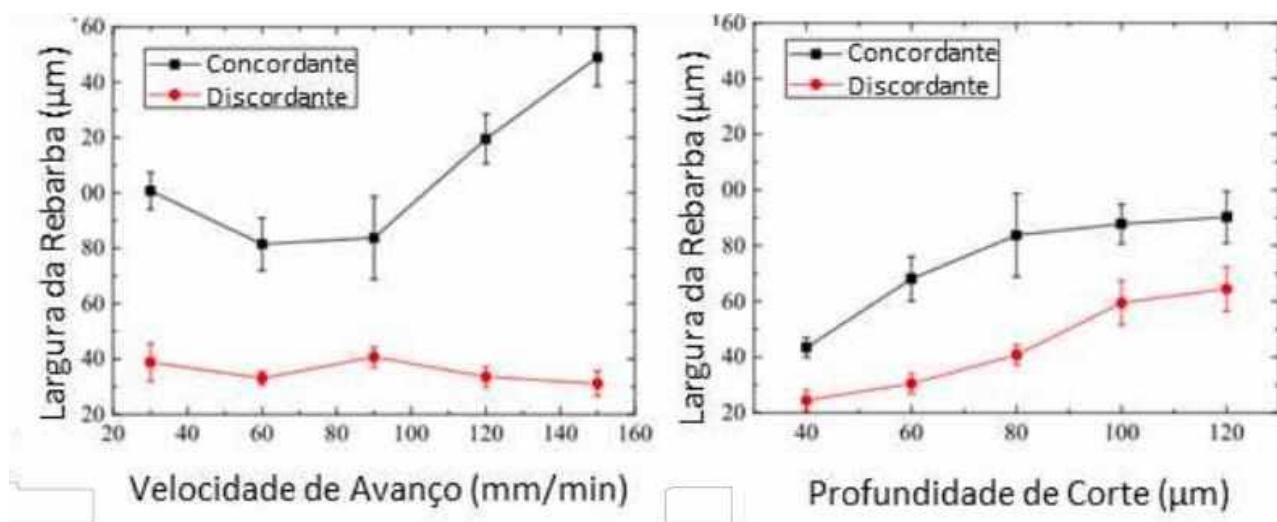


Figura 2.22 Relação entre largura da rebarba e parâmetros de corte: avanço e profundidade de corte (adaptado de CHEN et al., 2020)

A Figura 2.22 mostra resultados da variação da dimensão da rebarba em função de velocidade de corte e avanço. No entanto, uma grande dificuldade, não só na microusinagem, mas para todos os processos de usinagem, é a quantificação da rebarba: altura, largura etc. Dos Santos (2020), propôs uma metodologia para quantificar as rebarbas através da área da rebarba. A área das rebarbas foram medidas através de análises de imagens obtidas no MEV.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos experimentais para avaliar a usinabilidade do aço ferramenta AISI H13 no processo de microfresamento. Inicialmente, foram preparadas e caracterizadas as amostras do material. Neste capítulo também são fornecidas as principais características das microferramentas usadas e detalhes dos equipamentos utilizados para realização dos ensaios de microfresamento, medição de rugosidade e avaliação das superfícies usinadas. São apresentadas as metodologias usadas para a análise da rugosidade superficial, desgaste de ferramentas e formação de rebarbas nas peças.

O procedimento experimental consistiu basicamente em usinagem de micro canais no aço ferramenta AISI H13 utilizando microfresas de topo reto de duas arestas, 400 μm de diâmetro, e revestidas com TiAlN. Para isso foi utilizada uma microfresadora CNC de precisão. As ferramentas foram observadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para medição de desgaste e análise das formas e mecanismos de desgaste. Além da medição da rugosidade nos microcanais, os corpos de prova foram também observados no MEV para avaliação da integridade superficial e medição de rebarbas. O desenvolvimento do trabalho se deu no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU).

3.1 Caracterização das Amostras de aço ferramenta AISI H13

O material escolhido para a realização dos testes de microfresamento foi o aço ferramenta AISI H13. As amostras foram obtidas pelo processo de laminação e posteriormente passaram pelo tratamento térmico de recozimento a 690 °C por um período de 3 h 30 min. Posteriormente, o material foi submetido a taxa de resfriamento lento até 480 °C. O material foi recebido na forma de barra e preparado pelo processo de fresamento, a fim de conferir as dimensões finais do corpo de prova, conforme Figura 3.1

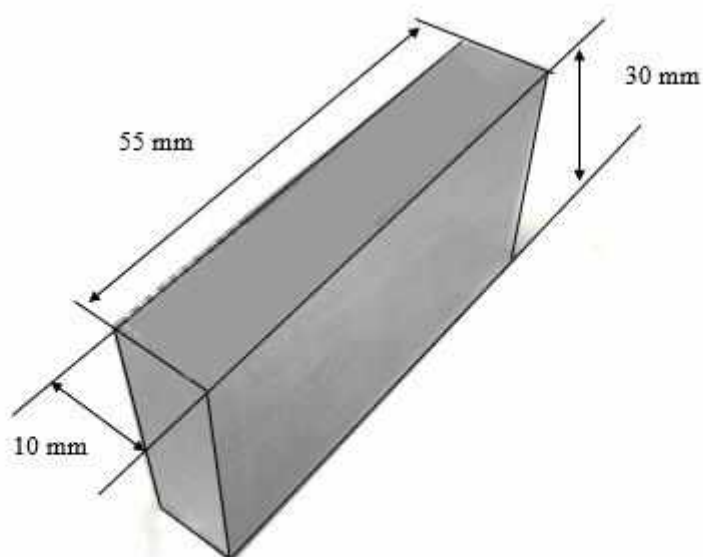


Figura 3.1 - Corpo de prova com as respectivas dimensões.

Para a análise metalográfica utilizou-se lixas de granulometria 220 mesh, 320 mesh, 600 mesh e 1200 mesh, e posteriormente a superfície foi polida com óxido de alumínio (alumina) de 1 μm . Em seguida, a amostra foi submetida ao ataque químico por imersão durante 15 s em uma solução química de 10 % ácido nítrico (HN_3) e 90 % de álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Com o auxílio de um microscópio óptico e o software Image-Pro Plus, obteve-se a microestrutura do material, mostrada na Fig. 3.2

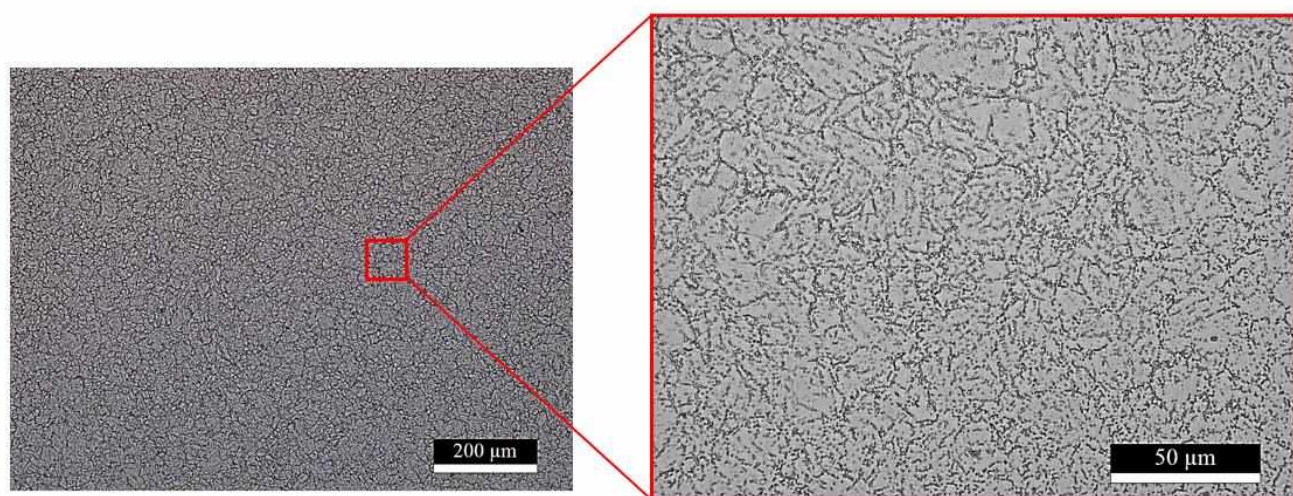


Figura 3.2 - Microestrutura do aço ferramenta AISI H13 com ampliação de 200 µm e 50 µm.

Para determinar a composição química do material, uma amostra foi enviada para o Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais (LAMAT) – SENAI, localizado no município de Itaúna-MG. Utilizou-se a técnica de Espectroscopia de Emissão Óptica segundo as normas ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014. Os principais elementos químicos encontrados estão dispostos na Tabela 3.1, encontra-se em Anexo 1 o relatório completo. Neste Laboratório também foi realizada a medição de dureza do material e obteve o valor de $(193,7 \pm 3,0)$ HB.

Tabela 3.1 - Composição química, em massa, do aço AISI H13

Elementos	Carbono (C)	Silício (Si)	Manganês (Mn)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Molibdênio (Mo)	Vanádio (V)
Concentração (%)	0,3846	0,9105	0,3023	5,0942	0,3152	1,2723	0,8518

3.1.1 Ensaio de microdureza

Foi realizada uma análise de microdureza da amostra após a realização do procedimento metalográfico apresentado anteriormente. O ensaio foi realizado no microdurômetro do

fabricante SHIMADZU, modelo HMV-2 disponível no Laboratório de Tribologia e Materiais da FEMEC. Optou-se pelo padrão de microdureza Vickers (HV). As endentações foram realizadas na sessão transversal com relação aos ensaios de microfresamento. A média obtida para um intervalo de confiança de 99,70 % foi $216 \pm 3,0$ (HV).

3.2 Microferramentas

Para a realização dos ensaios de microfresamento, foram utilizadas microfresas de metal duro revestidas de (Al, Ti) N com diâmetro de corte de 0,4 mm e duas arestas de corte, fabricadas pela Mitsubishi Materials (modelo MS2MSD0040). Na Tabela 3.2 são apresentados os parâmetros geométricos da ferramenta utilizada, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante e Figura 3.3.

Tabela 3.2 - Parâmetros Geométricos das Microferramentas (MITSUBISHI MATERIALS, 2022)

Parâmetros Geométricos	Microferramenta
Diâmetro de corte (DC)	0,4 mm $_{-0,020}^{0,000}$
Profundidade de corte máxima (APMX)	0,8 mm
Comprimento da haste (LF)	40 mm
Diâmetro da haste (DCON)	4 mm
Ângulo de meia conicidade do corpo (BHTA)	15°
Aresta de Corte	02

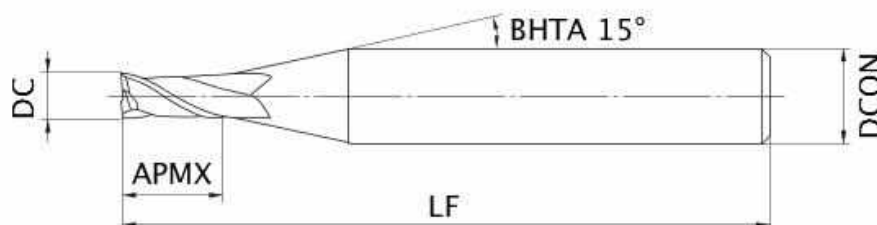


Figura 3.3 - Parâmetros geométricos das microferramentas (MITSUBISHI MATERIALS, 2022).

3.3 Medição de desgaste das ferramentas e análise da superfície usinada.

Para a avaliação das microferramentas e dos microcanais usinados utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo HITACHI TM3000 disponível no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU da FEMEC - UFU. Este equipamento permite aumentos de 15 x a 30 000 x. O microscópio possui autofoco, brilho e contraste automático e as imagens podem ser registradas em quatro modos diferentes, sendo eles COMPO, SHADOW 1, SHADOW 2 e TOPO.

Para análise de composição química foi utilizado Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), modelo SwiftED3000, acoplado ao MEV, que é capaz de fazer o mapeamento dos elementos presentes na área selecionada assim como escanear em linha, destacando o perfil de intensidade dos elementos (HITACHI HIGH-TECHNOLOGIES CORPORATION, 2013).

3.4 Microfresadora

Para a realização dos ensaios de microfresamento utilizou-se microfresadora CNC fabricada pela empresa Minitex Machinery Corporation® modelo CNC Mini-mill/GX, ilustrada na Figura 3.4. Esta microfresadora possui mandril Nakanishi modelo EM3060, com rotação máxima de 60 000 rpm, resolução de posicionamento dos eixos de 0,1 μm e velocidade de avanço máximo de 1 000 mm/min. Todo o conjunto está localizado sobre uma mesa inercial, a fim de reduzir vibrações de fontes externas que poderiam interferir no processo.



Figura 3.4 - Microfresadora CNC modelo Mini-mill/GX utilizada nos ensaios (MINITECH MACHINERY, 2022).

3.5 Ensaio de Microfresamento

Os ensaios consistiram em produzir canais de 400 μm (diâmetro da ferramenta) de largura e diferentes profundidades (variação da profundidade de corte). Os parâmetros de corte selecionados são apresentados na Tabela 3.3. Foram produzidos 10 canais de 10 mm de comprimento cada, com espaçamento de 1 mm entre cada canal, com cada condição de corte. Na Figura 3.5 mostrado esquematicamente a peça com os canais fabricados.

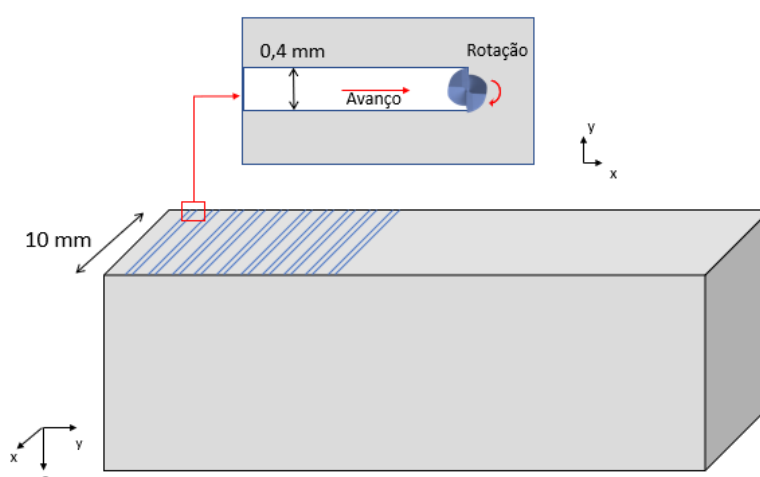


Figura 3.5 - Configuração experimental para os ensaios de microfresamento.

Tabela 3.3 - Parâmetros de corte.

Testes	Velocidade de corte (m/min)	Rotação (rpm)	Profundidade de corte (μm)	Avanço por dente ($\mu\text{m}/\text{dente}$)
1	40,2	32 000	40	1
2				5
3				10
4			20	5
5			10	5

3.5.1 Configuração experimental

Para fixar o corpo de prova sobre a mesa da microfresadora utilizou-se uma morsa de precisão, conforme mostrado na Figura 3.6. Entre a morsa e a mesa usou-se uma cuba de acrílico para reter o fluido de corte utilizado durante a usinagem. A fixação da morsa sobre a mesa ocorreu por meio de parafusos e apoios para garantir rigidez durante o microfresamento.



Figura 3.6 - Fixação do corpo de prova.

É de extrema importância, garantir que os desvios de planeza e perpendicularidade sejam desprezíveis quando comparados com a profundidade de corte. Assim, após a fixação do corpo de prova na morsa, a superfície da peça é nivelada em outra máquina ferramenta para eliminar grandes erros de nivelamento. Em seguida, o conjunto morsa e corpo de prova, são

fixados na mesa da microfresadora onde ocorre um fresamento de faceamento para diminuir os erros de paralelismo entre a superfície do corpo de prova e a base da morsa. Todas as peças utilizadas neste trabalho foram submetidas a este procedimento. Para esta operação de preparação da superfície foi utilizada fresa de metal duro de 3,0 mm de diâmetro, com quatro arestas e os seguintes parâmetros de corte: profundidade de corte de 0,05 μm , rotação de 10 000 rpm.

Após a preparação do corpo de prova, utilizou-se um relógio comparador analógico com resolução de 1 μm para verificação do nivelamento na superfície nas direções longitudinal e transversal.

3.5.2 Posicionamento das microferramentas

Para o referenciamento da microfresa foi utilizado o mesmo procedimento definido no trabalho de Ziberov (2018). A aproximação da microferramenta sobre o corpo de prova é monitorada com um microscópio USB, conforme ilustrado na Figura 3.7. Após a máxima aproximação visível, movimenta-se a microferramenta na direção radial e axial utilizando um incremento de profundidade de 0,1 μm até que a mesma toque a peça. É importante que durante este procedimento a fresa esteja em rotação. Assim que a microferramenta toca o corpo de prova, é deixada uma marca visível na imagem gerada na câmera. Desta forma, ocorre o referenciamento do eixo z. Desta forma, o referenciamento é realizado com um erro de aproximadamente a resolução de posicionamento da microfresadora, 0,1 μm .

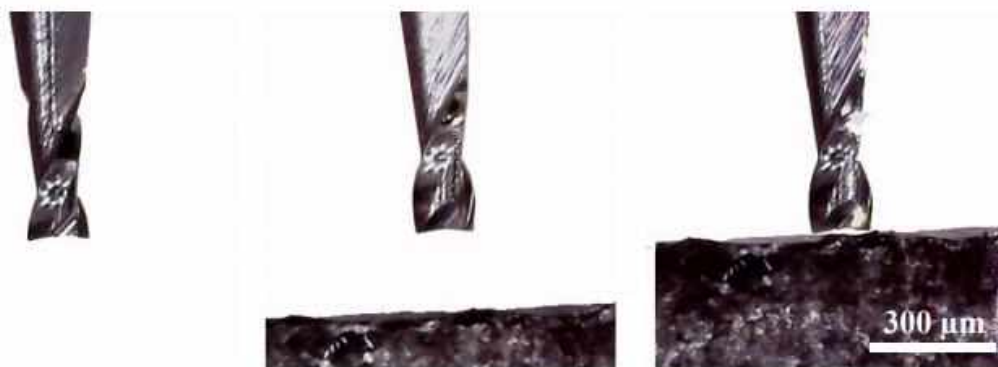


Figura 3.7 - Posicionamento da microferramenta sobre o corpo de prova (ZIBEROV, 2018).

3.5.3 Fluido de corte

Todos os ensaios foram realizados com aplicação de fluido de corte na forma de MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante), com vazão de 100 ml/h e pressão de 0,6 Mpa. O fluido utilizado foi o Vascomill MMS FA2 da Blaser®. Na Figura 3.8 é mostrada que a aplicação do fluido de corte é contrária a direção de avanço. O bocal encontrava-se a uma distância de 10 mm da microferramenta.



Figura 3.8 - Direção de aplicação do fluido de corte.

3.6 Medição do Desgaste da Microferramenta

Antes da realização dos ensaios, é necessário verificar a integridade das microferramentas. Assim, todas microfresas novas são observadas no MEV. São obtidas imagens da superfície secundária de folga (imagens de topo) para assegurar que a ferramenta se encontra adequada e não comprometerá os resultados obtidos no processo de microfresamento. A Figura 3.9 mostra um exemplo de imagem do topo de uma microfresa nova.

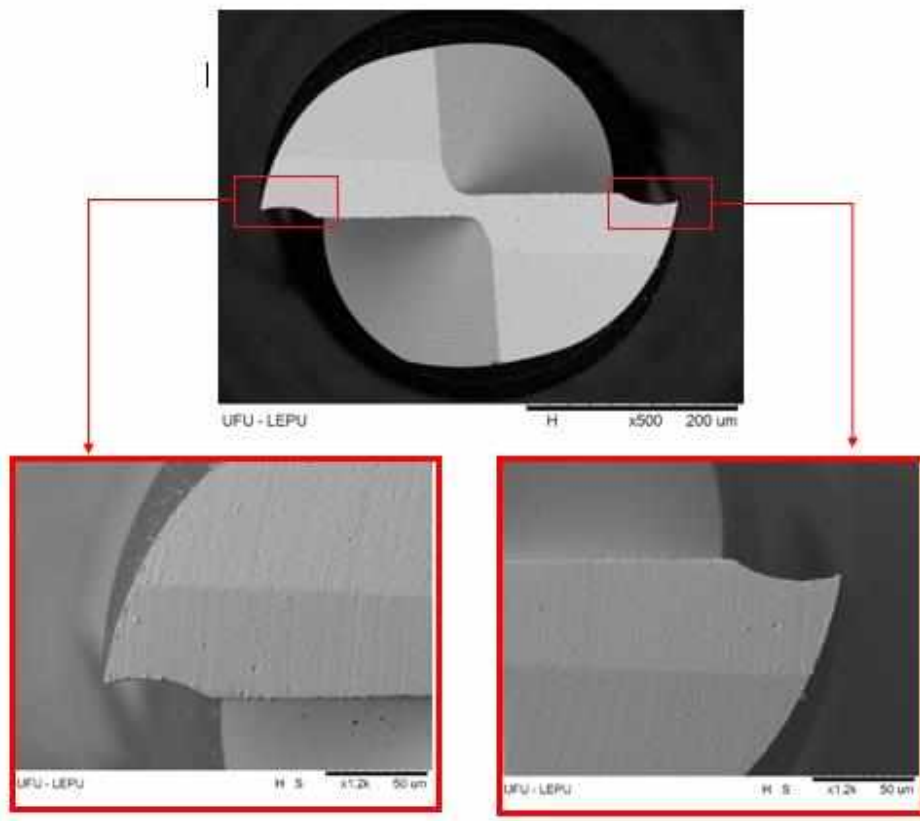


Figura 3.9 – Método de detecção de danos na integridade das microferramentas.

Após todo o comprimento usinado (100 mm) as microferramentas foram observadas novamente no MEV para a obtenção de imagens. O desgaste foi então medido comparando com a imagem da ferramenta nova na mesma posição e ampliação. Com o auxílio do software Autocad® pode-se medir o diâmetro inicial e final das microferramentas e assim, calcular o percentual de redução de diâmetro de cada ferramenta, conforme Equação 3. Este método foi utilizado no trabalho de Queiroz (2022). Na Figura 3.10 é mostrado um exemplo da medição do diâmetro de uma ferramenta nova e da mesma ferramenta após usinagem de 10 canais, 100 mm de comprimento de avanço.

$$\% \text{ des gaste} = \frac{D_{i \text{ n i c i a l}} - D_{f i n a l}}{D_{i \text{ n i c i a l}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

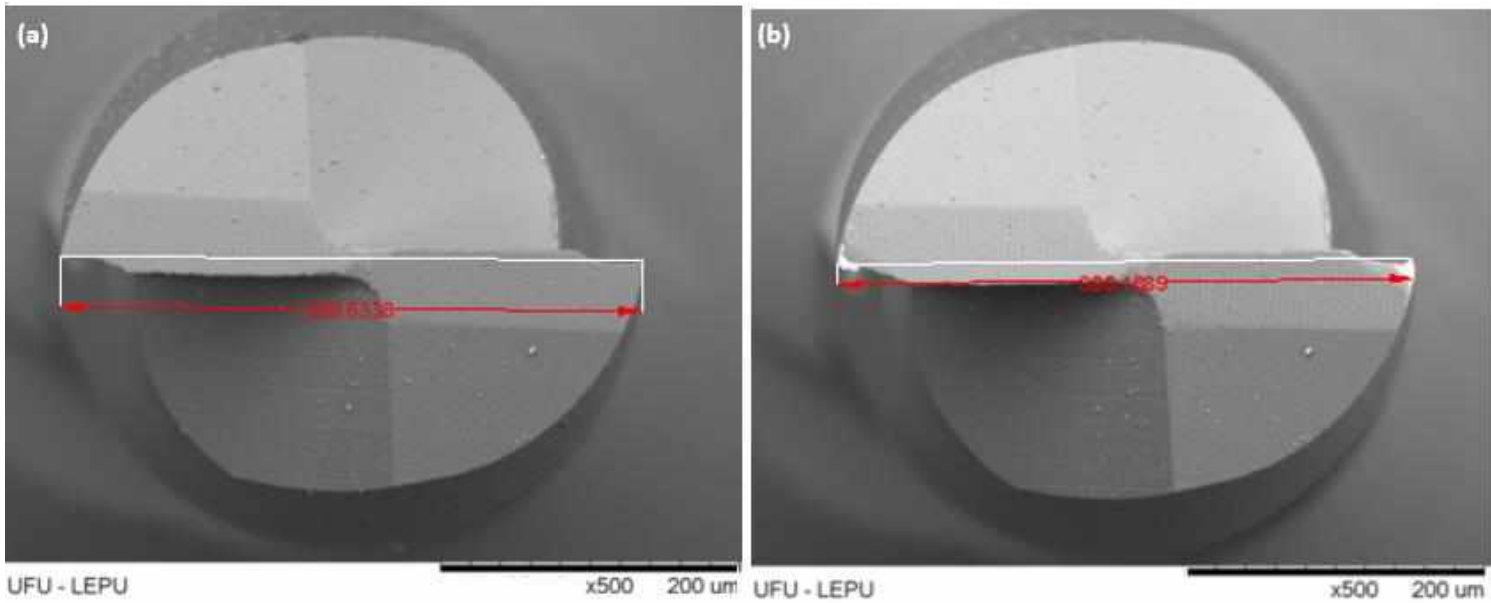


Figura 3.10 - Medição do diâmetro inicial da microferramenta (a) nova e (b) após usinagem de 100 mm.

As ferramentas desgastadas também foram analisadas no MEV para uma análise qualitativa das formas e mecanismos de desgaste. Para isso foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura da marca Tescan, modelo VEGA 3 LMU, disponível no Laboratório Multiusuário do instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Na Figura 3.11 está uma imagem da superfície de folga de uma microfresa com desgaste de flanco.

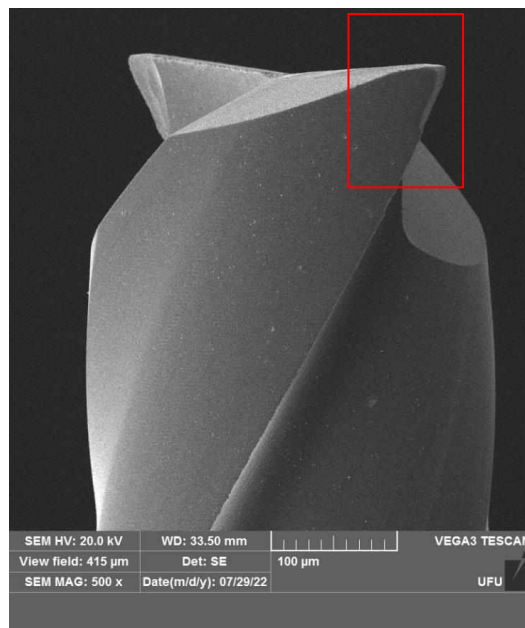


Figura 3.11 - Superfície de folga principal de uma microfresa desgastada.

