

PIETRO BEDULE CAMARA

**ESTUDO DO MICROFRESAMENTO DO AÇO
FERRAMENTA AISI H13 COM FERRAMENTAS
DE DIFERENTES GEOMETRIAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2025

PIETRO BEDULE CAMARA

**ESTUDO DO MICROFRESAMENTO DO AÇO
FERRAMENTA AISI H13 COM FERRAMENTAS
DE DIFERENTES GEOMETRIAS**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Uberlândia – MG

2025

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

C172 Camara, Pietro Bedule, 1996-
2025 Estudo do microfresamento do aço ferramenta AISI H13
com ferramentas de diferentes geometrias [recurso
eletrônico] / Pietro Bedule Camara. - 2025.

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.2025.33>
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, número 653, PPGEM				
Data:	28/02/2025	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	12312EMC013				
Nome do Discente:	Pietro Bedule Câmara				
Título do Trabalho:	Estudo do Microfresamento do Aço Ferramenta AISI H13 Com 3 Ferramentas de Diferentes Geometrias				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Investigação do microfresamento do aço ferramenta H13 obtido pelo processo de manufatura aditiva DED				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva - UFU; Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrao - UFMG e Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva - UFU, orientador do candidato.

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

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

Aprovado.

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

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

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente

ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2025, às 12:07, 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 **Alexandre Mendes Abrão, Usuário Externo**, em 28/02/2025, às 12:07, 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 28/02/2025, às 12:07, 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 **6001644** e o código CRC **48364215**.

Referência: Processo nº 23117.000510/2025-31

SEI nº 6001644

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Aida Lemes Camara e Marcos Antônio da Camara, minha irmã Lorena Lemes Camara e minha avó Anécia Medeiros pelo apoio e confiança na minha jornada acadêmica.

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

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.

Às agências de fomento, CAPES, CNPq e FAPEMIG, pelo apoio financeiro.

Aos meus colegas de laboratório, Josenilton dos Santos Lopes e Thaise Alonso, por todo companheirismo e suporte que me deram.

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

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

Enfim, muito obrigado a todos que contribuíram de alguma forma para que a realização deste trabalho fosse possível.

CAMARA, P. B. Estudo do Microfresamento do Aço Ferramenta AISI H13 Com Ferramentas de Diferentes Geometrias. 2025, 83f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG

Resumo

A evolução das tecnologias tem impulsionado a necessidade de fabricar componentes com dimensões cada vez menores. Para atender a essa exigência, o microfresamento tem sido amplamente utilizado. Esse processo é aplicado em diversos materiais, incluindo aços ferramenta, como o aço ferramenta AISI H13, que é frequentemente empregado na produção de moldes e matrizes para operações em altas temperaturas. Nesse contexto, o microfresamento do aço ferramenta AISI H13 tem sido objeto de diversos estudos, focando na análise dos fenômenos associados ao processo e na avaliação da sua qualidade. Contudo, há uma lacuna na pesquisa quanto à influência das ferramentas utilizadas no microfresamento, visto que a geometria das microfresas afetam diretamente a qualidade final das peças e os custos de produção. Assim, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de diferentes ferramentas no microfresamento do aço ferramenta AISI H13 de dureza $193,7 \pm 3,0$ HB. Foram utilizadas três microfresas de topo reto com diâmetro de 400 μm , com geometrias e revestimentos diferentes. Os experimentos foram conduzidos em uma microfresadora CNC de alta precisão, utilizando fluido de corte no regime de mínima quantidade de lubrificante (MQL) e mantendo constantes os parâmetros de corte em uma primeira instância. Também foram realizados testes com parâmetros de corte diferentes para cada microfresa, de acordo com as recomendações do fabricante. Foram avaliados o desgaste das microfresas, a rugosidade da superfície usinada e a formação de rebarbas. Constatou-se que adesão foi o principal mecanismo de desgaste. Os parâmetros de corte e geometria da ferramenta não influenciaram o desgaste. As geometrias tiveram influência para os resultados de rugosidades, sendo a menor R_a com o valor de $0,0607 \pm 0,0027$ μm . A geometria também influenciou a formação de rebarbas quanto à distância microfresada, juntamente com os parâmetros de corte para a altura das rebarbas. As menores rebarbas foram obtidas com as menores taxas de remoção de material. A microfresa com melhor desempenho foi a VF2XLD0040N010.