3.7 Medição de Rugosidade

Para a avaliar a rugosidade superficial dos canais utilizou-se o perfilômetro modelo Form Talysurf Intra do fabricante Taylor Hobson® que tem resolução de 16 nm quando se utiliza 1,0 mm de campo. O apalpador tem raio de ponta de 2 μm . Este equipamento também está posicionado sobre uma mesa inercial para reduzir vibrações externas que possam influenciar os resultados. As medições de rugosidade são realizadas em ambiente de temperatura controlada a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. O apalpador do perfilômetro é posicionado no interior do microcanal e percorre uma trajetória perpendicular as marcas de avanço. A rugosidade é então medida aproximadamente no meio do microcanal, conforme ilustra a Figura 3.12.

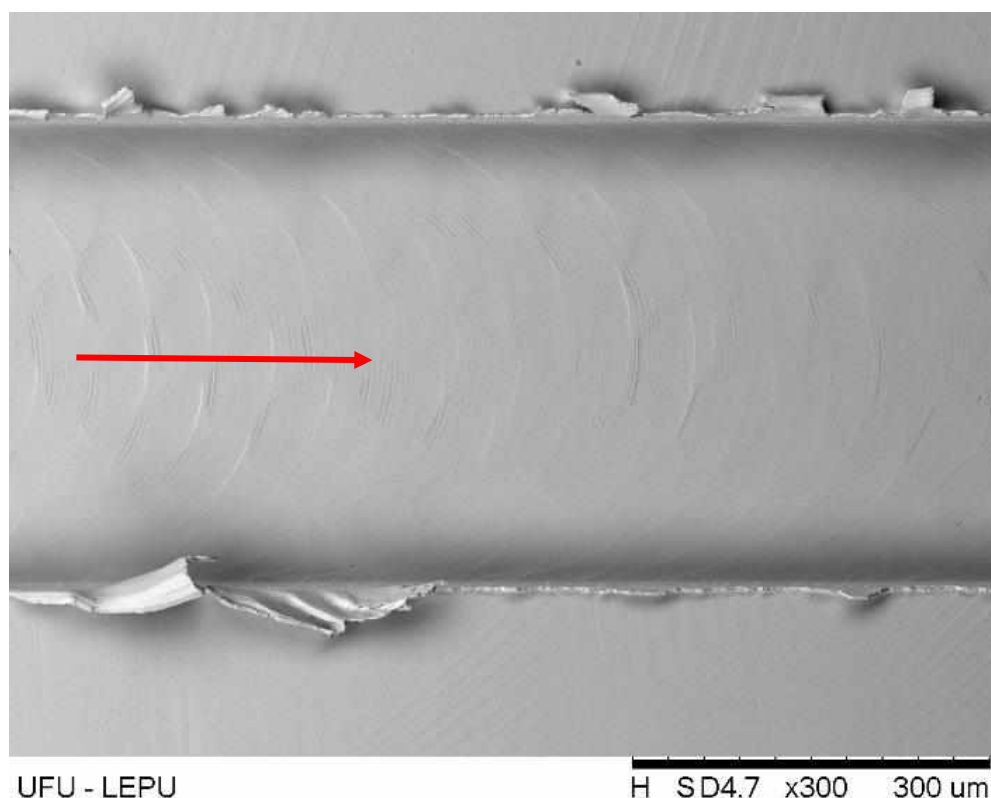


Figura 3.12 - Trajetória do apalpador.

Obteve-se o perfil de rugosidade, conforme exemplo mostrado na Figura 3.13, em diferentes posições para cada microcanal, utilizando filtro Gaussiano, cut-off de 0,8 mm e comprimento de avaliação de 4 mm, conforme a norma ISO 4288 (1996). Os parâmetros

selecionados para avaliação foram o desvio aritmético médio (Ra) e o desvio médio quadrático (Rq) através das medias e desvio padrão.

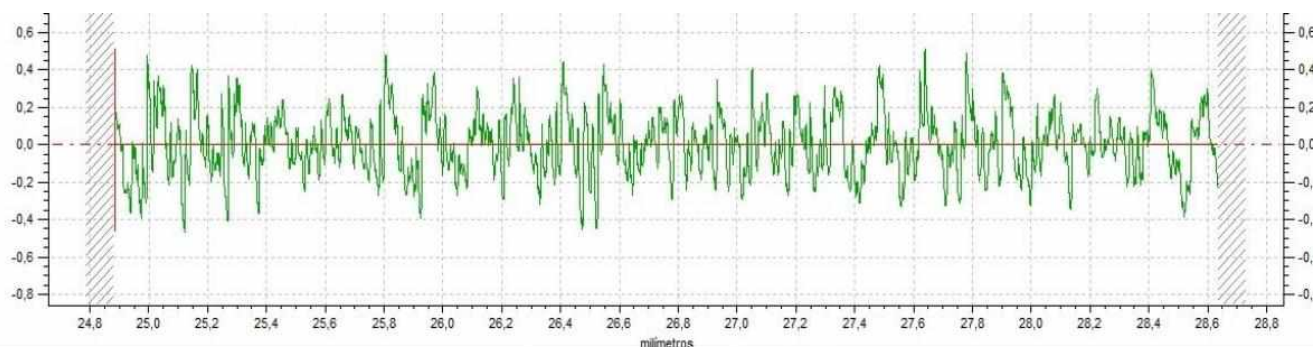


Figura 3.13 - Perfil de rugosidade obtido em um microcanal.

3.8 Análise da qualidade superficial das superfícies usinadas

Para analisar a qualidade da superfície usinada e os tipos de rebarbas formadas na superfície usinada, obteve-se imagens geradas no MEV para todos os canais fabricados. Foram analisadas as marcas de avanço deixadas pela microferramenta, os tipos e a posição das rebarbas, de acordo com a classificação de Lee e Dornfeld (2002) e Chern et al. (2007). Neste trabalho foram fabricados 100 microcanais, totalizando 3000 imagens no MEV.

3.8.1. Interferômetro

Para assegurar a confiabilidade dos resultados de rugosidade Ra e Rq em virtude da dificuldade de posicionamento do Perfilômetro no interior dos microcanais, utilizou-se um interferômetro óptico Zegage Pro HR do fabricante ZYGO, com resolução de 0,15 nm e aumento de 50 x. O Zegage Pro HR é capaz de caracterizar superfícies em duas e três dimensões.

Para medir a rugosidade das peças com o uso de perfilômetro, é necessária uma grande quantidade de medições que requer alto consumo de tempo e custo. A interferometria óptica apresenta vantagens com relação as medições táteis, como: alta velocidade de processamento, aquisição de grande quantidade de pontos da superfície, uma natureza sem contato além capacidade de obter perfis e 2D e em 3D com apenas uma medição. Para este trabalho, não foi possível avaliar todos os canais usinados, em virtude da disponibilidade do equipamento.

CAPÍTULO IV

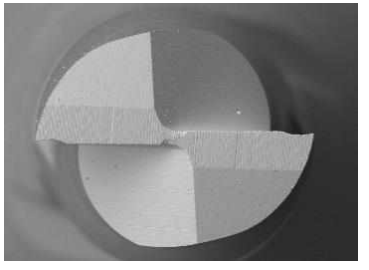
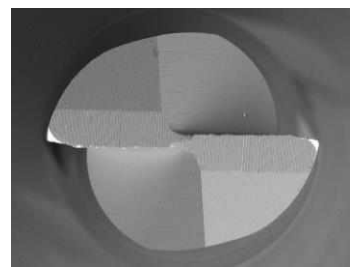
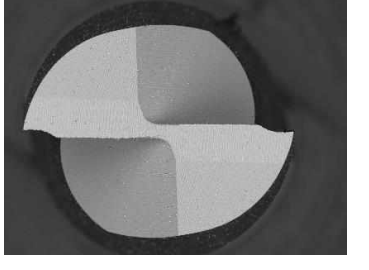
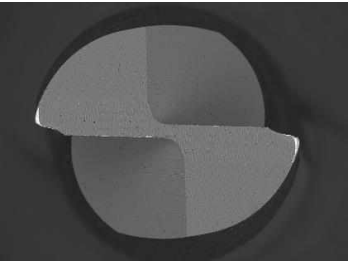
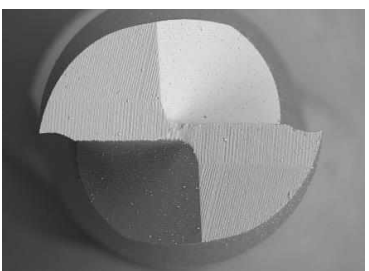
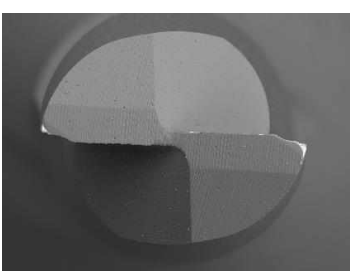
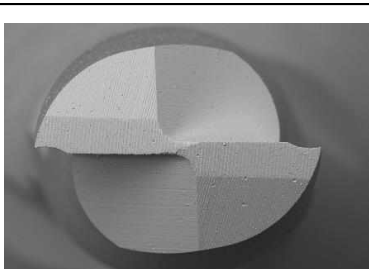
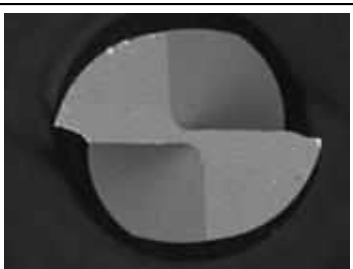
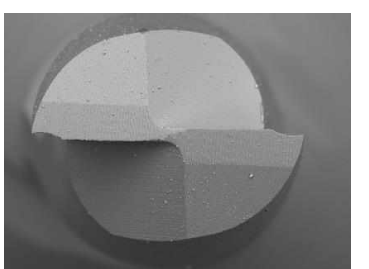
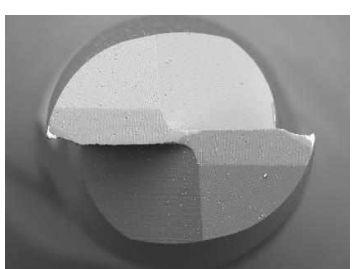
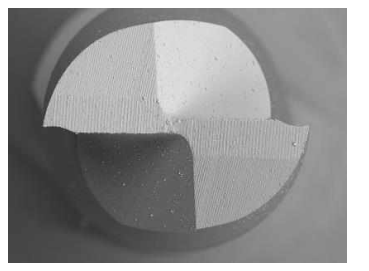
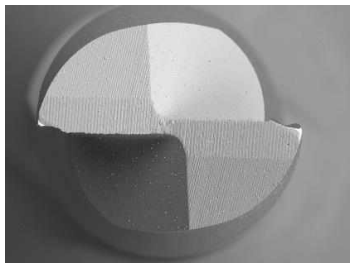
RESULTADOS E DISCUSSÕES

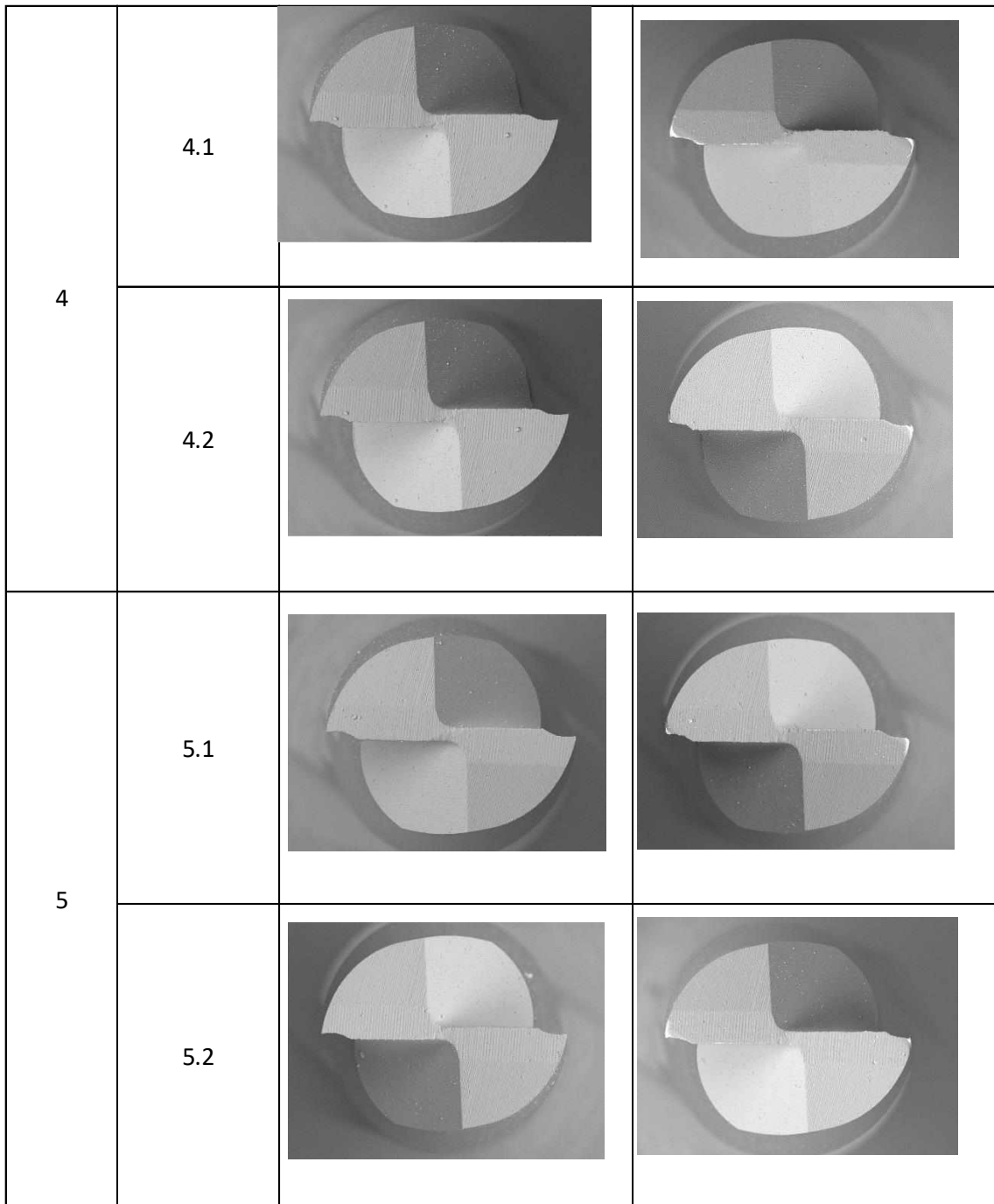
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no microfresamento do aço ferramenta AISI H13, para a realização dos ensaios utilizou-se microfresas de topo reto de 400 μm de diâmetro, revestidas de (Al, Ti) N, com duas arestas de corte; o fluido de corte foi aplicado na condição de MQL na direção contrária ao avanço da ferramenta. Os parâmetros de corte variáveis do processo foram a profundidade de corte (40 μm , 20 μm e 10 μm) e o avanço por dente (1 $\mu\text{m}/\text{dente}$, 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$ e 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$), e utilizou-se uma velocidade de corte constante de 40,2 m/min. Os resultados serão apresentados e discutidos em três seções: desgaste das microfresas, rugosidade superficial e rebarbas formadas.

4.1 Desgaste da Microferramenta

Nesta seção serão apresentados os resultados do desgaste das microferramentas os quais foram medidos através da variação do diâmetro após 100 mm de comprimento de avanço. Imagens da superfície principal de folga também foram analisadas para determinar o comportamento das ferramentas. Primeiramente, serão apresentados os resultados qualitativos e posteriormente, os resultados quantitativos obtidos nas microfresas utilizada nas condições de corte de profundidade de corte fixa de 40 μm e para os vários avanços utilizados (1 $\mu\text{m}/\text{dente}$, 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$ e 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$). Na sequência serão apresentados os resultados dos testes com variação da profundidade de corte (40 μm , 20 μm e 10 μm) para um avanço fixo de 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$.

Na Figura 4.1 são apresentadas imagens obtidas no MEV da superfície secundária de folga de todas as microfresas utilizadas no processo de microfresamento, como também as imagens das ferramentas novas e após a usinagem dos dez canais (10 mm de comprimento de avanço), para os testes e as respectivas réplicas. As ferramentas encontram-se na mesma posição, isto é, o lado direito da ferramenta nova corresponde com o lado direito da ferramenta desgastada. Os ensaios foram nomeados conforme a Tabela 3.1 apresentada no capítulo anterior.

Teste	Ferramenta	Nova	Desgastada
1	1.1		
	1.2		
2	2.1		
	2.2		
3	3.1		
	3.2		



200 μm

Figure 4.1 - Superfície secundária de folga antes e após a microusinagem do Aço ferramenta AISI H13 com diferentes parâmetros de corte.

Visualmente, nota-se que a cunha cortante desgastada também tem um descolamento de revestimento que, em alguns casos, tem uma extensão considerável. Alguns trabalhos da

literatura consideram esta região como parte do desgaste e outros não consideram desgaste. Para os processos de microfresamento, ainda não existem critérios de fim de vida estabelecidos como aqueles para ferramenta de usinagem convencionais com ferramenta de geometria definida. Desta forma, é importante observar se esta região deve ser considerada como desgaste, levando-se em conta a curta vida das ferramentas. As ferramentas 2.2 e 4.2 apresentaram um lascamento considerável, enquanto as ferramentas 1.1 e 5.1 ocorreu um arredondamento do raio de aresta, o que torna a microferramenta fique menos afiada (SHAW,1986). Outro ponto a ser observado é que não se constatou a presença de aresta postiça de corte (APC), possivelmente devido a utilização do fluido de corte que interage na interface cavaco-ferramenta e reduz a interação da peça-ferramenta (UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2013).

A fim de identificar as formas e mecanismos de desgaste, foram analisadas as imagens das superfícies principal e secundária de folga, no qual foi constatado sulcos abrasivos paralelos à direção do fluxo de cavaco, característica do mecanismo de abrasão. Neste mecanismo o material é removido por partículas duras que estão presentes na superfície (MACHADO et al., 2011). Da figura 4.2 pode-se observar os sulcos paralelos à direção do fluxo de material, além do desgaste de flanco, indicado pelas setas. Importante observar que a ferramenta tem marcas do processo de retificação utilizado para fabricar as ferramentas. Estas marcas estão sob o revestimento.

Segundo Suarez et al. (2019) e Boing, Schoeter e Oliveira (2018), o desgaste abrasivo é comum em materiais que possuem carbonetos de tungstênio, vanádio e cromo, e apresentam alta dureza e ocasionalmente produzem partículas abrasivas, que ao se juntarem com partículas da própria ferramenta deslizam sobre a interface cavaco/ferramenta/peça, elevando o desgaste pelo mecanismo de abrasão de dois e três corpos.

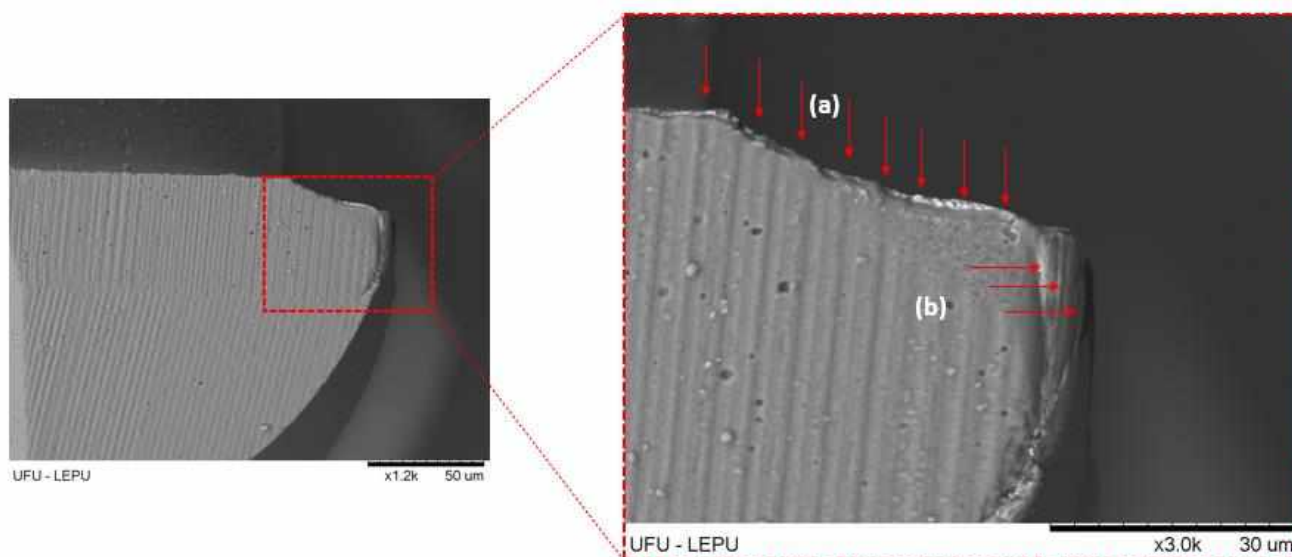


Figura 4.2 - Imagem da região do desgaste na ponta para Ferramenta 2.1

Na Figura 4.3 é também apresentada uma ampliação da microferramenta obtida no MEV, em que observa-se a presença do desgaste na ponta da ferramenta (a) e o desgaste de flanco (secundário) (b). O desgaste de flanco segundo a norma ISO, é medido na superfície principal de folga, entretanto pesquisadores apontaram a possibilidade de investigar na superfície secundária de folga (ASLANTAS et al, 2016; ALHADEFF et al, 2019). Tendo em vista que o desgaste na superfície de folga secundária pode ser a principal forma de desgaste e ainda que é mais viável avaliar o desgaste nesta superfície devido à dificuldade de posicionamento da microfresa no MEV, a Figura 4.3 mostra imagens da superfície de folga secundária da ferramenta 3 e a Figura 4.4 mostra a superfície de saída.

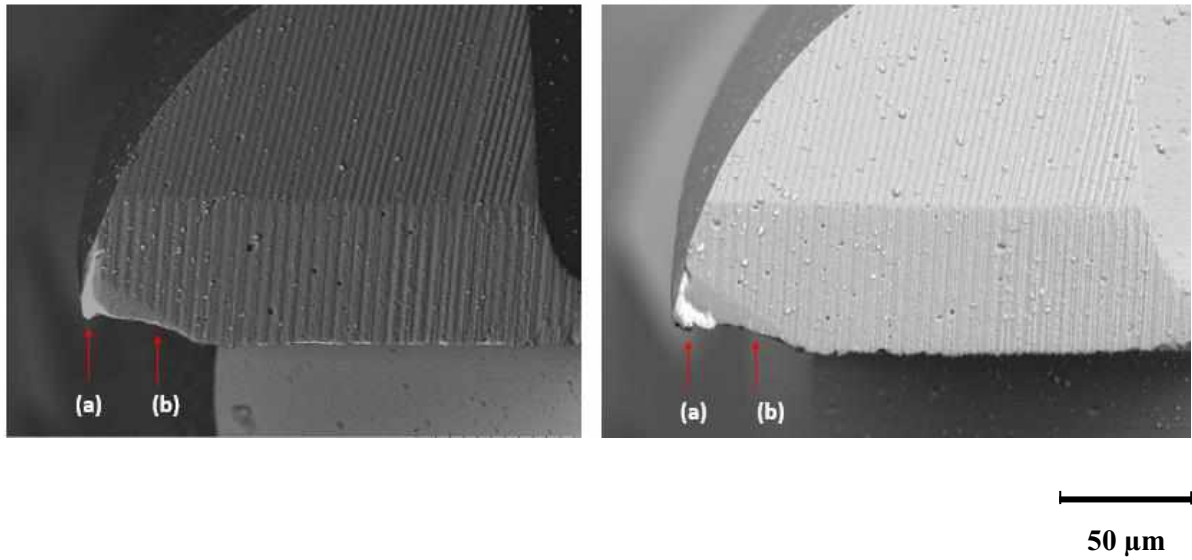


Figura 4.3 - Ampliação do desgaste na ponta (a) e desgaste de flanco secundário (b) para ferramenta 3.

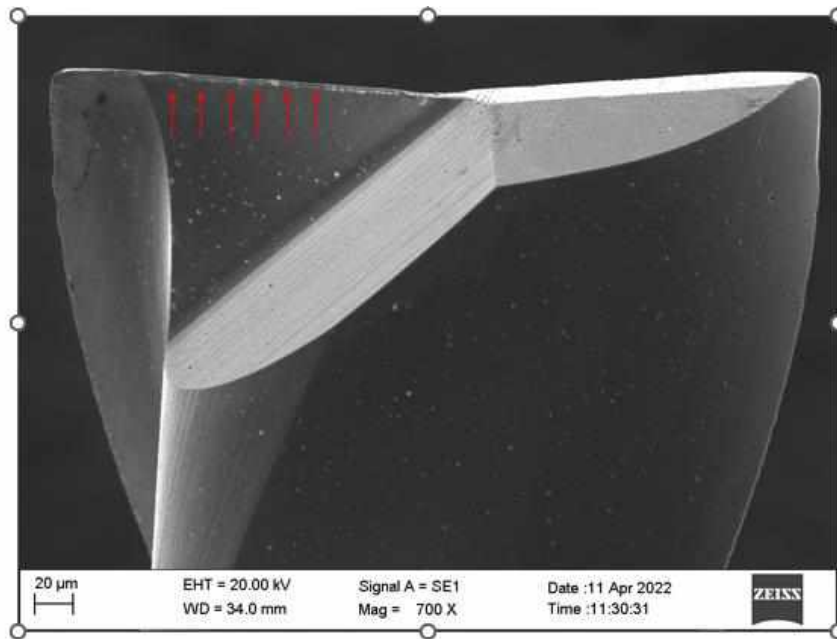
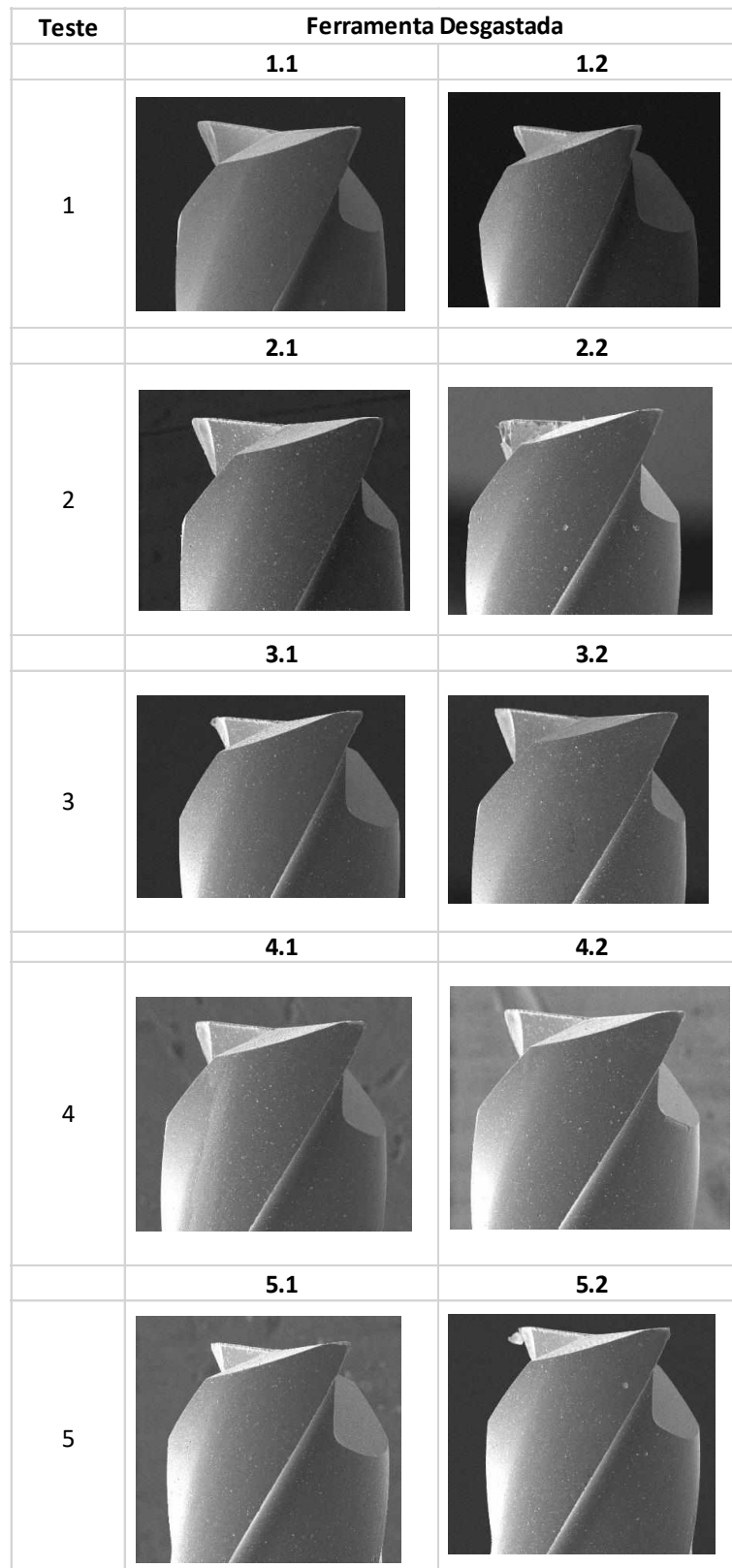


Figura 4.4 - Superfície de saída

A Figura 4.5 apresenta todas as imagens obtidas pelo MEV da superfície principal de folga das microferramentas após os ensaios.




 100 μm

Figure 4.5 - Superfície principal de folga das ferramentas após a microusinagem.

O desgaste encontrado na superfície principal de folga das microferramentas é denominada como desgaste de ponta, no qual a ponta sofre um arredondamento, fazendo com que fique cada vez menos afiada. Com o decorrer do corte, esse arredondamento se torna cada vez mais evidente (SHAW,1986). Uriarte et al. (2008), explicam que o arredondamento da ponta é comum na microusinagem de materiais duros.

Nesta segunda etapa sobre o estudo do desgaste das microferramentas serão apresentados uma análise quantitativa para complementar as análise já realizadas. Os gráficos das Figuras 4.6 e 4.7 apresentam o percentual de redução e diâmetro das microferramentas com a variação do avanço e profundidade de corte, respectivamente. Verificou-se que para todas as condições de corte o menor desgaste foi alcançado pelo Teste 3 em ambas as análises.

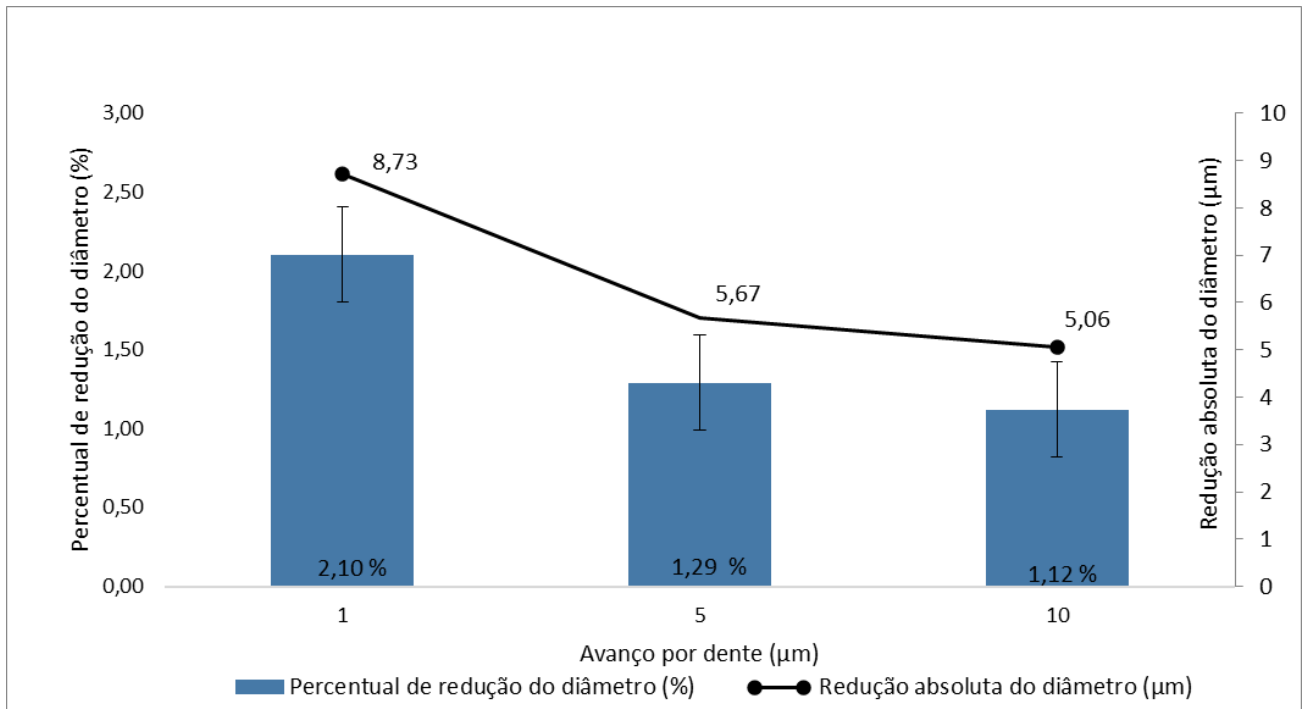


Figure 4.6 - Percentual de redução do diâmetro das microferramentas com a variação do avanço por dente (1 μm/dente, 5 μm/dente e 10 μm/dente, respectivamente, com profundidade de corte constante de 40 μm).

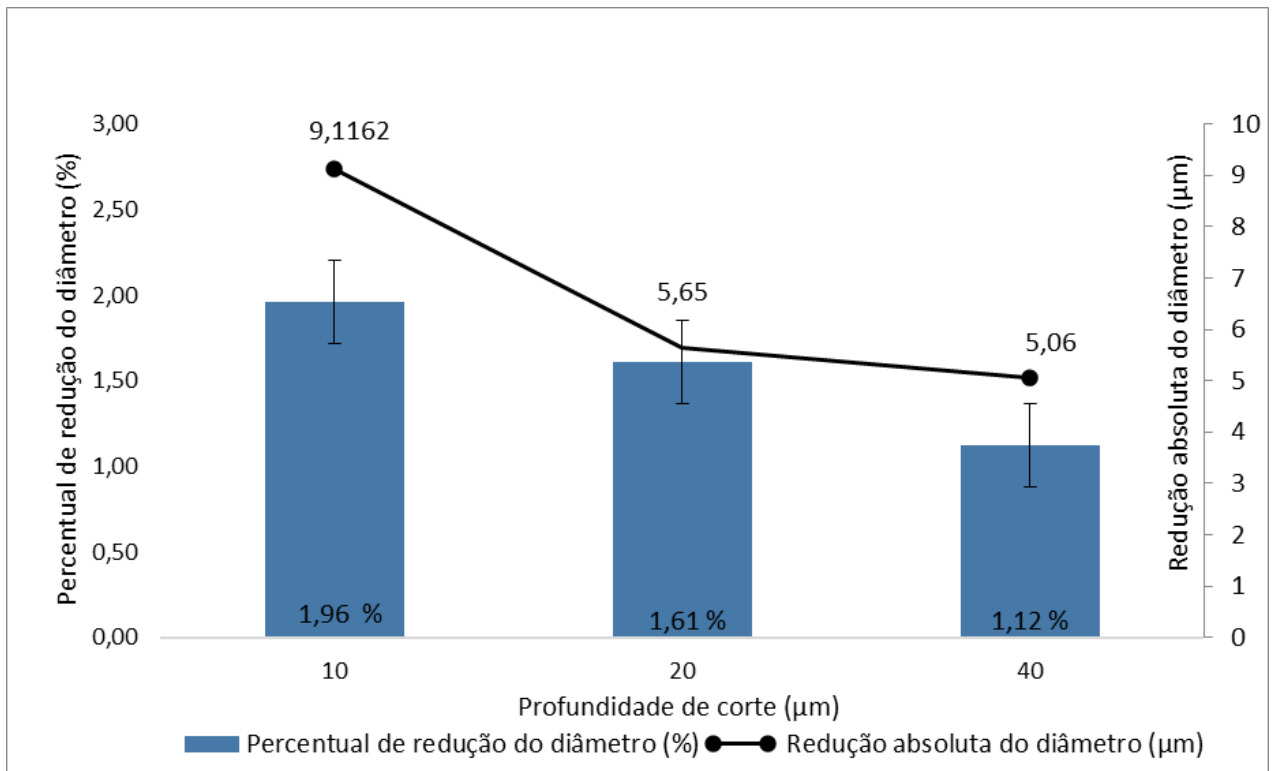


Figure 4.7 - Percentual de redução do diâmetro das microferramentas com a variação da profundidade de corte (10 μm, 20 μm e 40 μm, respectivamente, com avanço por dente constante de 5 μm/dente).

O maior percentual de redução do diâmetro foi obtido para a condição de corte do Teste 1, atingindo a média de 2,10 % equivalente a redução absoluta de 8,73 μm. O Teste 2 apresentou redução do diâmetro, com 1,12 %, e o Teste 3 alcançou um resultado semelhante, com 1,12 % de perda no valor do diâmetro em relação à medição inicial, com redução absoluta de 5,67 μm e 5,06 μm, respectivamente.

A Figura 4.7 contém os resultados numéricos da perda de diâmetro para a variação da profundidade de corte. Para a variação da profundidade de corte, o maior percentual de desgaste ocorreu no Teste 5, atingindo o percentual de 1,96 %, equivalente a redução absoluta de 9,11 μm no diâmetro da microferramenta. O Teste 4 obteve 1,61 %, enquanto o Teste 3 apresentou 1,12 %.

4.1.1 Influência da qualidade da ferramenta nos microcanais

Para averiguar a qualidade das microferramentas é necessário a observação das mesmas no MEV, esse procedimento é realizado antes e após os ensaios. Eventualmente é possível encontrar ferramentas que sofreram danos antes da utilização e, portanto, não são adequadas para o uso, e, ferramentas que sofreram uma avaria durante o corte. Nessa seção, será discutido a influência da qualidade da ferramenta nos microcanais produzidos.

Verificou-se no Teste 1 ($a_p = 40 \mu\text{m}$ e $f = 1 \mu\text{m/dente}$) que a ferramenta de corte sofreu um lascamento logo ao entrar no primeiro canal. Isso foi constatado pelas marcas de avanço deixadas no canal observadas no MEV, pois a ferramenta só foi analisada no MEV após a usinagem de 10 canais (100 mm de comprimento de avanço). A Figura 4.8 mostra a ferramenta antes e após o ensaio de microfresamento. Obviamente, além do lascamento a ferramenta sofre desgaste.

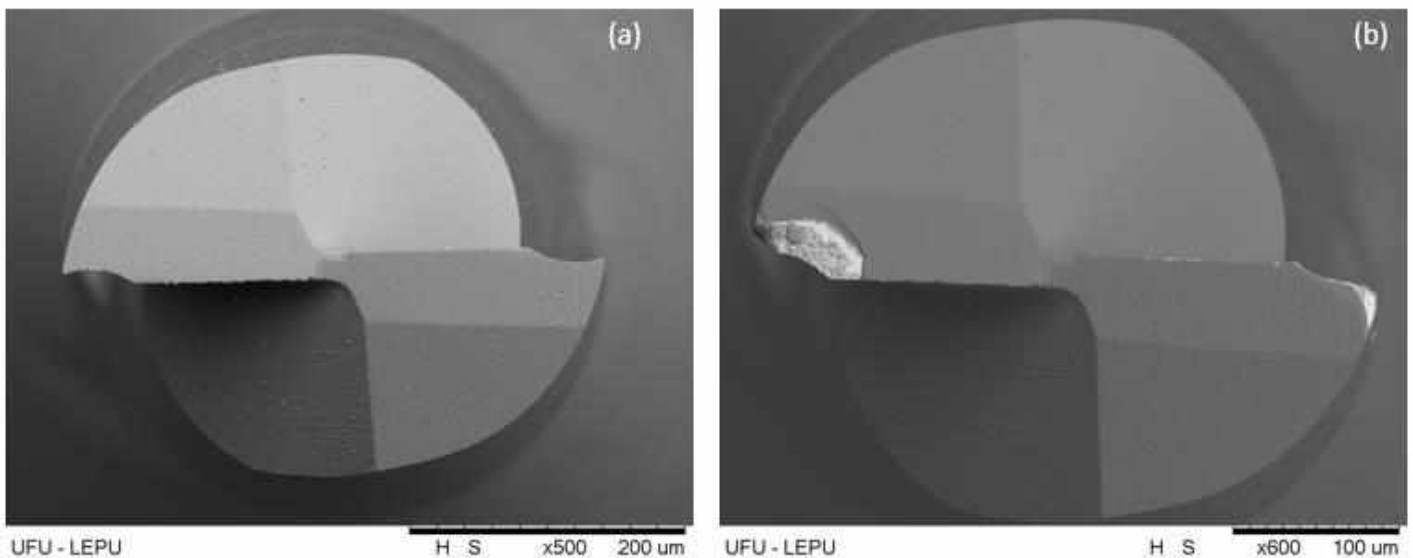


Figure 4.8 - Comportamento do desgaste da aresta de corte. Onde: (a) microferramenta nova e (b) após 100 mm usinados.

A Figura 4.9 apresenta o desgaste da microferramentas na superfície de saída com uma ampliação de 7280 x. Para verificar as características do material do substrato foi obtido a composição química deste material por meio do EDS, como é mostrado na Figura 4.10.

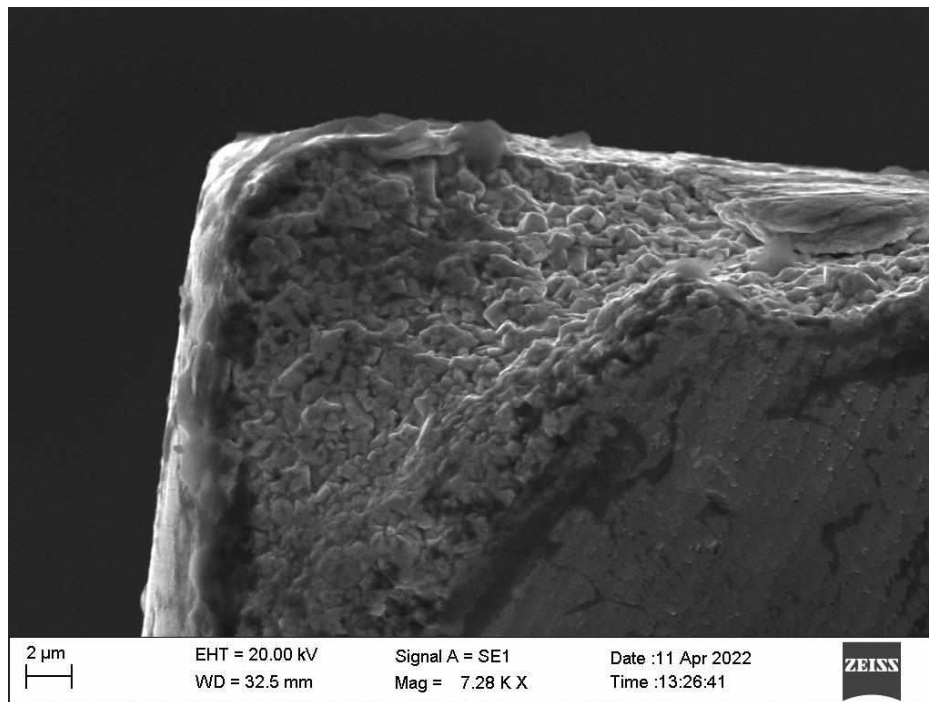
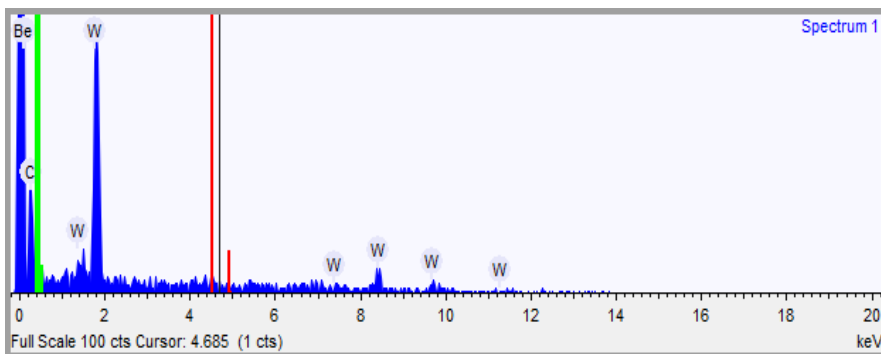


Figure 4.9 – Superfície de saída de ferramenta com avaria observada no MEV.



Elemento	Peso %
Carbono	46.497
Tungstênio	53.503

Figure 4.10 - EDS realizada na superfície na superfície principal de folga após a quebra da ferramenta.

Observa-se a presença de carboneto de tungstênio (WC) na superfície de saída da microferramenta. Para Chae; Park; Freiheit (2006), as microferramentas de carboneto de tungstênio possuem grãos menores que 600 nm, a fim de aumentar a resistência ao desgaste, e assim proporcionar o bom desempenho durante o processo. Este resultado indica, portanto, um metal duro da classe K, informação que normalmente não é fornecida pelos fabricantes.

A Figura 4.11 mostra as superfícies usinadas no começo (a), meio (b) e fim (c) do primeiro canal do Teste 1. No processo de microfresamento a ferramenta de corte promove o cisalhamento do material durante o tempo ativo, sendo possível identificar as marcas de avanço no fundo do canal usinado e a presença de rebarbas nos dois lados do canal (concordante e discordante) desde o início do corte e o aumento gradual até o final do canal, e a formação de rebarba de saída, no fundo do canal.

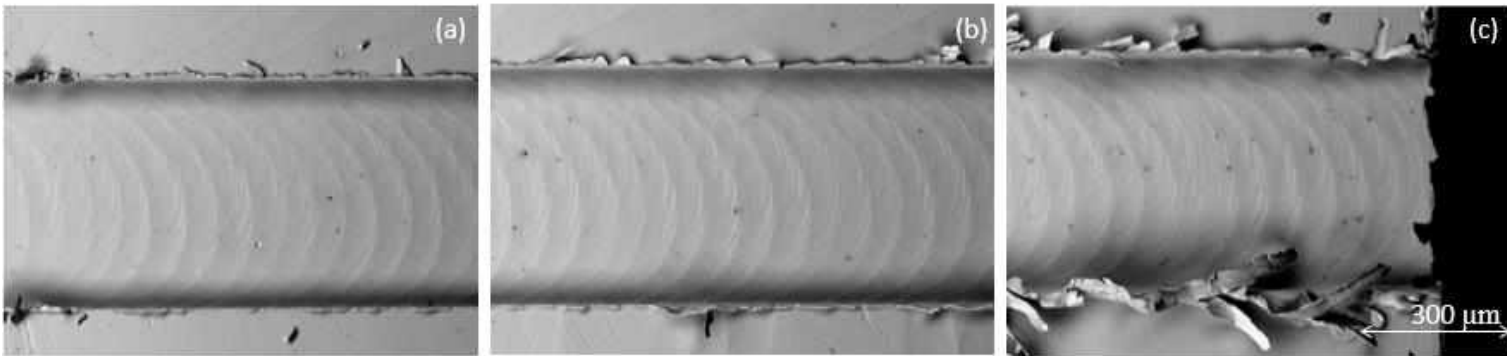


Figure 4.11 - Influência das qualidade da ferramenta na qualidade superficial no (a) início (b) meio e (c) final do primeiro canal.

Ao observar as marcas deixadas pela microferramentas, percebe-se que elas não são uniformes e revelam a presença de vibração da ferramenta de corte durante o processo de microfresamento. Não foi possível obter o perfil de rugosidade devido à dificuldade de posicionar o apalpador do perfilômetro em decorrência das rebarbas, conforme mostrado na Figura 4.12. Este padrão de perfil de rugosidade deve ser estudado com mais detalhes, incluindo uma análise da distribuição de frequência do perfil de rugosidade em trabalhos futuros.

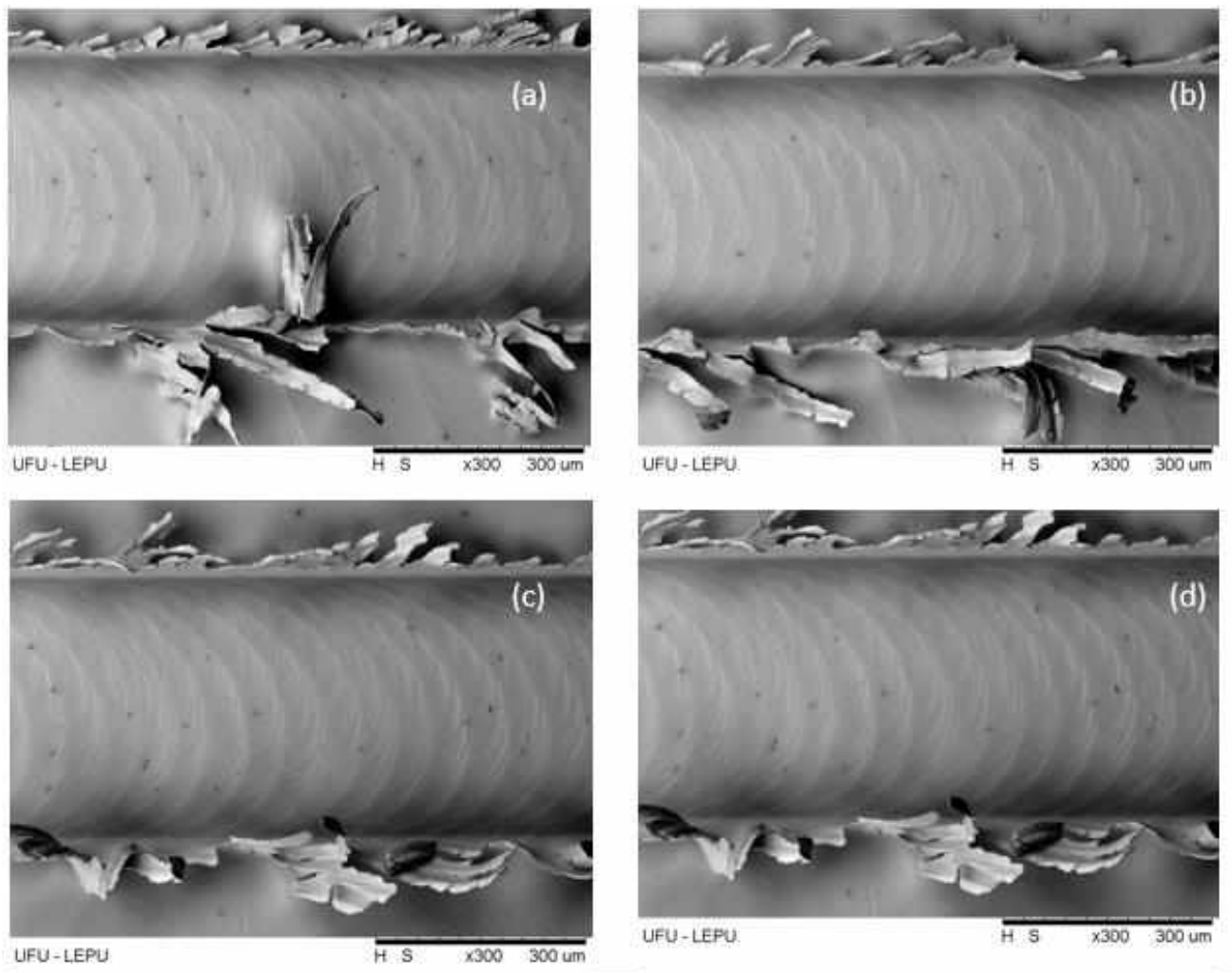


Figure 4.12 - Influência da qualidade da ferramenta na formação de rebarbas.

O desgaste e a quebra da microferramenta influenciou negativamente a qualidade superficial e a formação de rebarbas, visto que a integridade da ferramenta de corte é fundamental para o processo de usinagem. A microestrutura, composição química e propriedades mecânicas e a geometria da ferramenta tem uma grande interferência no processo, principalmente em processos de microusinagem (MACHADO et al., 2011).