Palavras-chave: *Microusinagem; Microfresamento; H13; Microfresa; Geometria de Ferramenta*

CAMARA, P. B. Study of Micromilling of AISI H13 Tool Steel Using Tools With Different Geometries. 2025, 83p. Master's Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG

Abstract

The advancement of technologies has driven the need to manufacture components with increasingly smaller dimensions. To meet this demand, micromilling has been widely used. This process is applied to various materials, including tool steels like AISI H13 tool steel, which is often used in the production of molds and dies for high-temperature operations. In this context, the micromilling of H13 steel has been the subject of numerous studies, focusing on the analysis of phenomena associated with the process and the evaluation of its quality. However, there is a research gap about the influence of the tools used in micromilling, as the geometry of micro end mills directly affects the final quality of the parts and production costs. Therefore, this study aims to evaluate the performance of different tools in the micromilling of ABNT H13 steel. Three straight-end micro end mills with a diameter of 400 μm , featuring different geometries and coatings, were used. The experiments were conducted on a high-precision CNC micromilling machine, using cutting fluid under the minimum quantity lubrication (MQL) regime, and keeping constant cutting parameters initially. Tests were also performed with different cutting parameters for each micro end mill, according to the manufacturer's recommendations. The wear of the micro end mills, the roughness of the machined surface, and burr formation were evaluated. It was found that adhesion was the primary wear mechanism. Cutting parameters and tool geometry did not influence wear. However, geometries affected the roughness results, with the lowest Ra value being $0.0607 \pm 0.0027 \mu\text{m}$. Geometry also influenced burr formation concerning the micro-milled distance, along with cutting parameters affecting burr height. The smallest burrs were obtained with the lowest material removal rates. The micro-end mill with the best performance was the VF2XLD0040N010.

Keywords: *Micro-machining; Micro-milling; H13; Micro-milling Cutter; Tool Geometry*

Lista de Figuras

Figura 1.1. Comparação entre a quantidade de artigos publicados sobre os temas microusinagem e microfresamento (absoluto). Base de dados consultada: SCOPUS (https://www.scopus.com/search). Palavras-chave: “ <i>micromachining</i> ” e “ <i>micromilling</i> ”, pesquisa realizada em 10/12/2024.....	2
Figura 1.2. Comparação entre a quantidade de artigos publicados sobre os temas microfresamento e microfresamento no H13 (absoluto). Base de dados consultada: SCOPUS (https://www.scopus.com/search). Palavras-chave: “ <i>micromilling</i> ” e “H13 tool steel”, pesquisa realizada em 10/12/2024.....	3
Figura 2.1. Influência do raio da aresta de corte (a) na usinagem convencional e (b) na microusinagem. (Adaptado de Aramcharoen; Mativenga, 2009; Bissacco et al., 2005). 7	
Figura 2.2. Variação da espessura de corte no microfresamento de topo, vista no plano de trabalho. (Adaptado de Alonso, 2023).....	7
Figura 2.3. Mecanismo de formação de cavaco no microfresamento. (Adaptado de Chae et al., 2006).....	8
Figura 2.4. Comparação entre o tamanho dos grãos do material usinado e o raio da aresta de corte (a) na usinagem convencional e (b) na microusinagem. (Adaptado de Elkaseer et al., 2018).....	9
Figura 2.5. (a) Geometria genérica de microfresas contendo cabeça, pescoço e haste, e a ampliação das cabeças das ferramentas a partir das vistas (b) lateral e (c) topo. (Adaptado de Chen et al., 2021).....	10
Figura 2.6. Parâmetros geométricos de uma microfresa a partir das vistas (a) topo e (b) lateral. (Adaptado de Queiroz, 2022).	10
Figura 2.7. Gráficos de relação entre os parâmetros geométricos e rugosidade. (Adaptado de Queiroz, 2022).	16
Figura 2.8. Desgaste medido da superfície principal de folga (Adaptado de Ziberov et al., 2020).....	17
Figura 2.9. Metodologia para medição do desgaste (Adaptado de Gomes et al., 2020).	18
Figura 2.10. Gráficos de relação entre os parâmetros geométricos e desgaste. (Adaptado de Queiroz, 2022).	20