Observa-se que na Figura 4.13 há uma grande quantidade de pontos escuros na superfície usinada. Com um aumento de 1 000 x, percebe-se que a presença de partículas aderidas e alguns micro vazios, sem um padrão de distribuição. Segundo os pesquisadores Simoneau e Elbestawi (2006), os micro vazios são resultado da deformação plástica da superfície em contato com partículas duras, neste caso, provenientes das partículas da microferramenta.

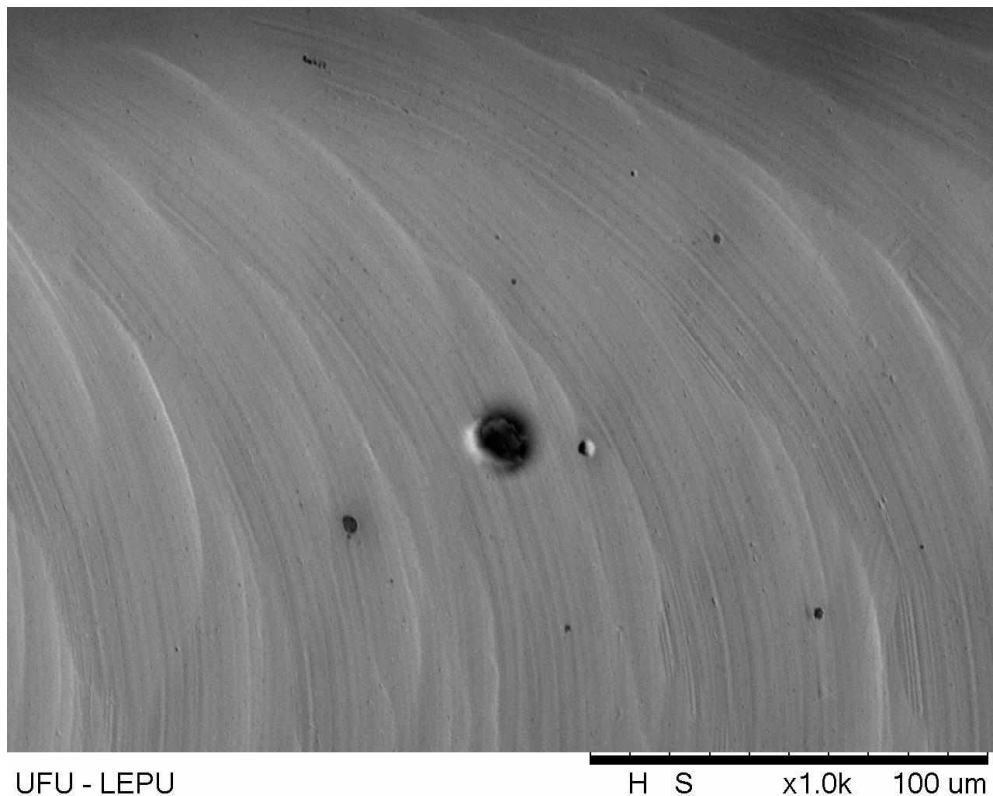


Figura 4.13 - Presença de partículas e micro vazios na superfície

4.2 Cavaco esferoidal

De Oliveira et al. (2019), sugeriram um novo tipo de cavaco formado no microfresamento, o cavaco esferoidal, que já havia sido encontrado em outros processos de usinagem, como a retificação. Doyle e Dean (1980), explicam que a formação do cavaco esferoidal, na retificação, é devido a oxidação de pequenos cavacos que entram em combustão. Segundo De Oliveira et al. (2019), a formação do cavaco esferoidal no processo de microfresamento ocorre devido ao atrito e oxidação exotérmica com altas taxas de resfriamento, responsável pela formação de finas dendríticas na superfície da esfera. A Figura 4.14, mostra características do cavaco esferoidal encontrado pelos autores ((DE OLIVEIRA et al., 2019) para o microfresamento do Inconel 718. Estes autores também identificaram outros tipos de cavacos esferoidais.

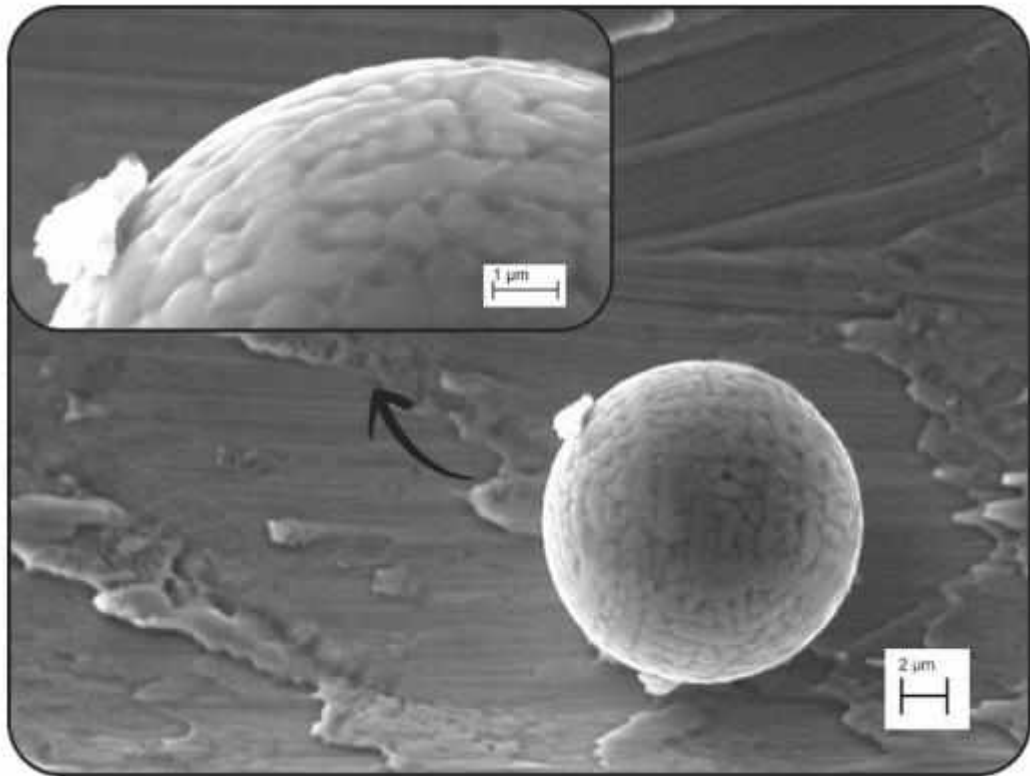


Figure 4.14 - Detalhes de cavaco esferoidal para microfresamento de Inconel 718 (DE OLIVEIRA et al., 2019).

Neste trabalho, também foi verificada a presença do cavaco esferoidal. Estes cavacos foram observados nas condições de corte do Teste 2. Segundo De Oliveira et al. (2019), o cavaco esferoidal pode ficar aderido na superfície da peça, o que justifica a presença deles em ensaios que aplicam fluido de corte.

As Figuras 4.15, 4.16, e 4.17 mostram alguns cavacos esferoidais encontrados nos microcanais. Observa-se que o cavaco da Figura 4.17 apresenta superfície dendrítica. Neste trabalho foram encontrados cavacos esferoidais com diâmetros na faixa de 1 µm e 2 µm.

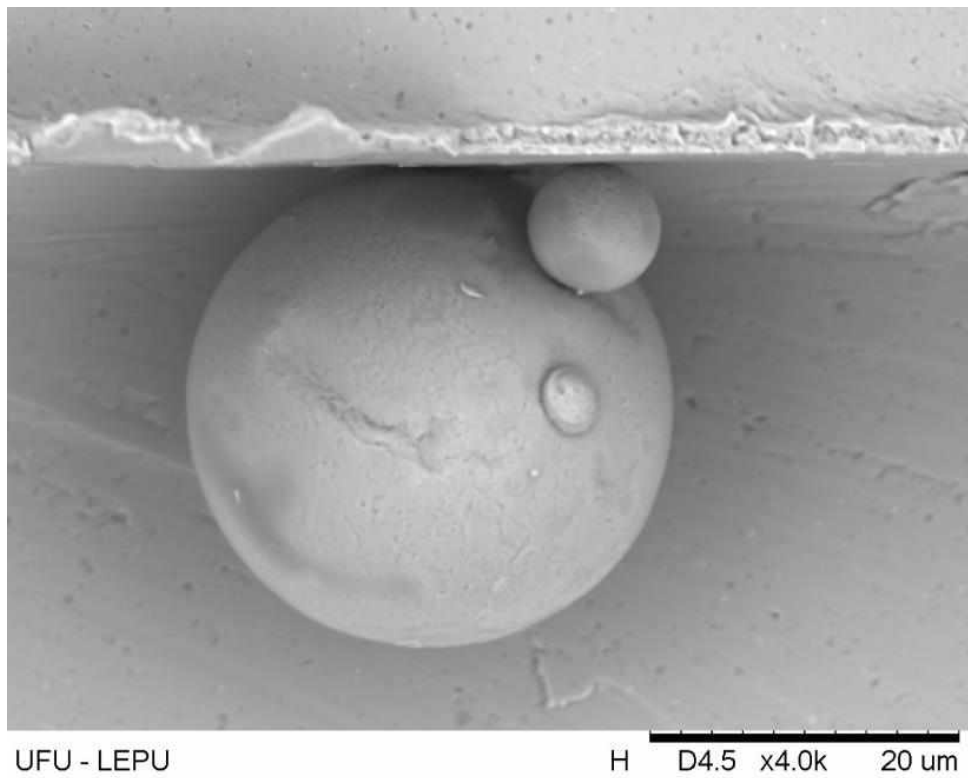


Figure 4.15 - Cavaco esférico no aço ferramenta AISI H13.

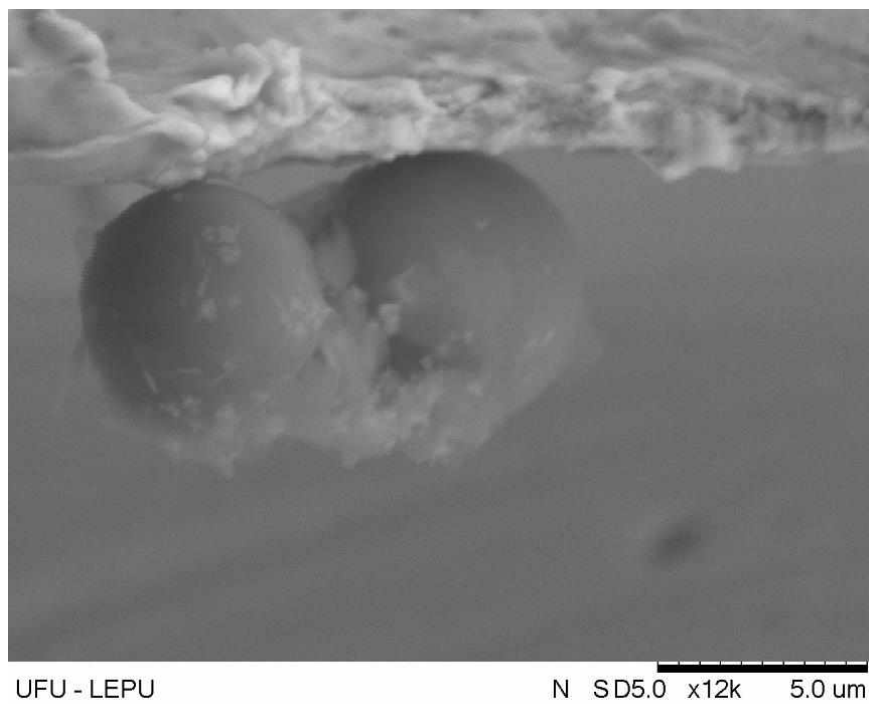


Figure 4.16 - Cavaco esférico no aço ferramenta AISI H13.

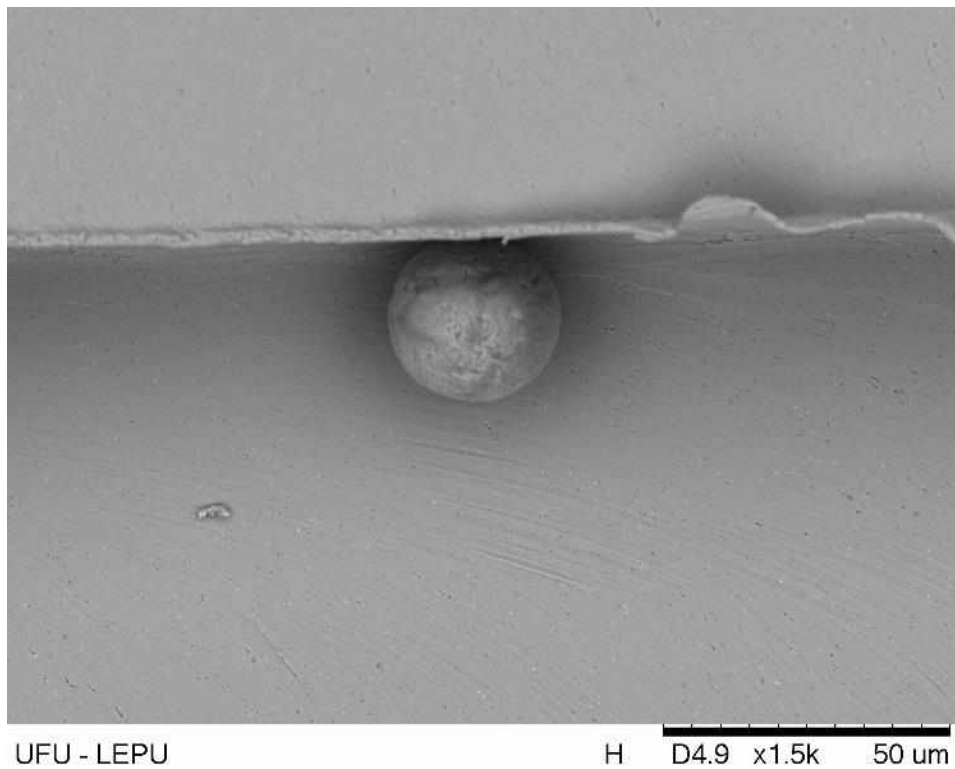


Figure 4.17 -Cavaco esferoidal com superfície dentrítica no aço ferramenta AISI H13.

A dificuldade de encontrar o cavaco esferoidal é alta em razão das dimensões que eles apresentam. A Figura 4.18 ilustra como eles podem passar despercebido e de serem confundidos com rebarbas de maiores extensões. Neste caso, é o cavaco mostrado em maior ampliação na Figura 4.15.

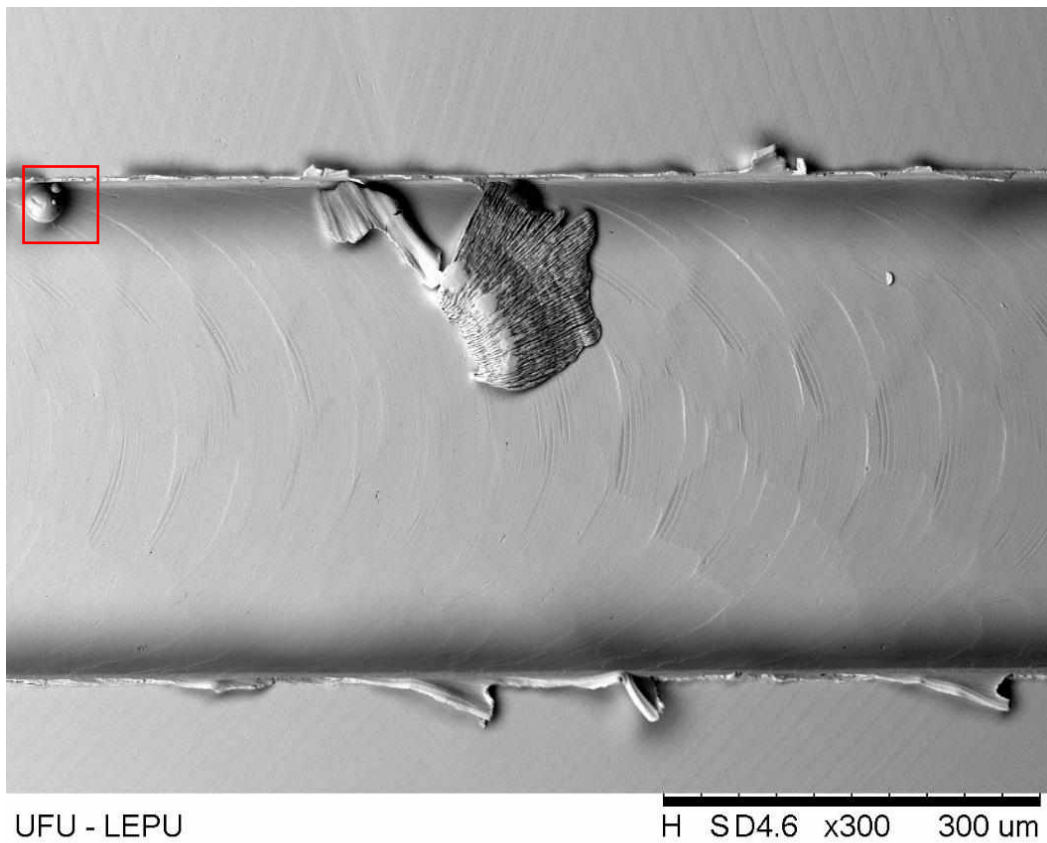


Figure 4.18 – Localização de um cavaco esférico em um dos microcanais usinados.

Para verificar a composição química do cavaco esférico utilizou-se Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). O resultado é mostrado na Figura 4.19. A composição química é compatível com a composição química do aço ferramenta H13.

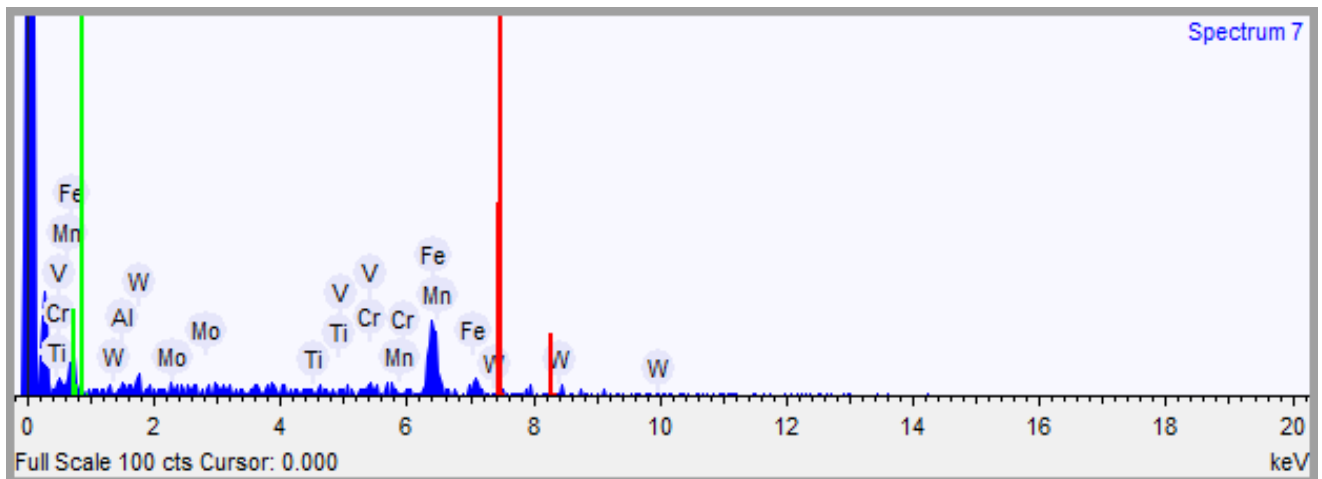


Figure 4.19 – Resultados de EDS no cavaco esférico do aço ferramenta AISI H13

Elemento	Peso %
Alumínio	1,877
Vanádio	2,663
Cromo	5,225
Ferro	88,899
Molibdênio	1,336

4.3 Rugosidade

O acabamento superficial é um requisito essencial para que as peças micro usinadas desempenhem sua função de forma satisfatória. A rugosidade dos microcanais estão diretamente relacionadas com as microferramentas, precisão da máquina-ferramenta, parâmetros de corte, lubrificação, entre outros fatores.

Dentre os parâmetros de amplitude, o desvio aritmético médio, Ra, é o mais empregado, principalmente para controle de processo, tendo em vista que alterações no seu valor representam alterações no processo, especialmente no desgaste da ferramenta (MUMMERY, 1992, MACHADO et al., 2011) e é o parâmetro mais utilizado em trabalhos científicos de microusinagem (SILVA, 2017). O parâmetro Rq tem o efeito de ampliar os valores de pico e vales, podendo assim evidenciar defeitos ou marcas em superfícies bem-acabadas. (MACHADO et al., 2011).

Nesta seção são apresentados os valores de rugosidade Ra e Rq obtidos para os canais microfresados para cada condição de corte especificada. A média dos valores obtidos nos experimentos com o desvio padrão com intervalo de confiança de 68,27 %, são mostrados nas Figuras 4.20 e 4.21 que apresentam, respectivamente, a influência da variação do avanço por dente e variação da profundidade de corte.

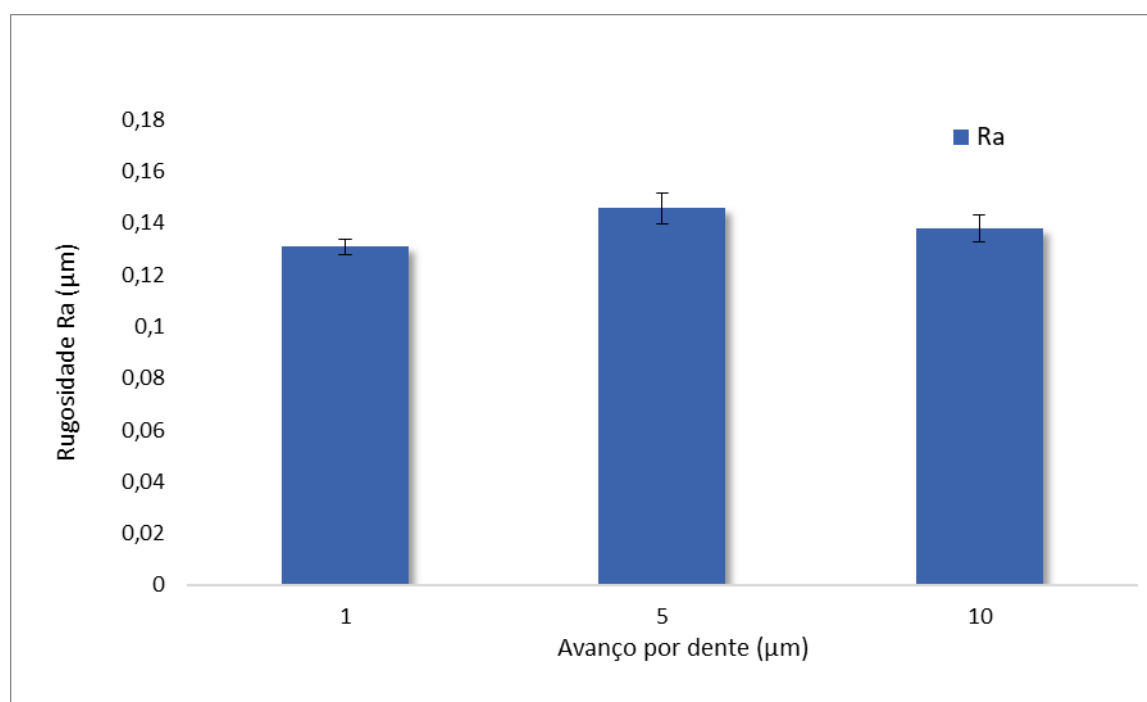


Figure 4.20 - Influência da variação do avanço por dente (1 $\mu\text{m}/\text{dente}$, 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$ e 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$) na rugosidade Ra.

As rugosidades obtidas são comparáveis à retificação, que variam entre 0,2 e 1,6 μm (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2013). Ao analisar a Figura 4.20 observa-se que para a condição de avanço por dente de 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$ (Teste 2) tem-se as maiores médias de rugosidade Ra, 0,1457 μm . Os resultados para a condição de avanço por dente de 1 $\mu\text{m}/\text{dente}$ (Teste 1) e 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$ (Teste 3) foram 10,23 % e 5,36 % menores que o Teste 2, respectivamente, com rugosidade superficial média de 0,1308 μm e 0,1379 μm . Nos processos convencionais é de se esperar um aumento da rugosidade com o avanço. No entanto, no microfresamento, os fenômenos são um pouco diferentes, como mostram os resultados, que, de certa maneira, colaboram com os resultados da literatura. Shizuka et al (2011) pesquisaram a influência do avanço e da penetração de trabalho no microfresamento do aço ferramenta com ferramentas de metal duro e revestidas com (Al, Ti) N com 0,9 mm de diâmetro, e observaram que o aumento do avanço e da penetração de trabalho apresentam pouca influência na rugosidade. Bruschi et al. (2016), investigaram a influência do avanço por dente em duas condições de corte, a seco e com MQL, para microfresamento do Ti-6Al-4V. Foi constatado que para pequenos valores de avanço o *ploughing* contribui muito com a rugosidade da superfície. Bissacco, Hansen e De Chifre (2005), ao estudarem o processo de microfresamento para a fabricação de moldes para

micro injeção de polímeros, constataram que aumentar o avanço ocorre a redução da rugosidade, devido ao efeito escala.

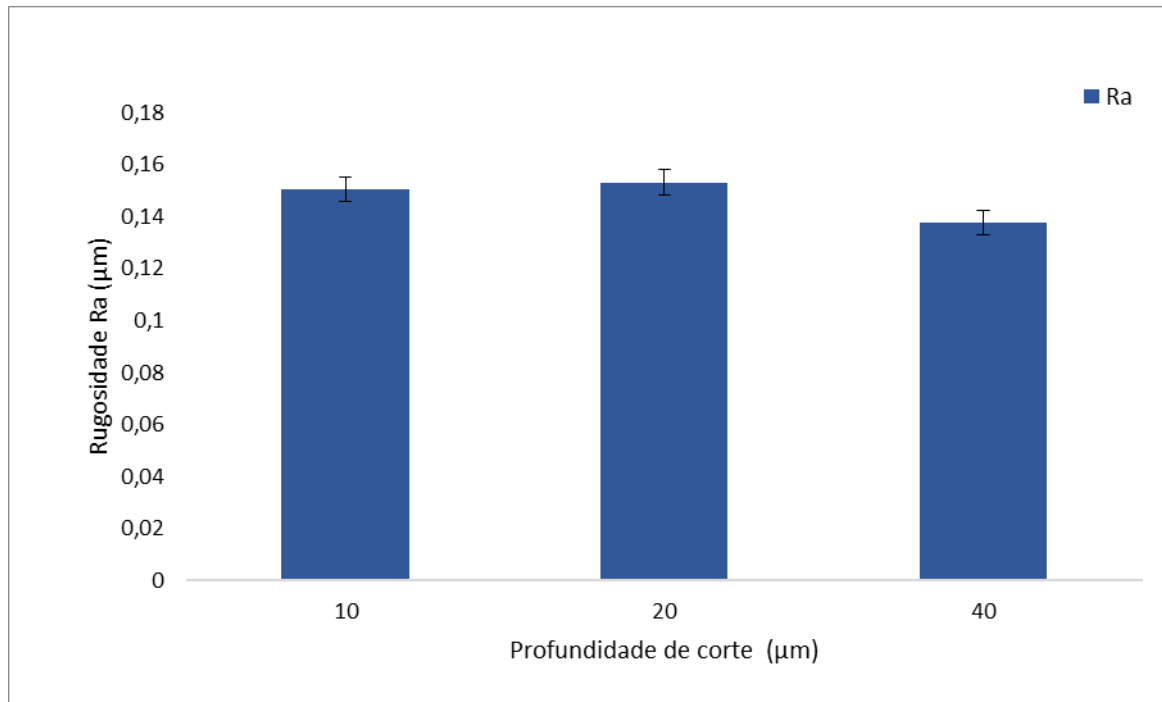


Figure 4.21 - Influência da variação da profundidade de corte (10 µm, 20 µm e 40 µm) na rugosidade Ra do Aço ferramenta AISI H13.

A condição de profundidade de corte de 40 µm (Teste 2) apresentou o menor resultado de rugosidade Ra, 0,1457 µm, dentre as profundidades de corte analisadas. A profundidade de corte de 10 µm (Teste 5) e 20 µm (Teste 4) foram, respectivamente, 3,36 % e 5,15 % maiores que o Teste 2. A redução da profundidade de corte aumenta a energia específica de corte, devido ao aumento da tensão de cisalhamento de fluxo de material (KOPALINSKY E OXLEY, 1984).

Além da média da rugosidade, pode-se observar o comportamento da rugosidade Ra em função do comprimento usinado, dos testes e das réplicas, os gráficos são mostrados nas Figuras 4.22, 4.23 4.24 e 4.25 e 4.26. Estes gráficos representam a influência do desgaste da ferramenta na rugosidade. De acordo com os resultados, a rugosidade Ra não poderia ser utilizada como critério de fim de vida da ferramenta.

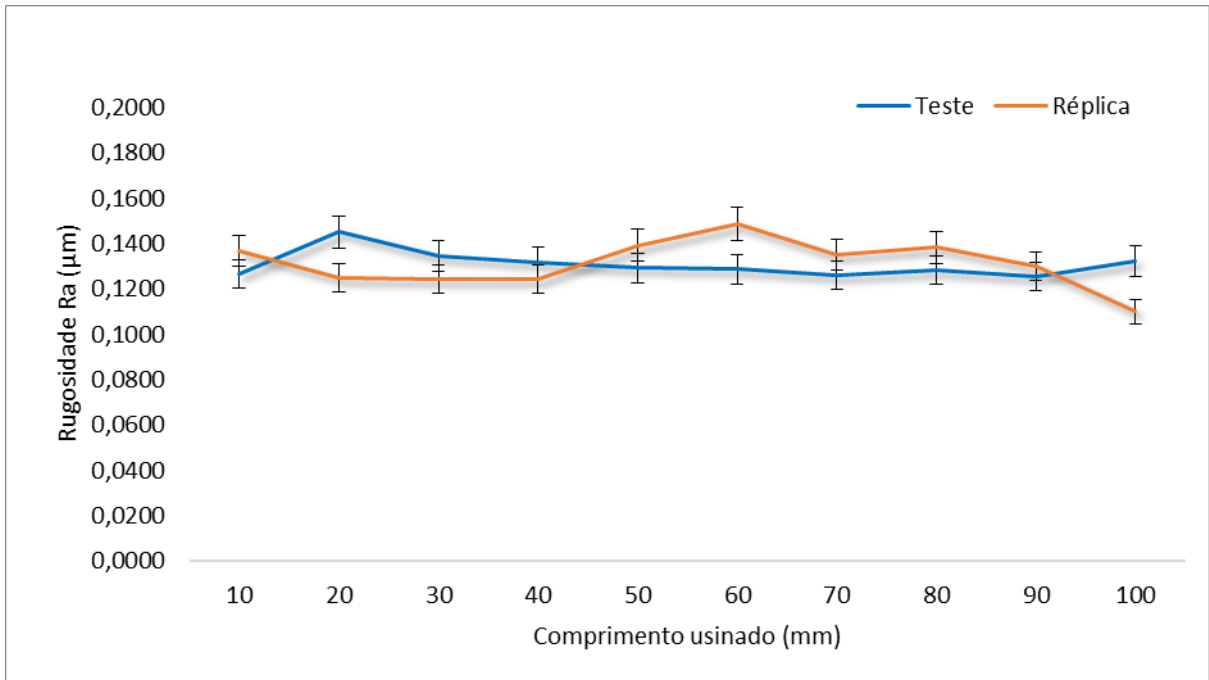


Figure 4.22 - Rugosidade Ra no comprimento usinado (Teste 1: $a_p = 40 \mu\text{m}$ e $f_z = 1 \mu\text{m/dente}$).

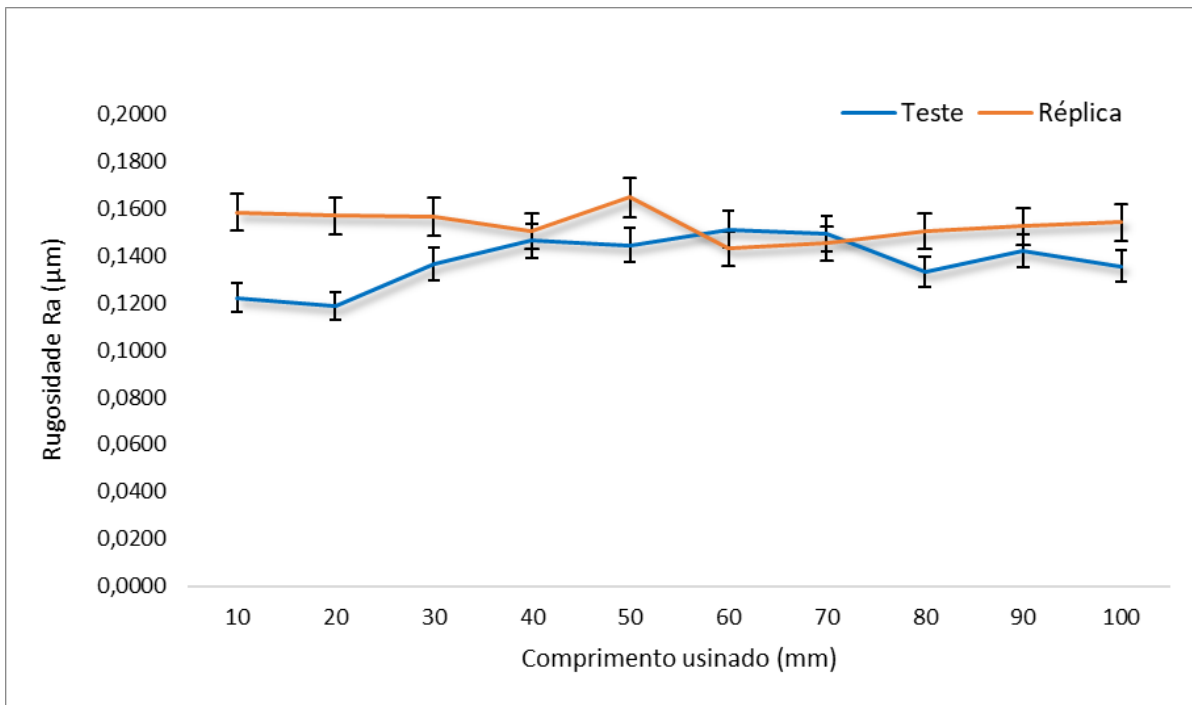


Figure 4.23 - Rugosidade Ra no comprimento usinado (Teste 2: $a_p = 40 \mu\text{m}$ e $f_z = 5 \mu\text{m/dente}$).

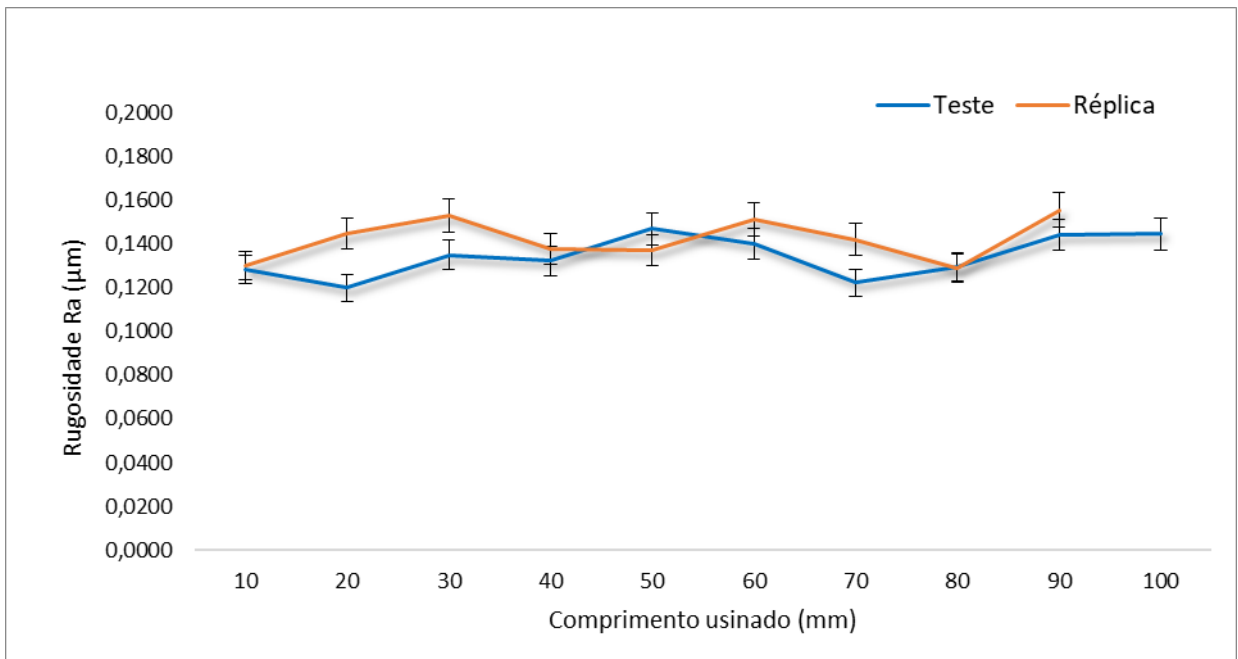


Figure 4.24 - Rugosidade Ra no comprimento usinado (Teste 3: $a_p = 40 \mu\text{m}$ e $f_z = 10 \mu\text{m/dente}$).

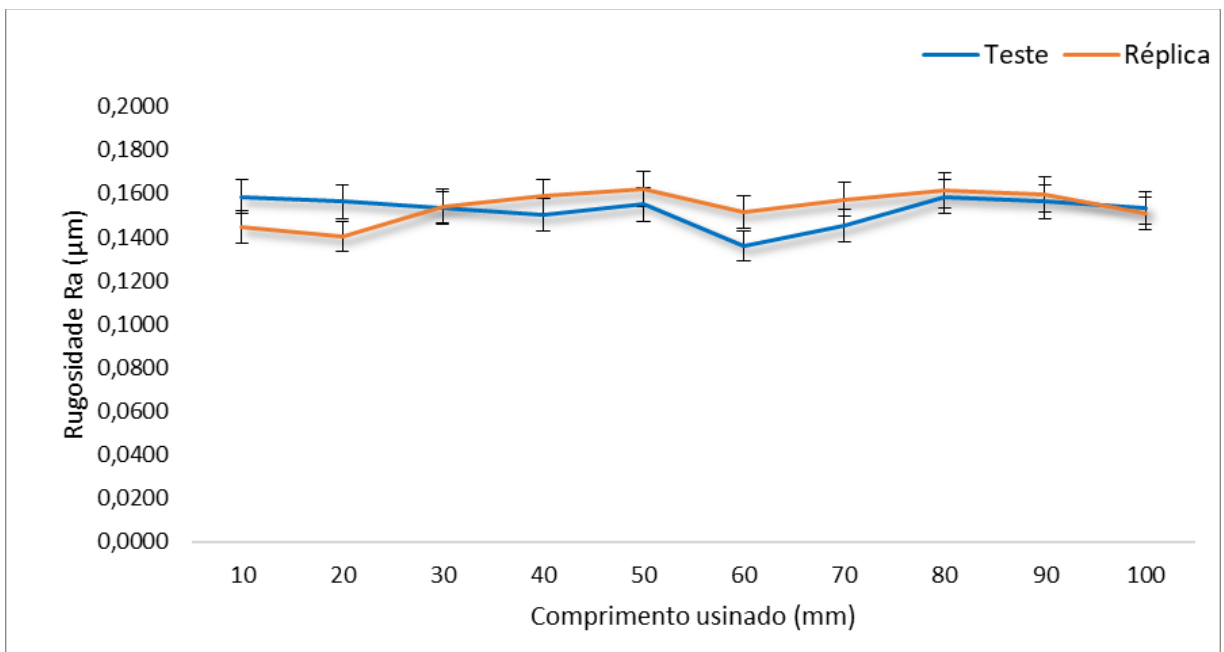


Figure 4.25 - Rugosidade Ra no comprimento usinado (Teste 4: $a_p = 20 \mu\text{m}$ e $f_z = 5 \mu\text{m/dente}$).

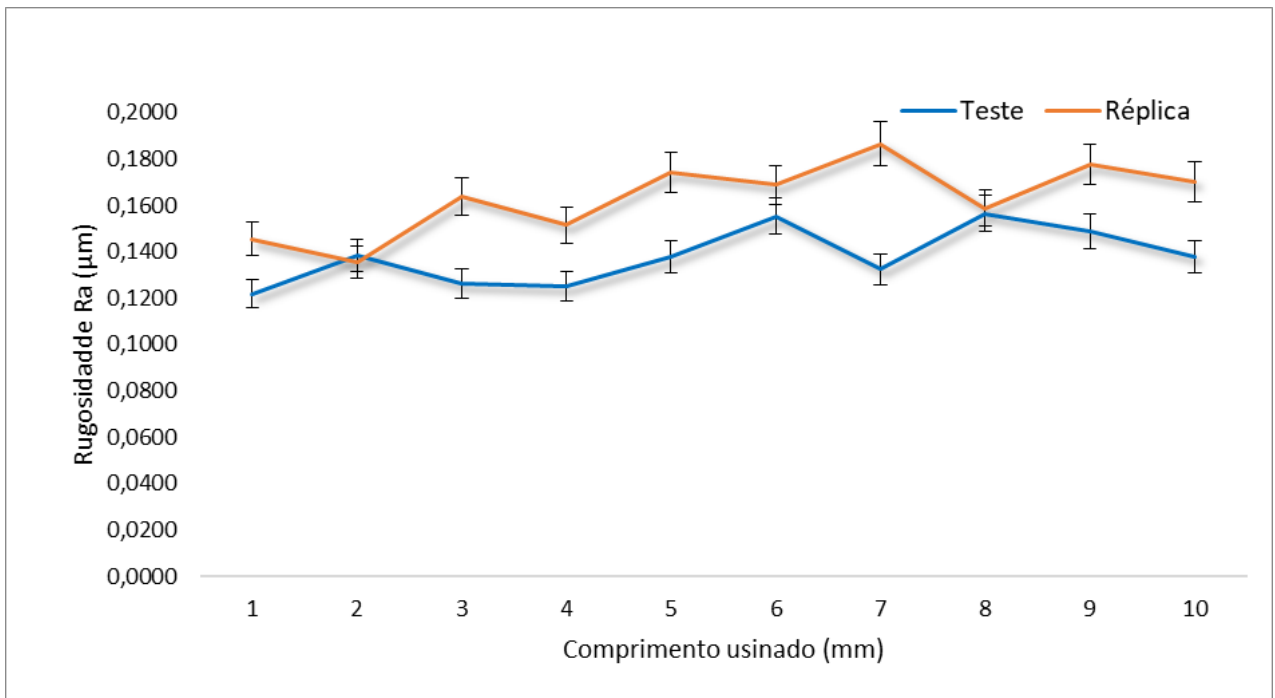


Figure 4.26 - Rugosidade Ra no comprimento usinado (Teste 5: $a_p = 10 \mu\text{m}$ e $f_z = 5 \mu\text{m/dente}$).

A rugosidade Ra varia de $0,131 \mu\text{m}$, a $0,1648 \mu\text{m}$, entre as condições de cortes estudadas. Percebe-se que os valores encontrados são pequenos quando comparado com processos convencionais de usinagem. Analisando o comportamento da rugosidade Ra percebe-se que houve pouca variação ao longo do comprimento usinado.

Ao comparar as imagens dos primeiros canais, observa-se que as marcas de avanço da microferramentas são mais evidentes quando comparado com os últimos canais, como mostrado na Figura 4.27 e no perfil de rugosidade obtido, mostrados nas Figuras 4.28 e 4.29. Este comportamento pode ser observado em todas as condições de corte, incluindo as condições nas quais obteve-se maiores valores da rugosidade Ra em função comprimento usinado, causado devido ao desgaste da microferramentas.

Observa-se uma redução dos picos e vales, entretanto há um aumento da profundidade dos vales

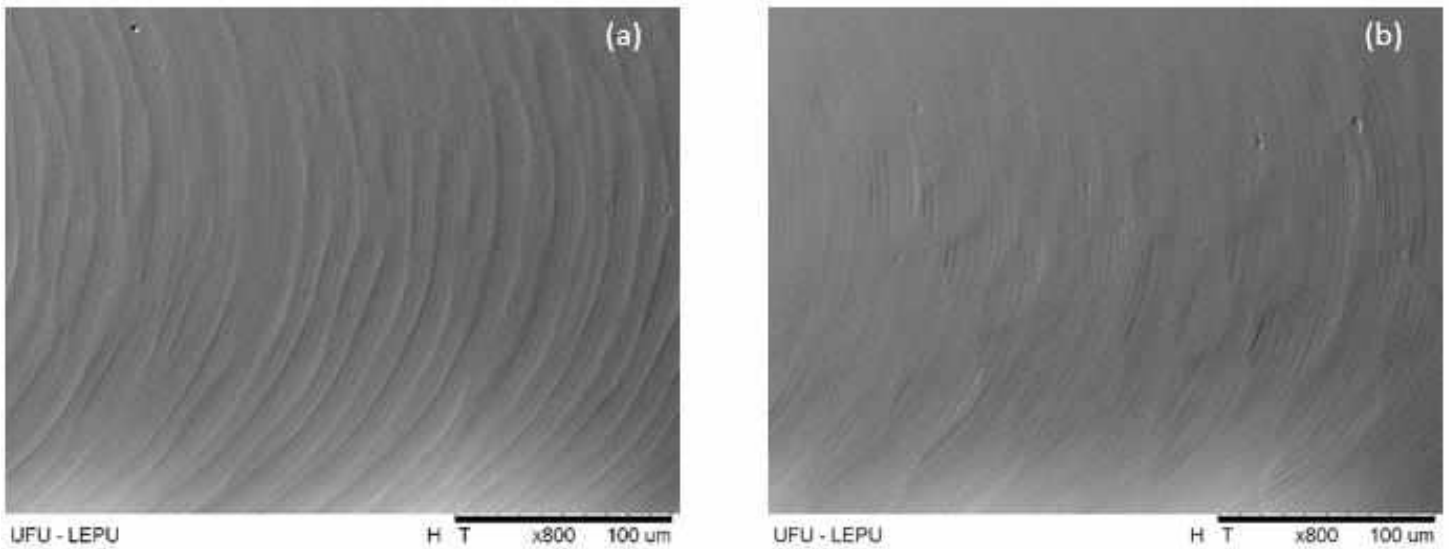


Figure 4.27 - Superfície usinada (a) do primeiro canal e (b) do último canal nas condições de corte do Teste 4 ($a_p = 20 \mu\text{m}$ e $f_z = 5 \mu\text{m/dente}$).

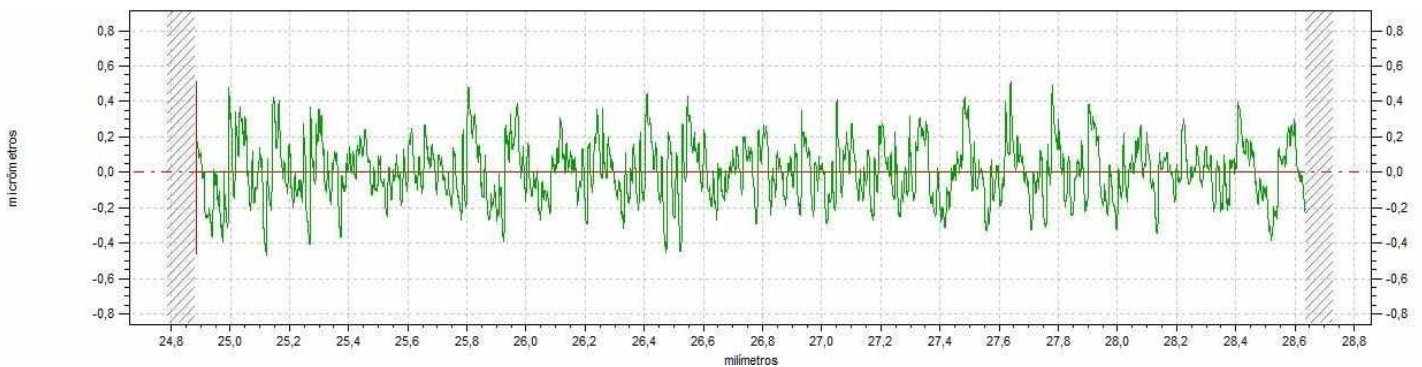


Figure 4.28 - Perfil de rugosidade do primeiro canal do Teste 4 ($a_p = 20 \mu\text{m}$ e $f_z = 5 \mu\text{m/dente}$).

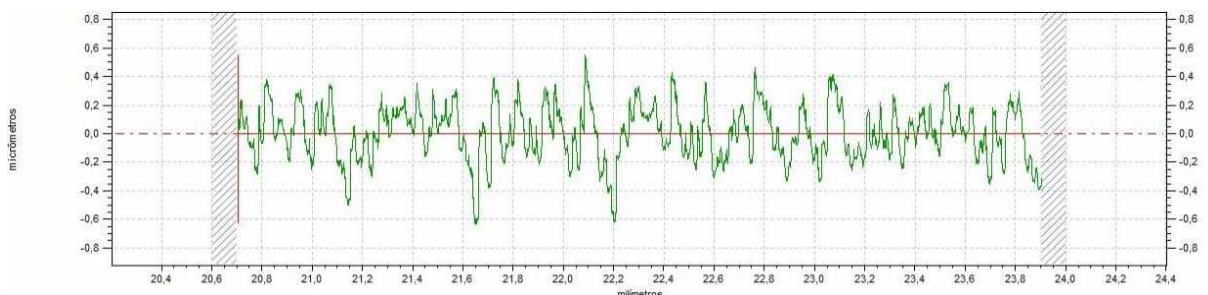


Figure 4.29 - Perfil de rugosidade do último canal do Teste 4 ($a_p = 20 \mu\text{m}$ e $f_z = 5 \mu\text{m/dente}$).

Para verificar a influência do avanço por dente e a profundidade de corte, assim como o comprimento usinado na rugosidade superficial Ra, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) a um nível de significância de 5% e intervalo de confiança de 95 %, com dois fatores em cada análise, sendo três níveis para os parâmetros de corte e dez níveis para o comprimento usinado. O resultado do R² para os modelos foram de e 57,96 % e 34,91 % respectivamente.

Tabela 4.1 - Resultados da ANOVA para a rugosidade superficial Ra

Fator	f-valor	p-valor
Comprimento usinado	0,04	1,0
Avanço por dente	21,03	0,0
Avanço por dente e comprimento usinado	0,2	0,1

Tabela 4.2 - Resultados da ANOVA para a rugosidade superficial Ra

Fator	f-valor	p-valor
Comprimento usinado	0,47	0,561
Profundidade de corte	1,51	0,237
Comprimento usinado e Profundidade de corte	0,45	0,962

Conforme observa-se as Tabelas 4.1 e 4.2, para um níveis de significância de 5%, somente o parâmetro de avanço por dente possui influência significativa na rugosidade Ra.

Nesta seção também foi analisada o comportamento das médias de rugosidade Rq, visto que é um parâmetro mais sensível a variações da superfície. Na Figura 4.30 e 4.31 tem-se os gráficos da influência da variação do avanço por dente e profundidade de corte na rugosidade Rq, respectivamente, os resultados apresentam desvio padrão com intervalo de confiança de 68,27 %.