Figura 2.11. Classificação das rebarbas quanto à posição (Adaptado de Lee; Dornfeld, 2002).....	21
Figura 2.12. Classificação das rebarbas quanto ao tipo: (a) primária, (b) agulha, (c) pena e (d) menor (Adaptado de Chern et al. (2007)).	22
Figura 2.13. Cinco tipos de rebarbas no fresamento de face (Adaptado de Chern, 2006).	22
Figura 2.14. Gráficos de relação entre os parâmetros geométricos e a área da rebarba por comprimento usinado. (Adaptado de Queiroz, 2022).....	23
Figura 3.1. Fluxograma da metodologia deste trabalho.	24
Figura 3.2. Corpo de prova e suas dimensões.	25
Figura 3.3. Microestrutura do aço ferramenta AISI H13 com ampliação de 200 μm e 50 μm (Adaptado de Alonso, 2023).	26
Figura 3.4. Dimensões em milímetros da microfresa MS2MS0040 (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).	28
Figura 3.5. Foto da microfresa MS com ampliação em sua gravura.	28
Figura 3.6. Imagens da microfresa MS obtidas no MEV nas vistas (a) topo e (b) lateral.	28
Figura 3.7. Dimensões em milímetros da microfresa VF2XLD0040N010 (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).	29
Figura 3.8. Foto da microfresa VF com ampliação em sua gravura.....	29
Figura 3.9. Imagens da microfresa VF2XLD0040N010 obtidas no MEV nas vistas (a) topo e (b) lateral.....	30
Figura 3.10. Dimensões em milímetros da microfresa VQXLD0040N010 (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).	31
Figura 3.11. Foto da microfresa VQ com ampliação em sua gravura.	31
Figura 3.12. Imagens da microfresa c obtidas no MEV nas vistas (a) topo e (b) lateral.	31
Figura 3.13. Microestrutura do revestimento <i>SMART MIRACLE</i>	31
Figura 3.14. Microfresadora CNC modelo Mini-mil/GX, Minitech CNC (2024).	32
Figura 3.15. Posicionamento da microfresa sobre o corpo de prova.	34
Figura 3.16. Configuração experimental para os ensaios de microfresamento.	35
Figura 3.17. Desgaste de flanco medido na superfície secundária de folga da microfresa MS.	36
Figura 3.18. Divisão aproximada dos microcanais em três partes.	37

Figura 3.19. Medição da rugosidade na entrada de um canal.	37
Figura 3.20. Medição da altura das rebarbas.	38
Figura 4.1. Imagens da superfície secundária de folga das microfresas novas e desgastadas.	40
Figura 4.2. Composição química do revestimento da microfresa VF2.	43
Figura 4.3. Composição química do desgaste por abrasão da microfresa VF2.	43
Figura 4.4. Composição química do desgaste por adesão da microfresa VF2.	44
Figura 4.5. Composição química do material aderido na microfresa VF2.	44
Figura 4.6. Desgaste das microfresas.	45
Figura 4.7. Rugosidades Ra e Rq para as 3 ferramentas no Teste 1.	47
Figura 4.8. Rugosidades Ra e Rq para as 3 ferramentas no Teste 2.	48
Figura 4.9. Superfície de um microcanal do Teste 2 da microfresa VQ.	50
Figura 4.10. Superfície dos microcanais dos seguintes experimentos: (a) Teste 1 MS, (b) Teste 1 VF, (c) Teste 1 VQ, (d) Teste 2 VF.	50
Figura 4.11. Superfície de um microcanal do Teste 2 da microfresa MS.	51
Figura 4.12. Resultados das rugosidades Ra e Rq para cada experimento.	52
Figura 4.13. Altura das rebarbas para a microfresa MS no Teste 1.	53
Figura 4.14. Altura das rebarbas para a microfresa VF no Teste 1.	53
Figura 4.15. Altura das rebarbas para a microfresa VQ no Teste 1.	54
Figura 4.16. Altura das rebarbas para a microfresa MS no Teste 2.	54
Figura 4.17. Altura das rebarbas para a microfresa VF no Teste 2.	54
Figura 4.18. Altura das rebarbas para a microfresa VQ no Teste 2.	55
Figura 4.19. Resultados das alturas das rebarbas para todos os experimentos.	57
Figura 4.20. Rebarbas do tipo pena e menor no fresamento concordante e do tipo menor enrolado no fresamento discordante no Teste 1 da microfresa MS.	58
Figura 4.21. Rebarbas do tipo pena e menor no fresamento concordante e do tipo menor enrolado no fresamento discordante no Teste 1 da microfresa VF.	58
Figura 4.22. Rebarbas do tipo agulha no fresamento concordante e do tipo menor enrolado no fresamento discordante no Teste 1 da microfresa VF.	59
Figura 4.23. Rebarbas do tipo pena e primário no fresamento concordante e do tipo primário e menor no fresamento discordante no Teste 1 da microfresa VQ.	59
Figura 4.24. Rebarbas do tipo agulha no fresamento concordante e do tipo menor no fresamento discordante no Teste 1 da microfresa VQ.	60