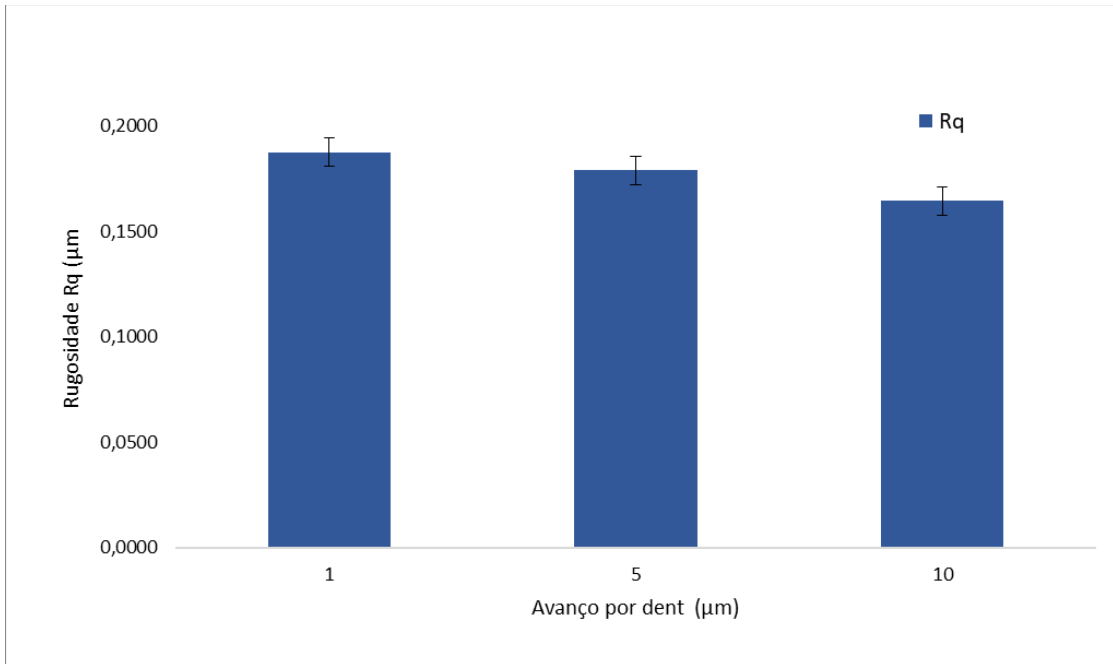


Figure 4.30 - Influência da variação do avanço por dente no aço ferramenta AISI H13.

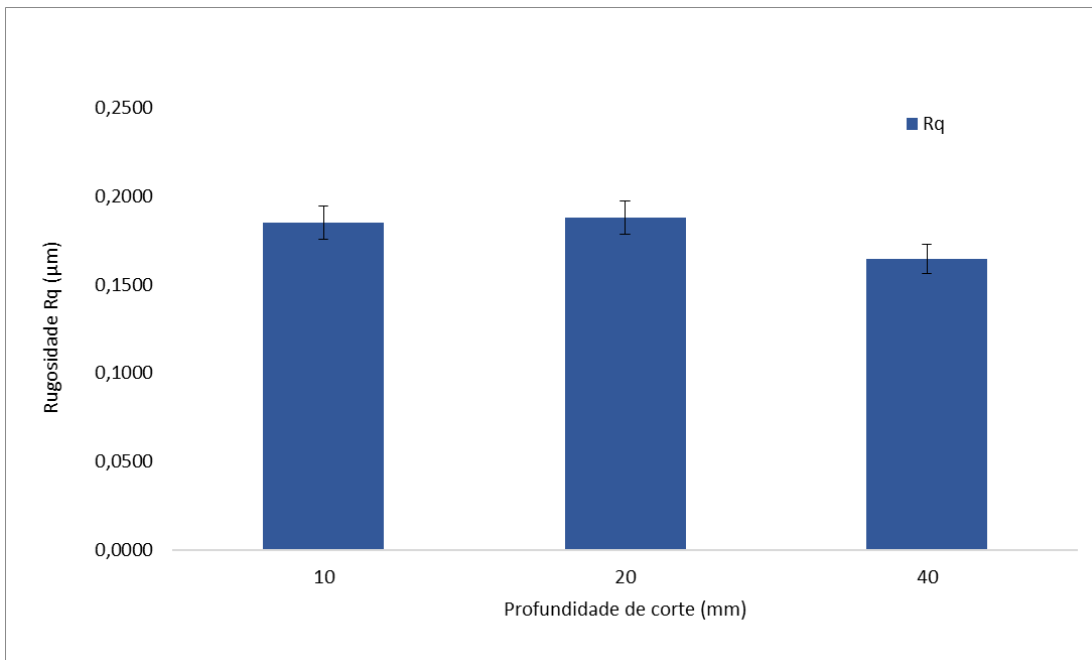


Figure 4.31 - Influência da variação da profundidade de corte no aço ferramenta AISI H13.

Nota-se que os resultados obtidos para o parâmetro de rugosidade R_q apresenta comportamento semelhante ao comportamento da rugosidade R_a , o que indica que não há a presença de picos ou vales destacados no perfil. Os valores de rugosidade R_q variaram de $0,1631 \mu\text{m}$ a $0,2254 \mu\text{m}$, Visto que a rugosidade R_q apresentou o mesmo comportamento que a rugosidade R_a não foi necessário a inclusão da análise de variância (ANOVA).

4.3.1 Análise da superfície usinada no MEV

A Figuras 4.32 contém imagens dos microcanais obtidas por MEV a fim de complementar os estudos sobre rugosidade e analisar qualitativamente a superfície usinada. Pode-se observar as marcas de avanço das microferramentas no fundo dos canais e a presença de rebarba, essa serão discutidas posteriormente. São apresentadas imagens dos primeiro, quinto (5 mm) e décimo (10 mm) canal para todas as condições de corte analisadas.

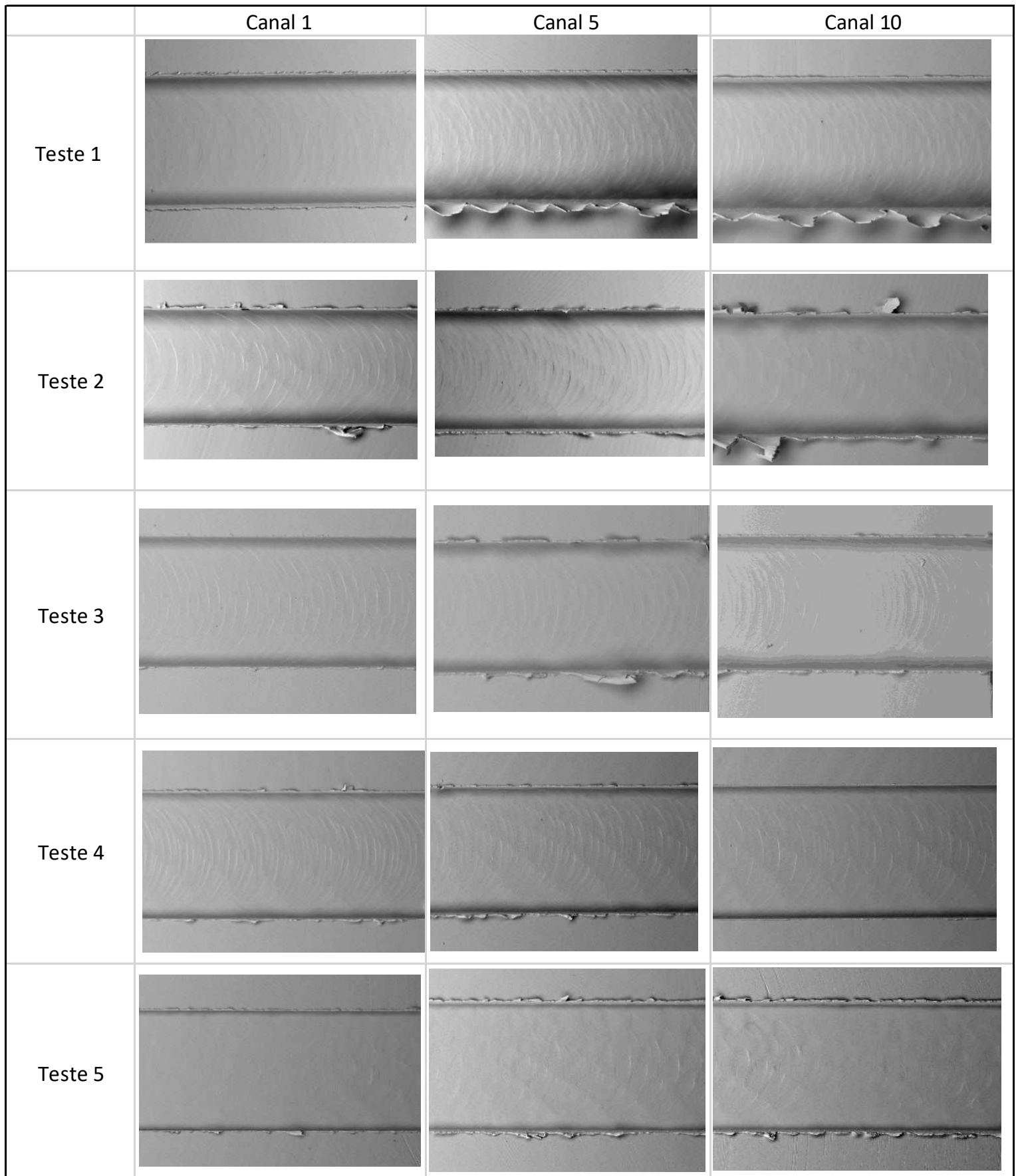

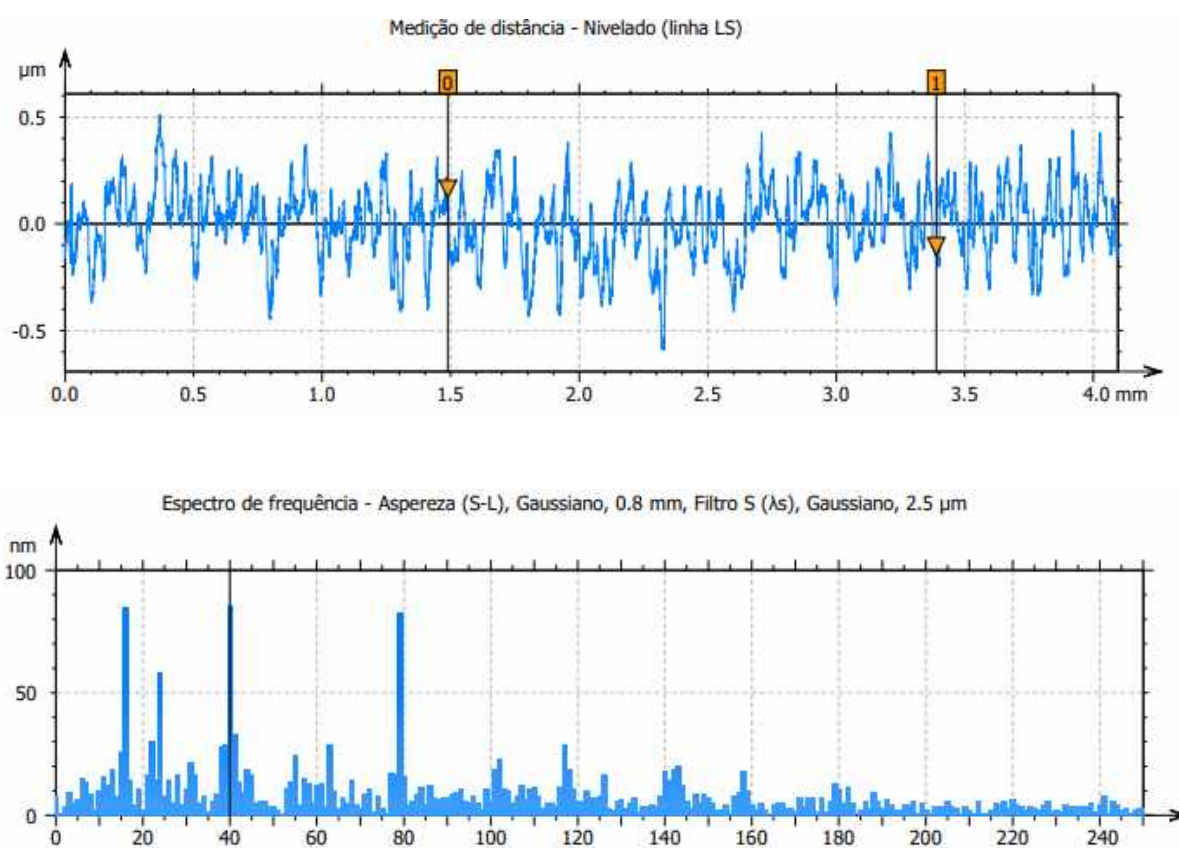


Figure 4.32 - Superfícies usinadas


300 μm

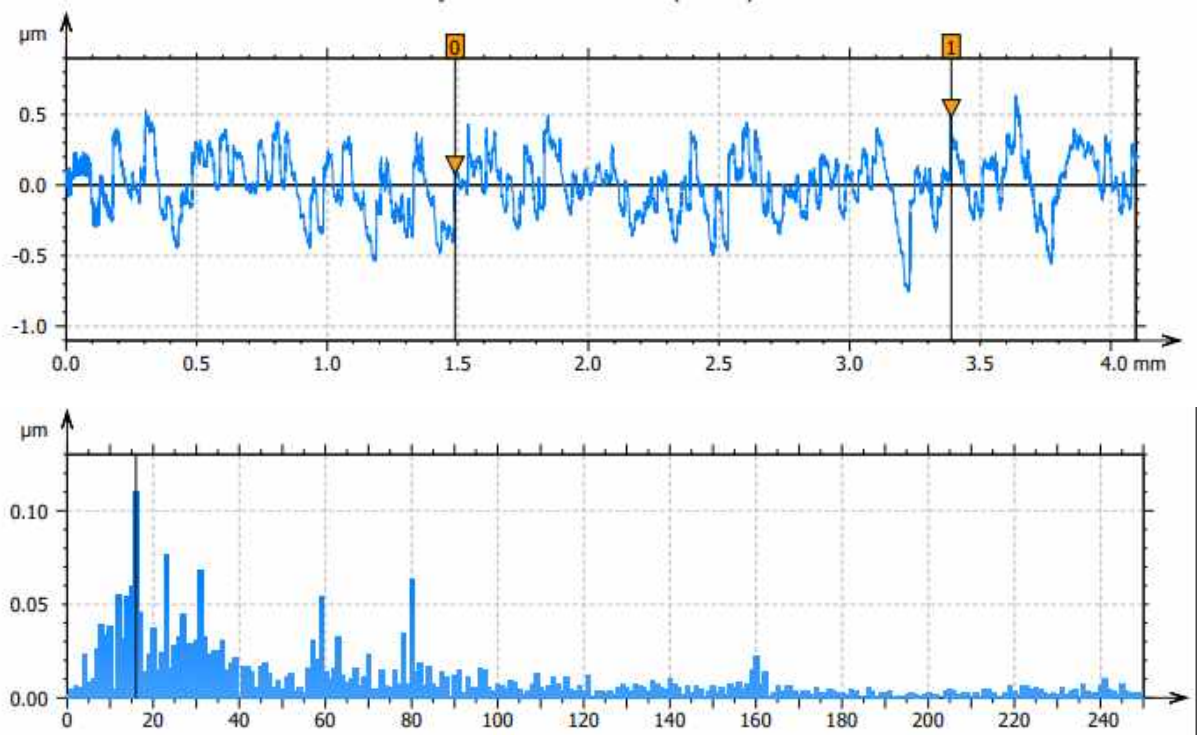
Observando as superfícies do Teste 2 tem-se marcas mais evidentes no Canal 5 e marcas mais suaves no Canal 10, tal comportamento foi perceptível no comportamento da rugosidade R_a , apresentado anteriormente na Figura 4.23 no qual ocorre um aumento na rugosidade com 5 mm de comprimento usinado e posteriormente, a rugosidade diminui um pouco.

Pode-se observar a presença de marcas incomuns no fundo dos canais que sugerem vibração. As marcas parecem seguir um padrão. Para identificar a frequência deste sinal ou o comprimento de onda, realizou-se uma análise do espectro do perfil de rugosidade (*power spectrum*). Os resultados são mostrados nas Figuras 4.33, 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37.



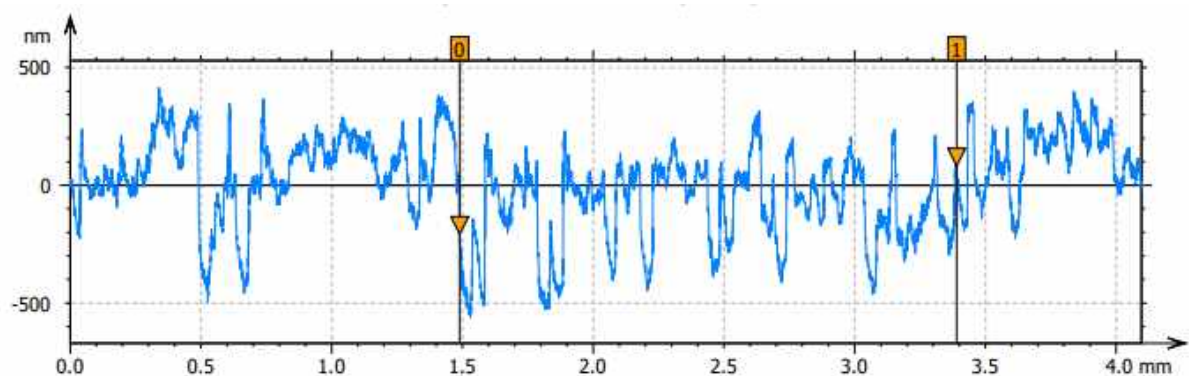
Parâmetro	Valor	Unidade
Comprimento de onda N° 40	100	μm
Comprimento de onda N° 79	50.64	μm
Comprimento de onda N° 16	250.0	μm

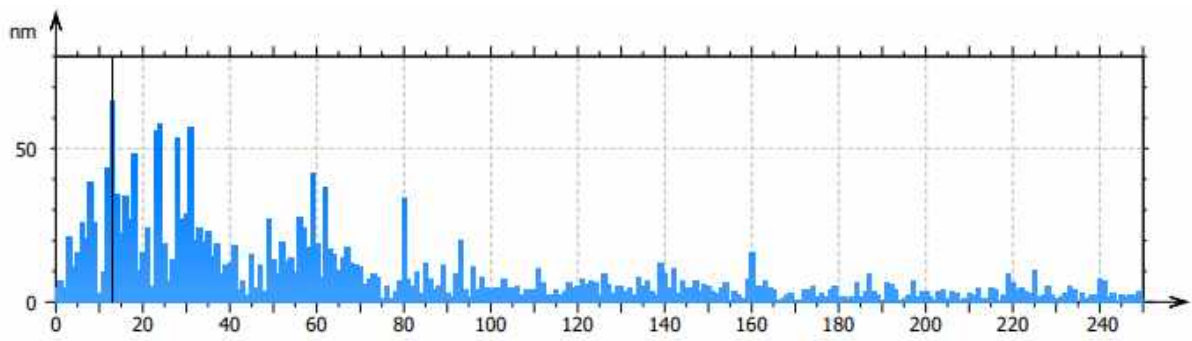
Figure 4.33 - Perfil de rugosidade, espectro de frequência e comprimento de ondas encontrado para a condição de corte do Teste 1.



Parâmetro	Valor	Unidade
Comprimento de onda N° 16	250,0	μm
Comprimento de onda N° 23	173,9	μm
Comprimento de onda N° 80	50,0	μm

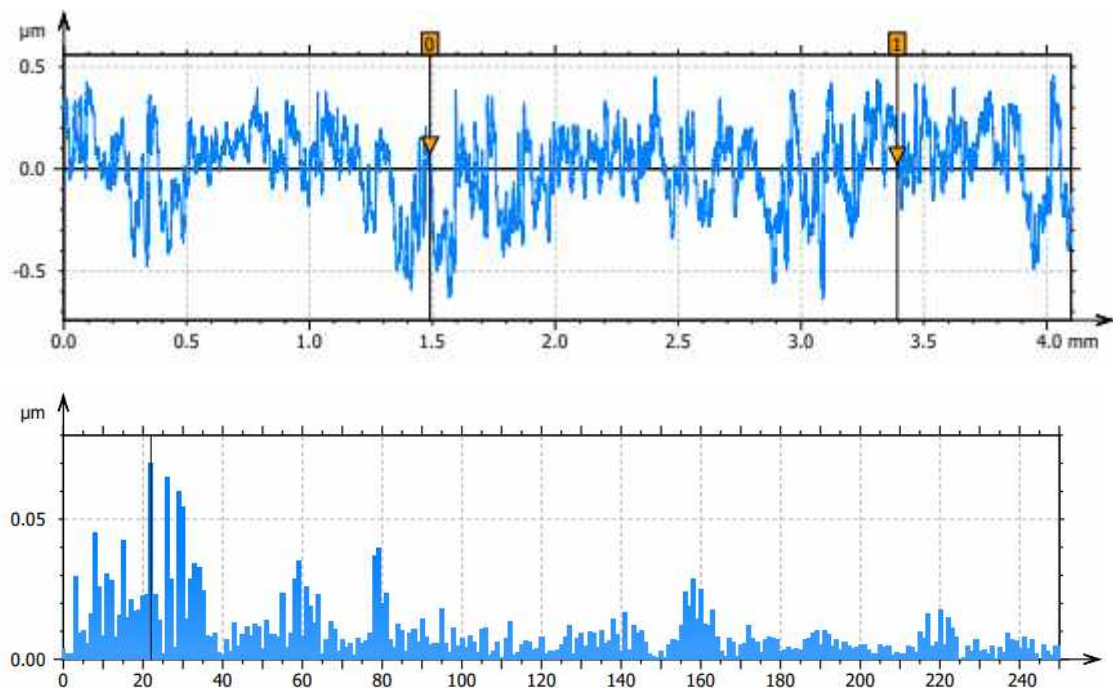
Figure 4.34 -Perfil de rugosidade, espectro de frequência e comprimento de ondas encontrado para a condição de corte do Teste 2.





Parâmetro	Valor	Unidade
Comprimento de onda N° 13	307,7	μm
Comprimento de onda N° 24	58,31	μm
Comprimento de onda N° 59	67,81	μm
Comprimento de onda N° 13	307,7	μm

Figure 4.35 - Perfil de rugosidade, espectro de frequência e comprimento de ondas encontrado para a condição de corte do Teste 3.



Parâmetro	Valor	Unidade
Comprimento de onda N° 22	181,8	μm
Comprimento de onda N° 26	153,9	μm
Comprimento de onda N° 79	50,64	μm

Figure 4.36 - Perfil de rugosidade, espectro de frequência e comprimento de ondas encontrado para a condição de corte do Teste 4.

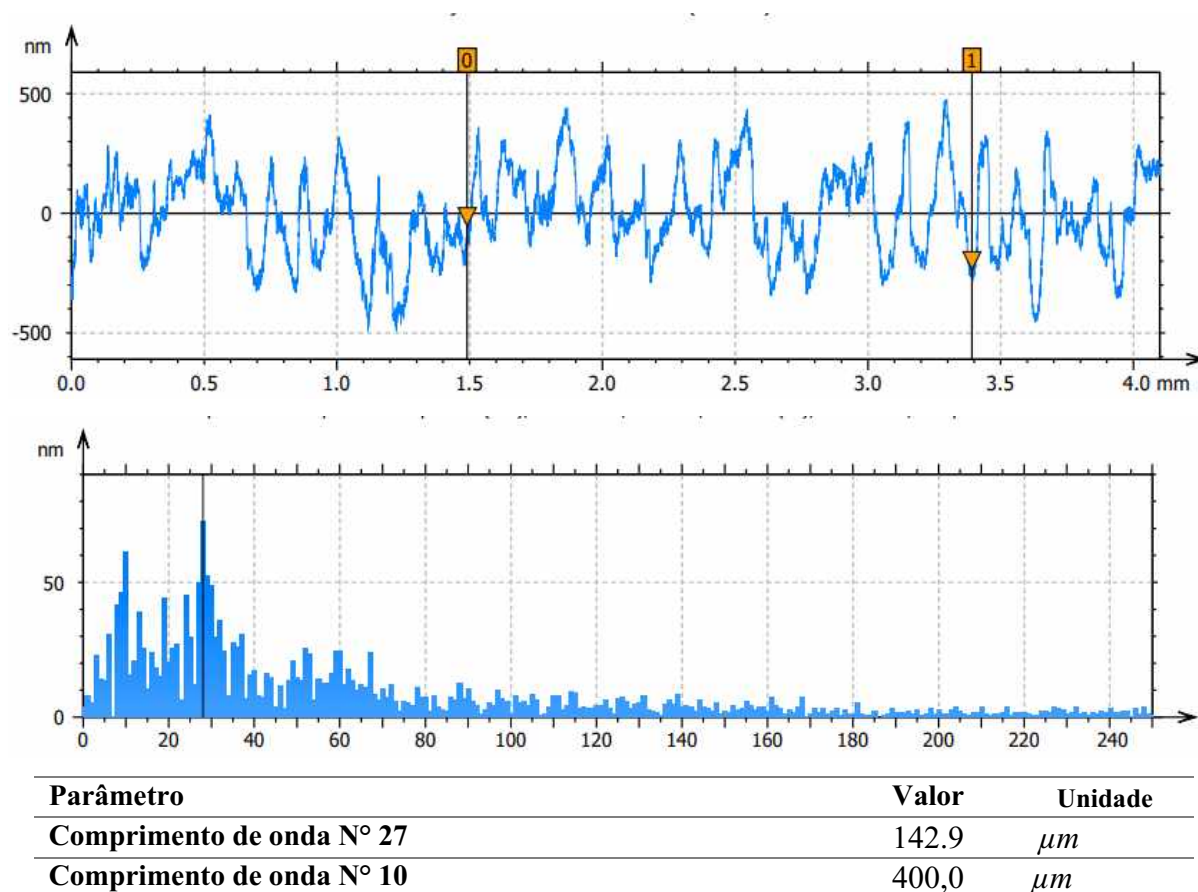


Figure 4.37 - Perfil de rugosidade, espectro de frequência e comprimento de ondas encontrado para a condição de corte do Teste 5.

O espectro do perfil de rugosidade pode ser utilizado para identificar problemas numa superfície usinada (WHITEHOUSE, 2002). Esperava-se que comprimento de onda fundamental representasse o avanço, como ocorreria para um perfil de rugosidade teórico. O espectro seria complementado por alguns harmônicos, visto que o perfil da ferramenta não é senoidal. Os resultados, no entanto, mostram que a rugosidade sofre influência de outros fatores, o que pode incluir a rigidez da máquina-ferramenta ou vibrações e *chatter*. O *chatter* pode ser definido como uma vibração auto excitada causada por força alternada produzida pela relação peça-ferramenta em um processo de usinagem (Yue et al., 2019). Esta vibração aumenta a instabilidade do processo e dificulta o controle do fenômeno. Além de afetar a qualidade da superfície da peça, o *chatter* pode ocasionar uma falha catastrófica da ferramenta, incluindo

ferramentas de dimensões reduzidas e rotativas, além de reduzir a vida útil da máquina ferramenta (CHAE; PARK; FREIHET 2006).

Os resultados sugerem então, a presença de *chatter* no processo. Isto precisa ser investigado em trabalhos futuros.

4.3.2 Interferômetro

As Figuras 4.38, mostra a topografia das superfícies do fundo dos canais nas condições de corte com profundidade de corte de 40 μm , avanço de 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$ (Teste 3). Não foi possível realizar as medições com o interferômetro ótico para todas as condições de corte estudadas. Assim, estas medições foram utilizadas para comparar com o perfilômetro utilizado no laboratório. Visto que a utilização do perfilômetro é um pouco mais difícil pelo fato da necessidade de posicionar o apalpador dentro do canal e alinha o movimento do perfilômetro para evitar que o apalpador saia do canal durante a medição.

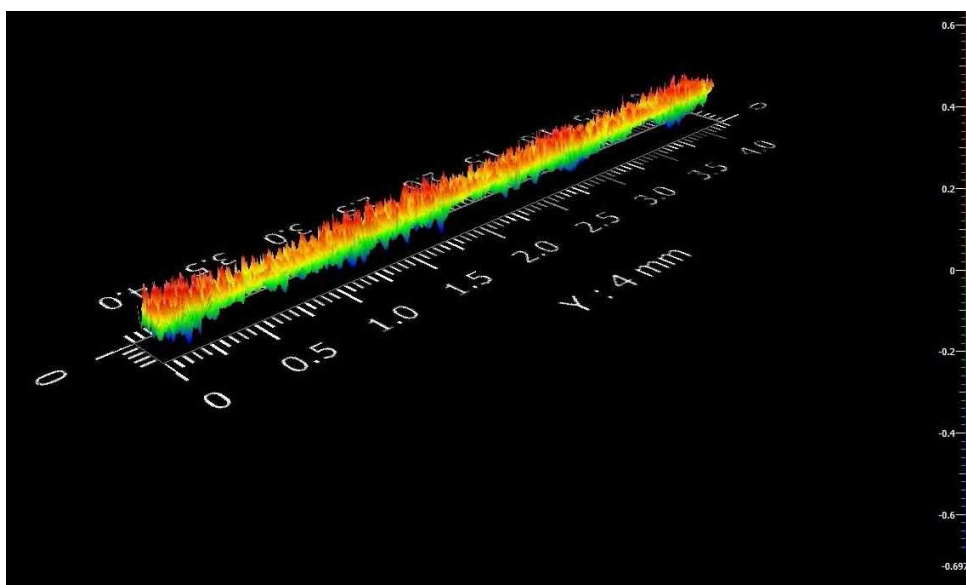


Figure 4.38 -Topografia da superfície em 3D com comprimento de 4 mm.

O parâmetro de rugosidade S_a (média aritmético da altura) é o parâmetro que expande em três dimensões o R_a . Conforme mostrado na figura, ele representa apresenta a média aritmética da ordenada absoluta $Z(x, y)$ segundo uma área. Vale ressaltar que o parâmetro S_a não permite a distinção entre picos e vales atípicos na superfície.

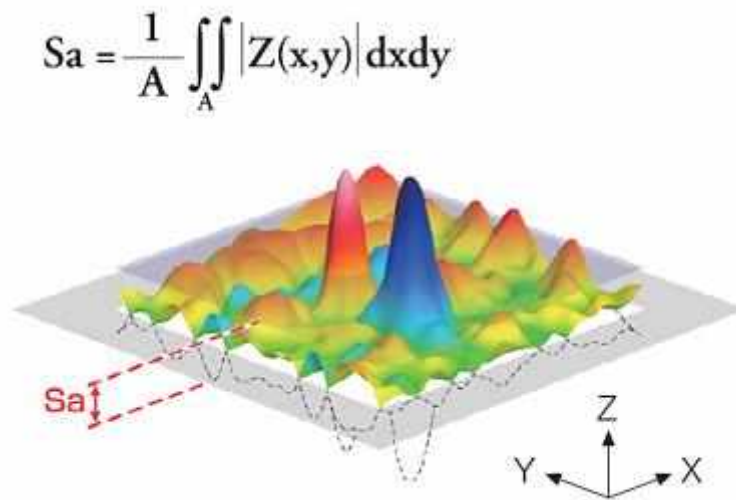


Figure 4.39 - Média Aritmético da altura (Sa).

Para verificar comportamento do parâmetro Sa em função do comprimento usinado, do Teste 3 e a respectiva réplica, observa-se os gráficos na Figura 4.40.

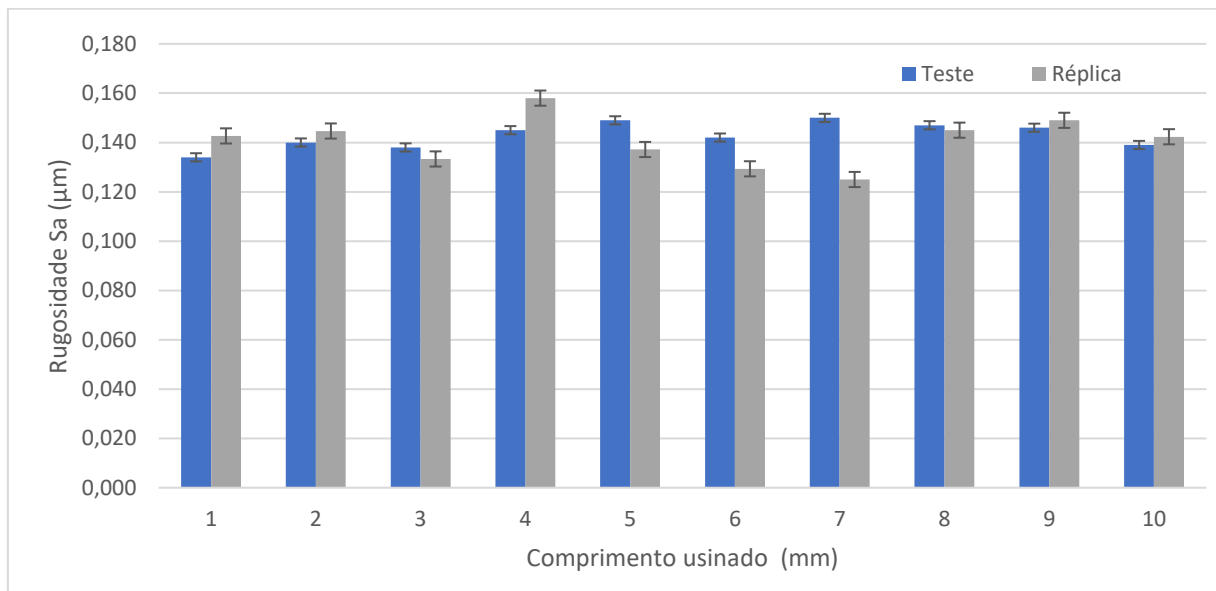


Figure 4.40 - Rugosidade Sa no comprimento usinado.

Os valores de rugosidade Sa estão aproximadamente entre 0,120 µm a 0,160 µm.

Com o uso do interferômetro ótico é possível obter perfis em 2D a partir de uma topografia da superfície usinada em 3D, conforme mostrado nas Figuras 4.41 e 4.42

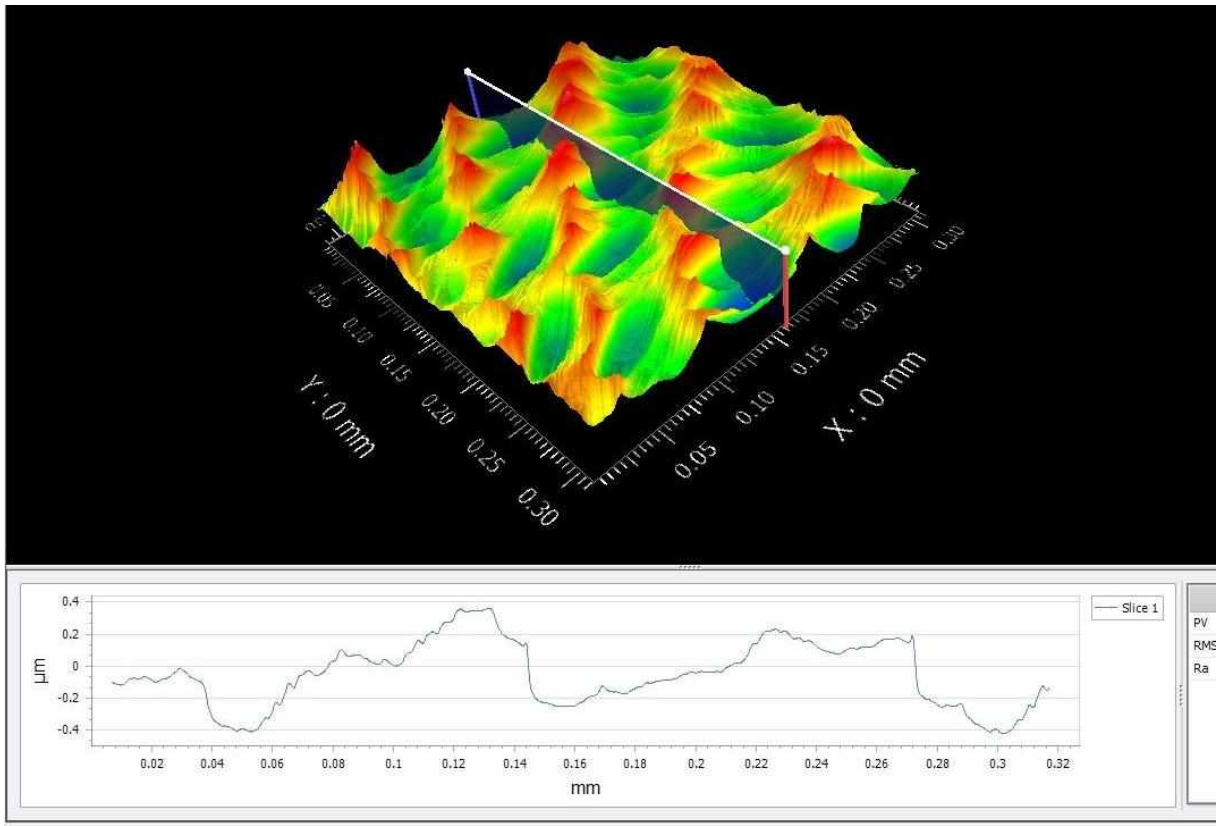


Figure 4.41 - Topografia da superfície em 3D e perfil de rugosidade 2D.

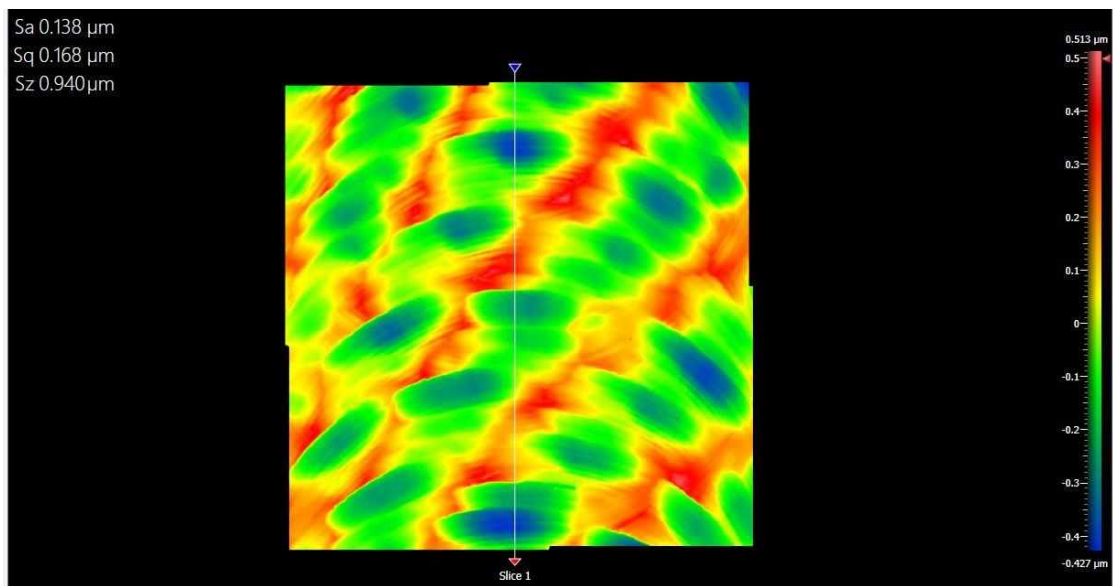


Figure 4.42 - Topografia da superfície em 2D com área de

Desta forma, pode-se comparar os resultados da rugosidade Ra obtidos por meio do interferômetro e do perfilômetro, conforme mostrado no gráfico da Figura 4.43. Concluiu-se que não há diferenças estatísticas entre os dois equipamentos, podendo assegurar que os resultados apresentados na seção anterior, correspondem ao perfil real da superfície usinada.

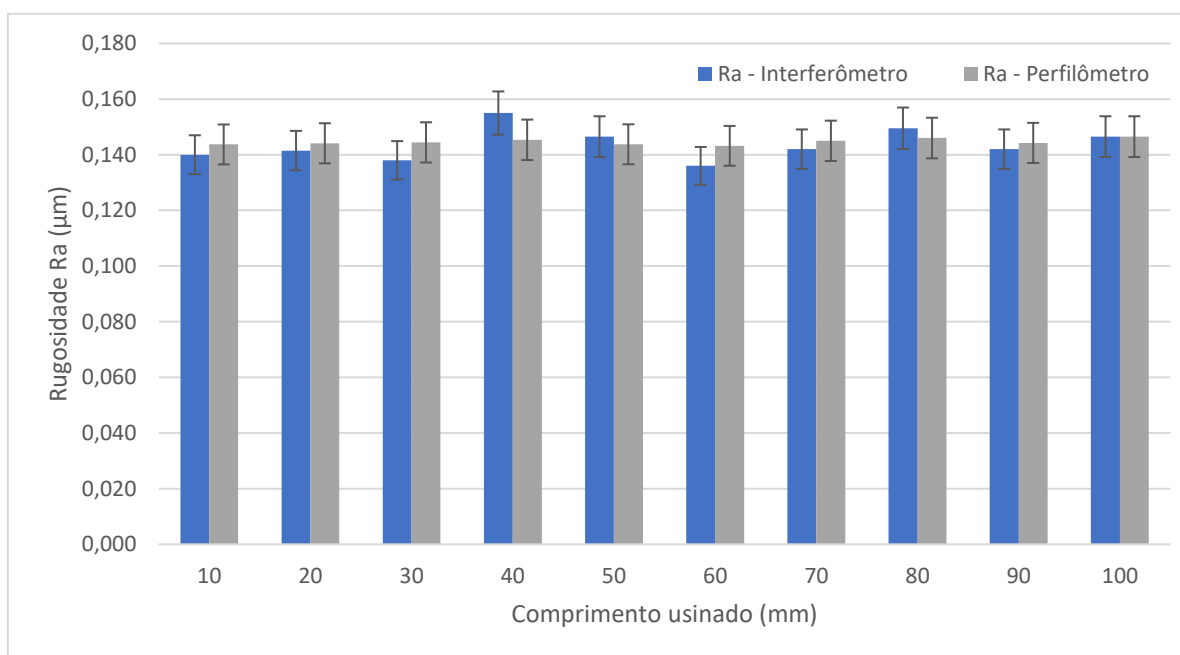


Figure 4.43 - Comportamento do parâmetro Ra através do Interferômetro e Perfilômetro

4.3.3 Formação de Rebarbas

Neste tópico serão apresentados os resultados qualitativos da formação de rebarbas. Como mencionado no capítulo anterior, as rebarbas são classificadas e estudadas com base na forma, localização e mecanismo de formação. Na Figura 4.44, observa-se os tipos de rebarbas encontradas na microusinagem do aço ferramenta AISI H13 segundo a classificação de Lee e Dornfeld (2002). Pode-se observar a presença rebarbas na entrada e saída do canal, rebarbas de entrada lateral discordante e concordante, rebarbas de saída lateral discordante e concordante, além das rebarbas de topo.

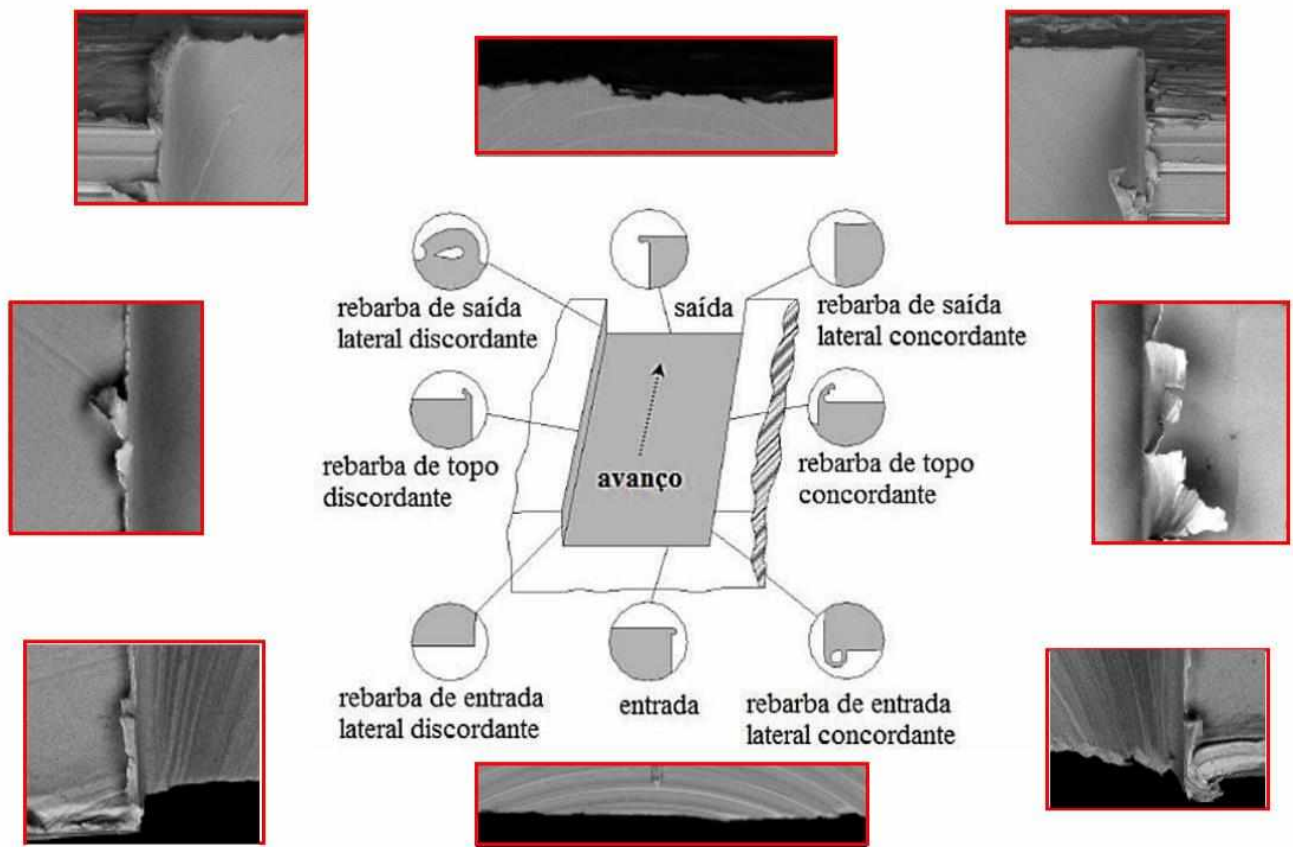


Figure 4.44 - Tipos de rebarbas encontradas na microusinagem do aço ferramenta AISI H13.

A formação de rebarbas é um fenômeno crítico nos processos de usinagem, uma vez que as rebarbas deterioram a superfície usinada, cria tensões residuais indesejáveis e prejudica a montagem dos componentes, sendo uma ação inevitável e que precisa ser controlada. Na microusinagem, as dimensões da rebarba se tornam relativamente grandes quando comparadas com o raio da microferramentas e os aos parâmetros de corte.

As rebarbas dos Testes 1, 3 4 e 5 foram predominantemente do tipo rebarbas menores, principalmente no lado do fresamento concordante (final do ciclo ativo da ferramenta), também foi observado a presença de rebaras primárias. No Teste 1, observou-se a presença de rebarbas tipo onda, e no Teste 2, predominou-se as rebarbas do tipo primária.

Assim como na pesquisa de Silva (2022), as rebarbas não seguiram um padrão contínuo ao longo do comprimento usinado, podendo um mesmo canal apresentar tipos de rebarbas diferentes, além de rebarba maiores e menores. Desta forma, as figuras 4.45, 4.46 e 4.47, apresentam as rebarbas encontradas nos canais usinados.

Na Fig. 4.45 é possível observar de rebarbas semelhantes às rebarbas do tipo menor e do tipo onda. Rebarbas do tipo menor também foram observadas no microfresamento do aço ferramenta AISI H13 de Queiroz (2022). A formação da rebarbas do tipo onda é devido ao comprimento do material deformado ser maior que a borda da peça, sendo forçado a tomar a forma de uma onda para que seja possível a acomodação em um espaço menor disponível (LIN, 1999 apud DA SILVA, 2011).

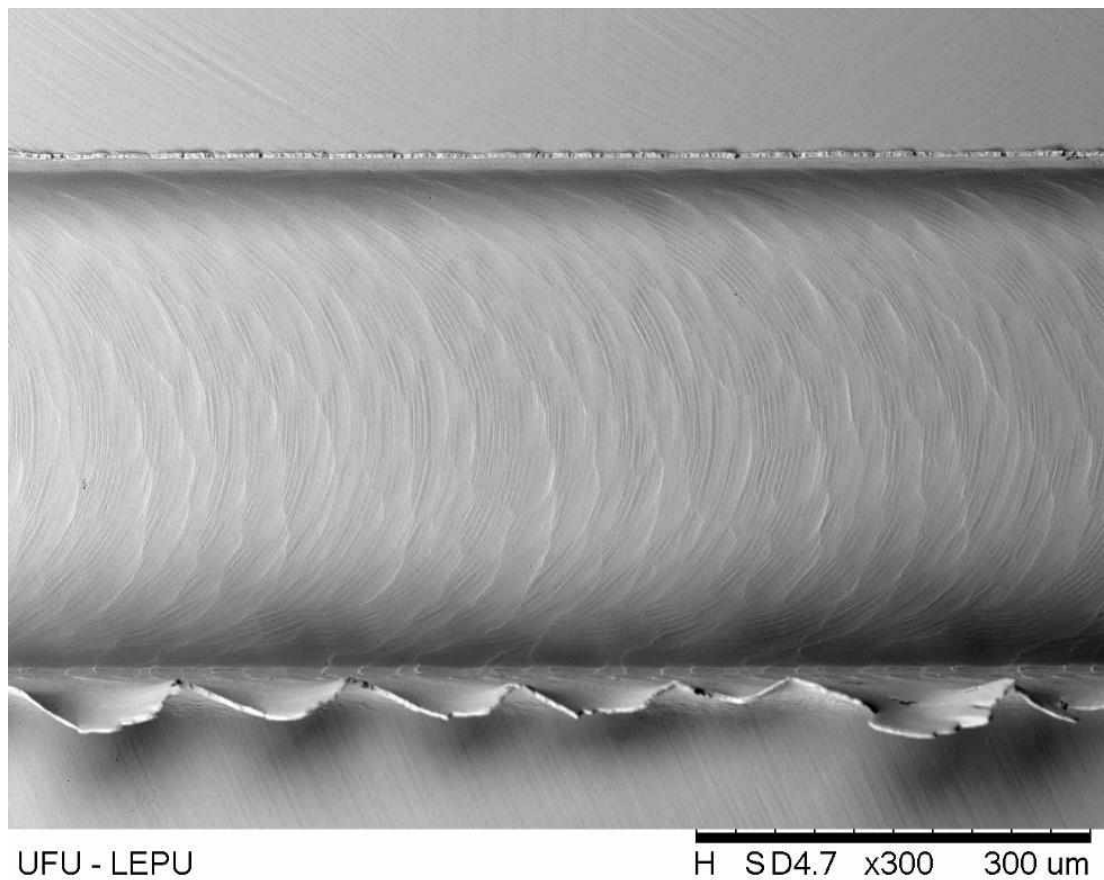


Figure 4.45 - Rebarba do tipo onda do lado concordante e em de rebarbas do tipo menor de lado discordante.

No trabalho de Chern et al. (2007), as rebarbas do tipo pena foram formadas do lado discordante, visto que as rebarbas formada neste lado permanecem presas na borda dos canais, e rebarbas do lado concordante tendem a formarem cavacos. No entanto, no presente trabalho, as rebarbas do tipo pena, ou pelo menos similar, estiveram presente no lado concordante, conforme mostrado na Figura 4.46.