Figura 4.25. Rebarbas do tipo agulha e menor no fresamento concordante e do tipo menor enrolado no fresamento discordante no Teste 2 da microfresa MS.	60
Figura 4.26. Rebarbas do tipo menor em ambos fresamento concordante e discordante no Teste 2 da microfresa VF.	61
Figura 4.27. Rebarbas do tipo primário e menor no fresamento concordante e do tipo menor no fresamento discordante no Teste 2 da microfresa VQ.	61
Figura 4.28. Momento em que a microfresa VQ quebrou no experimento de réplica no Teste 2.	62

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Parâmetros a serem analisados no microfresamento.....	6
Tabela 2.2. Classificação AISI dos aços ferramentas.	12
Tabela 2.3. Faixa de composição química, em massa, do aço ferramenta AISI H13 (ASM International, 1990).	13
Tabela 2.4. Propriedades mecânicas do aço ferramenta AISI H13 (ASM International, 1990; Bryson, 2005; Machado et al., 2015).	13
Tabela 2.5. Parâmetros de corte e resultados para a rugosidade Ra. (Adaptado de Alonso, 2023).....	15
Tabela 2.6. Parâmetros geométricos das ferramentas. (Adaptado de Queiroz, 2022)... ..	15
Tabela 2.7. Resultados obtidos para a rugosidade Ra. (Adaptado de Queiroz, 2022)... ..	15
Tabela 2.8. Parâmetros de corte e resultados para o desgaste. (Adaptado de Alonso, 2023)	19
Tabela 2.9. Resultados obtidos para o desgaste. (Adaptado de Queiroz, 2022).	19
Tabela 2.10. Resultados obtidos para as rebarbas formadas. (Adaptado de Queiroz, 2022).	23
Tabela 3.1. Composição química da amostra de aço AISI H13.	26
Tabela 3.2. Parâmetros geométricos das ferramentas utilizadas.....	27
Tabela 3.3. Propriedades do revestimento <i>MSTAR</i> (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).....	29
Tabela 3.4. Propriedades do revestimento <i>IMPACT MIRACLE</i> (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).	30
Tabela 3.5. Propriedades do revestimento <i>SMART MIRACLE</i> (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).....	31
Tabela 3.6. Parâmetros de corte.	35
Tabela 4.1. Intervalo de confiança de 95 % para o desgaste de cada microfresa.	45
Tabela 4.2. Distância microfresada para o aumento da altura das rebarbas.	56
Tabela 4.3. Todos os resultados obtidos.....	63