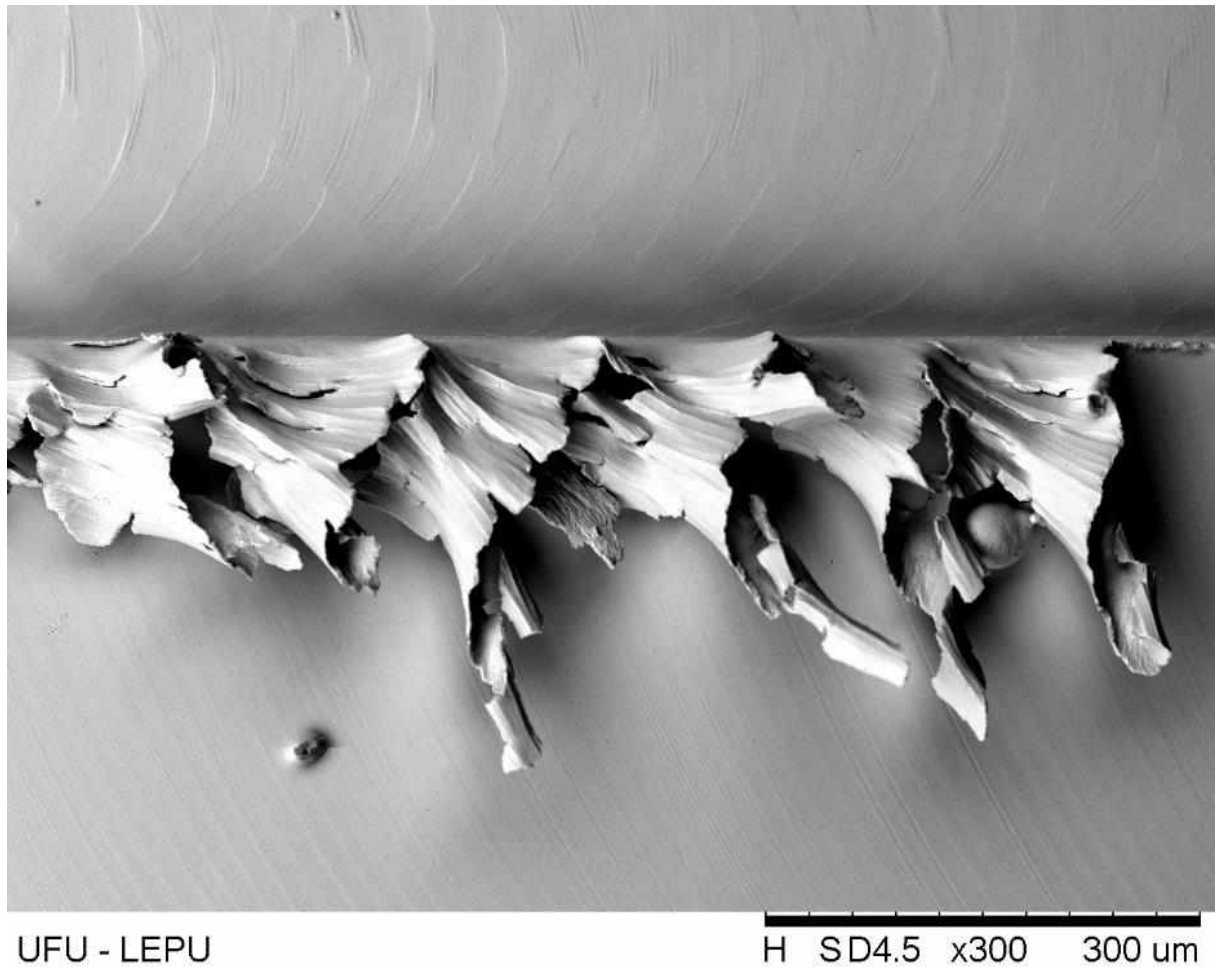


Figure 4.46 - Rebarba tipo agulha maior

A Fig. 4.47 mostra um exemplo de rebarba tipo agulha do lado concordante e em de rebarbas do tipo primárias de lado discordante. Para Chern et al. (2007), a formação da rebarba primárias ocorre quando o material é empurrado e deformado plasticamente sem que haja a formação do cavaco. Se ocorrer a fragmentação da rebarba tipo primária, em avanços e penetração de trabalho pequenos, dá a origem as rebarbas menor. As rebarbas do tipo pena e agulha também são formadas pela fragmentação da rebarba primária.

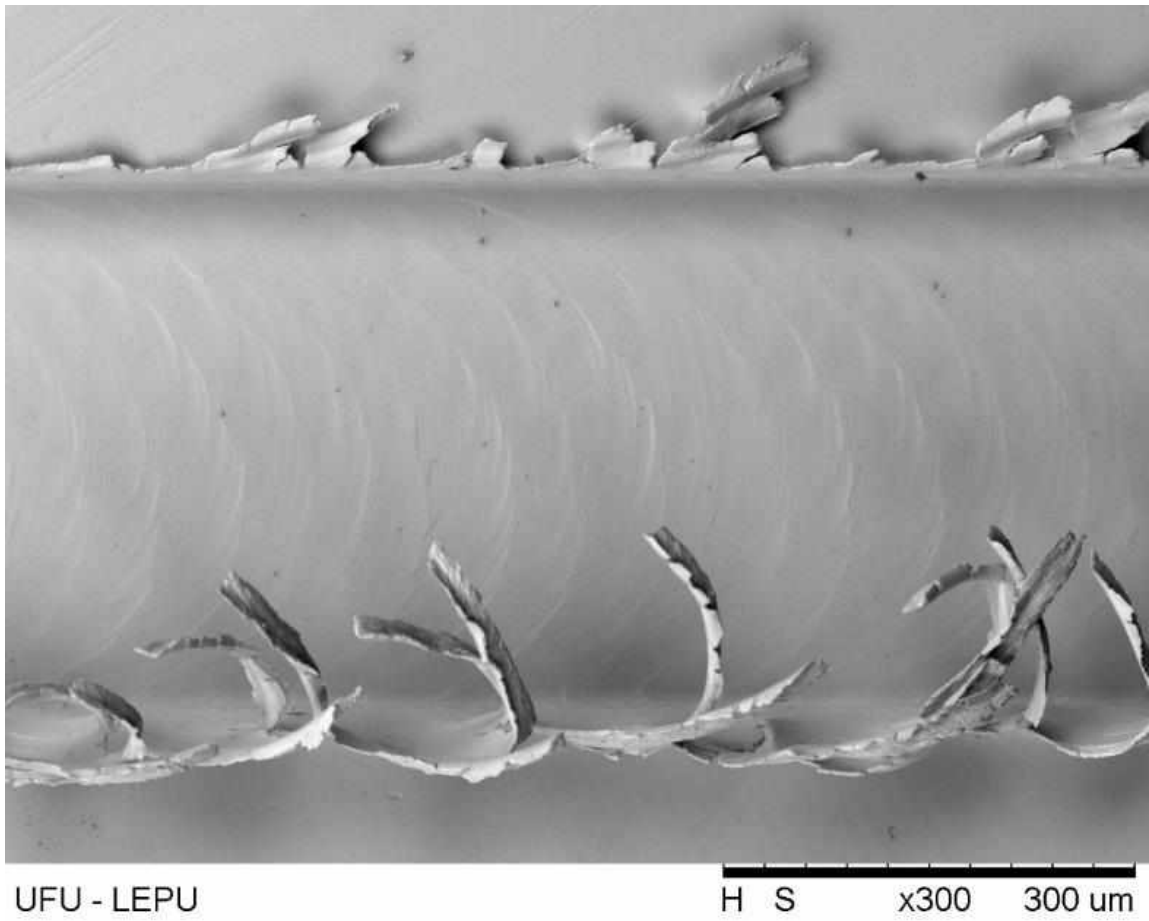


Figure 4.47 - Rebarba do tipo pena do lado concordante e em de rebarbas do tipo primárias de lado discordante.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de microfresamento, com diferentes condições de corte, do aço ferramenta AISI H13, e das análises realizadas pode-se concluir que:

Microferramentas:

- As principais formas de desgaste apresentadas pelas microfresas durante os ensaios foram desgaste de ponta e de flanco.
- A quebra da ponta da ferramenta no ensaio 1 levou a formação de rebarbas e marcas de avanços irregulares.
- O maior avanço utilizado, 10 μm /dente resultou no menor desgaste da ferramenta.
- A maior profundidade de corte, 40 μm resultou no menor desgaste da ferramenta.
- A melhor condição de corte para o microfresamento do aço ferramenta AISI H13 é com uma profundidade de corte de 40 μm e avanço de 10 μm /dente.

Rugosidade:

- O comprimento de corte das microfresas não apresentou influência nos valores de rugosidade obtidos.
- A rugosidade apresentou maiores valores para as condições com maior velocidade de corte.
- Os resultados obtidos para o parâmetro Ra variaram de 0,131 a 0,1648 μm , dependendo das condições de corte empregadas.
- A rugosidade Ra é pouco influenciada pelo avanço, para os avanços utilizados neste trabalho. O melhor resultado foi obtido com a maior profundidade de corte, Ra de 0,140 μm .
- Os resultados obtidos para o parâmetro Rq variaram de 0,1631 μm a 0,2254 μm , dependendo das condições de corte empregadas.

Rebarbas:

- A rebarba do lado concordante predomina nos canais.
- Presença de rebarba de entrada e de saída na parte inferior do canal.
- As rebarbas dos tipos primária e menor predominam nos canais, aparecem nas formas de agulha, curvadas e dobrada.
- Presença do cavaco esférico.

Sugestões para trabalhos futuros

- Investigar a causa e o efeito da vibração do microfresamento do aço ferramenta H13.
- Verificar a ocorrência do cavaco esférico em diferentes condições de corte.
- Aplicar a metodologia de medição de força para controlar o processo de microfresamento e o desgaste das microferramentas.
- Estudar o comportamento teórico e experimental da rugosidade e verificar a influência do avanço no processo de microfresamento.
- Monitorar o desgaste da ferramenta em tempos intermediário correspondente a comprimento usinado de 10 mm, 25 mm, 50 e 75 mm, além dos 100 mm já testados, inclusive com diferentes ferramentas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P.T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. **Precision Engineering**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 402-407, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.0>

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P.T.; YANG, S.; COOKE, K.e.; TEER, D.G.. Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [S.L.], v. 48, n. 14, p. 1578-1584, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.05.011>.

ARRUDA, Étory Madrilles. Otimização robusta multi-objetivo do processo de fresamento do aço ABNT H13 endurecido utilizando ferramentas de topo esférico. 2019.

ASLANTAS, K., HOPA, H.E., PERCIN, M., UCUN, I., ÇICEK, A. Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy. **Precision Engineering**. v. 45, p. 55 - 66, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.01.009>

ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE. ASM handbook. Asm International, 1990.

ASM INTERNATIONAL. **Properties and Selection: irons, steels, and highperformance alloys**. Estados Unidos da América: Asm International, 2005. 2521 p.

BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G.-C. Predicting surface roughness in machining: a review. **International journal of machine tools and manufacture**, v. 43, n. 8, p. 833-844, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2)

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>.

BODZIAK, S.; SOUZA, A. F.; RODRIGUES, A. R.; DINIZ, A. E.; COELHO, R. T. Surface Integrity of Moulds for Microcomponents Manufactured By Micromilling and Electro-Discharge Machining. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. p. 1-13, 2013. <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0108-9>

BRYSON, WILLIAM E. Heat treatment, selection, and application of tool steels. **Hanser Gardner Publications**. 2005.

BYRNE G, DORNFELD D, DENKENA B. Advancing cutting technology. **CIRP Annals**. 2003 Jan 1;52(2):483-507. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60200-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60200-5)

CAKIR, M. CEMAL; ENSARIOGLU, CIHAT; DEMIRYAK, ILKER. Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material. **Journal of materials processing technology**, v. 209, n. 1, p. 102-109, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.01.050>

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Fundamentals of materials science and engineering. London: Wiley, 2000.

CÂMARA, M.A.; RUBIO, J.C. Campos; ABRÃO, A.M.; DAVIM, J.P.. 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**, v. 46, n. 3, p. 313-332, 2006. <https://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 <https://doi.org/10.1002/9781118536605>

CHERN, G. L. Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 12-13, p. 1517-1525, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.006>

CHERN, G. L., WU, Y. J. E., CHENG, J. C., YAO, J. C. Study on burr formation in micro- machining using micro-tools fabricated by micro-EDM. **Precision Engineering**, v. 31, n. 2, p. 122-129, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2006.04.001>

CHIAVERINI, V.. Aços e Ferros Fundidos. 6. ed. São Paulo: ABM, 1988. 599 p

DE CHIFFRE, L.; LONARDO, P.; TRUMPOLD, H.; LUCCA, D. A.; GOCH, G.; BROWN, C. A.; RAJA, J.; HANSEN, H. N. Quantitative Characterization of Surface Texture. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 49, n. 2, p. 635-352, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63458-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63458-1)

DE OLIVEIRA, DEBORAH; GOMES, MILLA CAROLINE; DA SILVA, MARCIO BACCI. Spheroidal chip in micromilling. **Wear**, v. 426, p. 1672-1682, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203658>

OLIVEIRA, DÉBORAH DE. Escala e integridade superficial no microfresamento da liga de níquel inconel 718. 2019. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

DOS SANTOS, A. G., 2020, Investigação Experimental Do Microfresamento Da Liga De Titânio Ti-6Al-4V, 156 f., Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M. Titanium Alloys and Their Machinability - A Review. **Journal of Materials Processing Technology**. v.68, n. 3, p. 262-274, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00030-1)

FALLBÖHMER, P. , C.A. RODRÍGUEZ, T. ÖZEL, T. ALTAN, High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 98, n. 1, p. 104-115, 2000 [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00311-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00311-8)

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais, Editora Edgard Blücher Ltda,1970.

FLEISCHER, J.; KOTSCHENREUTHER, J. The Manufacturing of Micro Molds by Conventional and Energy-Assisted Processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 33, n. 1-2, p. 75-85, mai. 2007. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0596-1>

GABARDO, J. F.. ESTUDO DA TENACIDADE DO AÇO FERRAMENTA H13. 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

GOMES, M. G.. 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

GOMES, M. C. Estudo Do Processo De Microfresamento Em Aço Inoxidável ABNT 316L Produzido Por Fundição E Manufatura Aditiva. 2022, 127 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia - MG

GRZESIK, Wit; RECH, Joel. Influence of machining conditions on friction in metal cutting process – A review. *Mechanik*, [S.L.], v. 92, n. 4, p. 242-248, 8 abr. 2019. : <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.4.33>

JAWAHIR, I. S.; BRINKSMEIER, E.; SAOUBI, R. M.; ASPINWALL, D. K.; OUTEIRO, J. C.; MEYER, D.; UMBRELLO, D.; JAYAL, A. D. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. **CIRP Annals –Manufacturing Technology**, v. 60, n. 2, p. 603-626, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.002>

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. Manufacturing processes for engineering materials. **Prentice Hall**, 5 edition, 2008, 1040p

KOPALINSKY, E. M., AND P. L. B. OXLEY. An investigation of the influence of feed and rake angle on the ratio of feed force to cutting force when machining with negative rake angle tools. **CIRP Annals** 33.1 (1984): 43-46. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61376-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61376-6)

KOPALINSKY, E. M.; OXLEY, P. L. B. Size Effects in Metal Removal Process. 3rd Conference on Mechanical Properties at High Rates of Strain. In: Institute of Physics Conference Series, Oxford. p. 389-396, 1984. <https://doi.org/10.1177/0954405415612378>

LAI, X.; LI, H.; LI, C.; LIN, Z.; NI, J. Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 48, p. 1–14, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.011>

LEKKALA, Ravi et al. Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling. **Precision Engineering**, v. 35, n. 4, p. 625-637, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.04.007>

LI, B.; ZHANG, S.; YAN, Z.; JIANG, D. Influence of edge hone radius on cutting forces, surface integrity and surface oxidation in hard milling of AISI H13 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 95, n. 1-4, 2018. 1153-1164] <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1292-z>

LI, H. JING, X.; WANG, J.. Detection and analysis of chatter occurrence in micromilling process. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, [S.L.], v. 228, n. 11, p. 1359-1371, 31 out. 2014. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954405414522216>.

LIU, K.; MELKOTE, S. N. Material Strengthening Mechanisms and Their Contribution to Size Effect in Micro-Cutting. **Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME**. v. 128, n. 3, p. 730- 738, 2006. <https://doi.org/10.1115/1.219354>

MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., DA SILVA, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais, **Edgard Blucher**, São Paulo, 2011.

MASUZAWA, T. State of the art of micromachining. **CIRP Annals – Manufacturing Technology, Amsterdam**, v. 49, n. 2, p. 473-488, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63451-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63451-9)

MOUGO, A. L. Microfresamento do Aço Superduplex: Uma Comparação Mecânica com os Aços Inoxidáveis Austenítico e Ferrítico para as forças de Usinagem e Avaliação da Superfície Usinada. Tese de Doutorado, UFRJ, 2016

OLYMPUS. Medição da rugosidade de superfícies. 2021. Available from internet: [https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms\[focus\]=022](https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms[focus]=022)). Access: April 2021.

MICKELSON, Dale. Guide to hard milling and high speed machining. Industrial Press, 2006.

RAMANATH, S0., RAMARAJ T.C., SHAW M.C., What grinding swarf reveals, **CIRP Ann.- Manuf. Technol.**, v. 36 (1), 1987, p. 245–247. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62596-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62596-7)

RATNAM, M.m.. 1.1 Factors Affecting Surface Roughness in Finish Turning. **Comprehensive Materials Finishing**, [s.l.], p.1-25, 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.09147-5>.

ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R.. Tool steels. 5. Ed. **AMS International**, 1998. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.ts5.9781627083584>

RODRIGUES, A. R. Estudo da geometria das arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. 227 p.

RUSCHI, S.; TRISTO, G.; RYSAVA, Z.; BARIANI, P. F.; UMBRELLO, D.; DE CHIFFRE, L. Environmentally Clean Micromilling of Electron Beam Melted Ti-6Al-4V. **Journal of Cleaner Production**. v. 133, p. 932-941, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.035>

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 Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-06205-w>

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. Aços e ligas especiais. 3 ed. São Paulo: **Editora Blucher**, 2010. 646

SIMONEAU, A., ELBESTAWI NG, AND M. A. ELBESTAWI. Surface defects during microcutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 46.12-13 (2006): 1378-1387. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.10.001>

SIMONEAU, A.; NG, E.; ELBESTAWI, M. A. Surface Defects During Microcutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v 46, n. 12-13, p. 1378-1387, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.10.001>

SUDHAKAR, M. Mikron. In: MICKELSON, D. Guide to hard milling and high speed machining. New York: Industrial Press Inc., 2007. p. 1-19.

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

TSUDA, K.; OKUDA, K.; SHIZUKA, H.; NUNOBIKI, M. A Study of the Micro-End Milling of Titanium Alloy. **Advanced Material Research**. p. 588-593, 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.325.58>

UCUN, IRFAN; ASLANTAS, KUBILAY; BEDIR, FEVZI. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy. **Wear**, v. 300, n. 1-2, p. 8-19, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.103>

UMBRELLO, D. Influence of material microstructure changes on surface integrity in hard machining of AISI 52100 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 54, n. 9-12, 2011. 887-898. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3003-x>

URIARTE, L.; AZCARATE, S.; HERRERO, A.; LACALLE, L. N. L.; LAMIKIZ, A. Mechanistic Modelling of the Micro End Milling Operation. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture**. v. 221, n. 1, p. 23-33, 2008. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM83>

URIARTE, L.; HERRERO, A.; ZATARAIN, M.; SANTISO, G.; LOP'EZ DE LACALLE, L. N.; LAMIKIZ, A.; ALBIZURI, J. Error Budget and Stiffness Chain Assessment in a Micromilling Machine Equipped with Tools Less Than 0.3 mm in Diameter. **Precision Engineering**. v. 31, n. 1, p. 1-12, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2005.11.010>

VENDRAMIM, J. C. (2014). Têmpera a Vácuo de bloco de aço AISI H13. Disponível em: <www.isoflama.com.br/assets/pdf/artigos/1468270121.pdf>

WHITEHOUSE, D., Surfaces and their Measurement, Londres, HPS, 2002,

WHITEHOUSE, David J. Handbook of surface and nanometrology. Taylor & Francis, 2002. <https://doi.org/10.1201/9781420034196>

YUE, C.; GAO, H.; LIU, X.; LIANG, S. Y.; WANG, L.. A review of chatter vibration research in milling. **Chinese Journal Of Aeronautics**, [S.L.], v. 32, n. 2, p. 215-242, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2018.11.007>.

ZIBEROV, M., DE OLIVEIRA, D., DA SILVA, M. B., HUNG, W. N. Wear of TiAlN and DLC coated microtools in micromilling of Ti-6Al-4V alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 56, p. 337-349, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.082>

Relatório / Report nº 9910/2021

Solicitante / Requester: Márcio Bacci da Silva

Endereço / Address: Av. João Naves de Ávila, Bloco 1M, 2121 - Campus Santa Mônica - Santa Mônica - U

Material / Material: Amostra para análise

Identificação do Cliente para a amostra enviada / Customer ID for the sample sent:

Aço H13

Elementos <i>Elements</i>	Concentração <i>Concentration</i>	Unidade <i>Unit</i>
Carbono (C)	0,3846	%
Silício (Si)	0,9105	%
Manganês (Mn)	0,3023	%
Fósforo (P)	0,0168	%
Enxofre (S)	0,0053	%
Cromo (Cr)	5,0942	%
Molibdênio (Mo)	1,2723	%
Níquel (Ni)	0,3158	%
Alumínio (Al Total)	0,0146	%
Cobalto (Co)	0,0166	%
Cobre (Cu)	0,0893	%
Nióbio (Nb)	<0,0040	%
Titânio (Ti)	<0,0000	%
Vanádio (V)	0,8518	%
Tungstênio (W)	0,0567	%
Chumbo (Pb)	<0,0020	%
Estanho (Sn)	<0,0018	%
Arsênio (As)	0,0166	%
Cálcio (Ca)	0,0004	%
Antimônio (Sb)	<0,0018	%
Selênio (Se)	<0,0036	%
Tântalo (Ta)	<0,0144	%
Boro (B)	0,0005	%
Nitrogênio (N)	0,0597	%
Ferro (Fe) Balanço	90,5643	%

Observações / Observations:

* O equipamento analisa somente os elementos apresentados no quadro deste relatório. A base refere-se ao balanceamento da composição para cem por cento podendo conter outros elementos não detectados / The equipment only analyzes the elements presented in the chart of this report. The base refers to the balance of the composition for hundred percent and may contain other undetected elements.

* Onde consta < (menor que), significa que o resultado do elemento está abaixo do limite inferior da faixa de detecção do equipamento e > (maior que) está acima do limite superior da faixa de detecção do equipamento / Where it appears <(less than), it means that the element result is below the lower limit of the equipment detection range and > (greater than) is above the upper limit of the equipment detection range.

Relatório / Report nº 9910/2021

Informações / Informations:

* **Temperatura máxima do laboratório: 28°C** / Maximum temperature at laboratory: 28°C.

Procedimento / Método / Procedure / Method:

* **Análise realizada segundo Instrução Técnica IT Lab 249.** / Analyses performed by technical instruction IT Lab 249.

* **Normas: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014a** / Standards: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014a.

* **Método utilizado - Espectrometria de Emissão Óptica.** / Method utilized - Optical emission spectrometry.

Equipamentos / Instrumentos / Equipments / Instruments:

* **Espectrômetro de Emissão Óptica SPECTROMAXx, identificação 159239, calibrado pelo fabricante.** / Optical emission spectrometer Spectromaxx, identification 159239, calibrated by manufacturer.

Incerteza de Medição Measurement Uncertainty	
Elemento / Element	+/- U 95% / Uncertainty
C	0,0151
Si	0,0222
Mn	0,0039
P	0,0014
S	0,0006
Cr	0,0601
Mo	0,0169
Ni	0,0045
Al t	0,0012
Co	0,0010
Cu	0,0024
Nb	ND
Ti	ND
V	0,0502
W	0,0016
Pb	ND
Sn	ND
As	0,0013
Ca	0,0001
Sb	ND
Se	ND
Ta	ND
B	0,0001
N	0,0061

A tabela acima relata a maior incerteza calculada para os respectivos elementos e foi obtida através da multiplicação da incerteza de medição combinada pelo fator de abrangência K (coeficiente de segurança), proporcionando um nível de confiança de aproximadamente 95%. / The chart above describe the bigger uncertainty calculated at respectives elements and was obtained through for multiplication for measurement uncertainty combined by the coverage factor K (safety factor), providing a level by safety approximately 95%.

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT / This report contain results referred exclusively specimen sent to requestor and only be reproduced in full, and that reproduction of parts requires written approval by LAMAT.

Recepção / Reception 28/10/21

Analista
Analyst

Responsável
Responsible

Realização / Achievement 03/11/21

Isabel Cristina de Rezende
Laboratorista CRQ PR3002619



Emissão / Emission 03/11/21

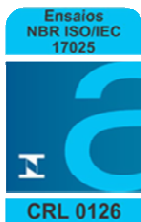
Isabel Cristina de Rezende
Laboratorista CRQ PR3002619

Responsável Técnico LAMAT: Philippe Silva Parreiras, CREA-MG nº 142016726-0

Technical Responsible LAMAT: Philippe Silva Parreiras, CREA-MG nº 142016726-0

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lília Antunes, 99 - B. Nogueira Machado - CEP: 35680-270 - Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400



SENAI

Laboratório de Ensaio e Análise em Materiais - LAMAT

Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE

Accredited by General Coordination of Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaio Mecânicos

Mechanical Teste Report

Relatório de Ensaio / Test Report Nº:10294/2021

Solicitante / Client: Márcio Bacci da Silva

Endereço / Address: Av. João Naves de Ávila, Bloco 1M, 2121 - Campus Santa Mônica - Santa Mônica - UI

Material / Material: Amostra para análise

Identificação do Cliente para a amostra enviada / Customer ID for the sample sent:

Aço-Ferramenta H13 - Márcio Bacci da Silva/CNPq

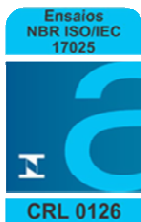
Dureza Brinell / Brinell Hardness				
ENSAIO TEST	RESULTADOS RESULTS	UNIDADE UNITY	CARGA LOAD (kgf)	PENETRADOR INDENTER Ø / mm
Valor 1 Value 1	194,0	HBW	750	5
Valor 2 Value 2	192,0			
Valor 3 Value 3	195,0			
Média / Average	193,7			

Observações do ensaio / Test Observation:

ND - Não determinado / ND - Not determined:

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lília Antunes, 99 - B. Nogueira Machado - CEP: 35680-270 - Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400



Laboratório de Ensaios e Análise em Materiais - LAMAT

Accreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE

Accredited by General Coordination of Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaios Mecânicos

Mechanical Teste Report

Relatório de Ensaio / Test Report Nº:10294/2021

Equipamentos Utilizados / Used Equipment:

* Durômetro Universal Dura Vision DV30, identificação 219170, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.

* Termo-higrômetro Digital, identificação 203907, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.

* Termo-higrômetro Digital, identificação 764508, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.

* Ensaio realizado conforme norma: ABNT NBR ISO 6506-1:2019.

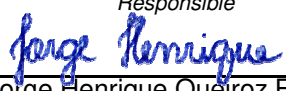
Test performed according to Standard: ABNT NBR ISO 6506-1:2019.

* O ensaio foi realizado a temperatura ambiente 22,0 °C

The test is performed in room temperature

22,0 °C

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT / This report contain results referred exclusively specimen sent to requestor and only be reproduced in full, and that reproduction of parts requires written approval by LAMAT.

Recepção / Reception	09/11/21	Analista Analyst	Responsável Responsible
Realização / Achievement	11/11/21	Jorge Henrique Queiroz Ferreira	
Emissão / Emission	11/11/21	Laboratorista Técnico	Jorge Henrique Queiroz Ferreira Laboratorista Técnico

Responsável Técnico LAMAT: Philipe Silva Parreiras, CREA-MG nº 142016726-0

Technical Responsible LAMAT: Philipe Silva Parreiras, CREA-MG nº 142016726-0

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - B. Nogueira Machado - CEP: 35680-270 - Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400