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
APC	Aresta Postiça de Corte
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C ₂ H ₅ OH	Álcool Etílico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DLC	<i>Diamond-like Carbon</i>
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Elétrons
FC	Fresamento Concordante
FD	Fresamento Discordante
FEQUI	Faculdade de Engenharia Química
fz	Avanço por dente
h	Espessura de corte
hm	Espessura de corte mínima
HNO ₃	Ácido Nítrico
IC	Intervalo de Confiança
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAMAT	Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais
LAMEV	Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa Em Usinagem
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
MS	MS2MS0040
NBR	Norma Brasileira
Ra	Desvio aritmético médio
Rq	Desvio médio quadrático
r _β	Raio de aresta principal de corte
r _ε	Raio de ponta
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Nacional
Ti6Al4V	Liga de Titânio Grau 5
TiNAI	Nitreto de Alumínio e Titânio
TRM	Taxa de Remoção de Material
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
VF	VF2XLD0040N010
VQ	VQXLD0040N010
X_r	Ângulo de posição primário
X_r'	Ângulo de posição secundário
α	Ângulo de saída
β_0	Ângulo de cunha
ε_r	Ângulo de ponta

Sumário

CAPÍTULO I	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos	3
1.2	Estruturação do Trabalho.....	3
CAPÍTULO II	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Microfresamento	5
2.1.1	Efeito Escala	6
2.1.2	Microfresa.....	9
2.2	Aços Ferramentas	11
2.2.1	Aços Ferramentas H13.....	12
2.3	Rugosidade	13
2.4	Desgaste da ferramenta	16
2.5	Rebarbas	20
CAPÍTULO III	METODOLOGIA	24
3.1	Caracterização das Amostras	25
3.2	Microfresas.....	27
3.2.1	MS2MSD0040 - <i>MSTAR</i> - MS.....	28
3.2.2	VF2XLD0040N010 - <i>IMPACT MIRACLE</i> - VF	29
3.2.3	VQXLD0040N010 - <i>SMART MIRACLE</i> - VQ	30
3.3	Microfresadora	32
3.4	Fluido de Corte.....	32
3.5	Configuração Experimental.....	33
3.6	Posicionamento das Microfresas	33
3.7	Ensaio de Microfresamento	34
3.8	Medição do Desgaste das Microfresas	35
3.9	Medição de Rugosidade	36
3.10	Medição de Rebarbas	38
3.11	Análise Qualitativa das Superfícies Microusinadas	38
CAPÍTULO IV	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	Desgaste da Microfresas.....	39
4.2	Rugosidade	46
4.3	Formação de Rebarbas	53
4.4	Síntese dos Resultados Obtidos.....	62
CAPÍTULO V	CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS	BIBLIOGRÁFICAS	66

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A usinagem é um termo que abrange todos os processos que proporcionam a uma peça determinado acabamento, forma ou dimensão, ou ainda uma combinação desses aspectos, resultando na remoção de material em forma de cavaco. Esse cavaco corresponde a uma porção do material retirada pela ferramenta de corte, apresentando forma geométrica irregular (Ferraresi, 1969).

Inicialmente realizada de forma manual e rudimentar, a usinagem evoluiu significativamente e, atualmente, utiliza máquinas de comando numérico computadorizado (CNC). Essas máquinas oferecem alta precisão e são amplamente empregadas em setores como os de automóveis, indústria naval, aeroespacial, eletrodomésticos e eletrônicos.

Nos dias de hoje, a miniaturização dos componentes é uma das principais tendências tecnológicas. A redução do tamanho de peças eletrônicas e mecânicas é essencial para integrar múltiplas funcionalidades em dispositivos compactos e eficientes. Produtos miniaturizados trazem diversas vantagens, como menor consumo de energia e material, leveza, alta sensibilidade (reduzindo a energia necessária para ativação de microcomponentes) e boa relação custo-desempenho. Essas características são cada vez mais requisitadas em áreas como as indústrias médica, de transporte e de comunicação (Serje et al., 2020).

Para atender a essa tendência de miniaturização, os processos de usinagem têm se transformado. Atualmente, técnicas de microusinagem, como o microfresamento, têm destaque, sendo fundamentais para a fabricação de peças em pequena escala.

Paralelamente, um dos materiais mais utilizados nas últimas décadas é o aço ferramenta. Esse material é amplamente aplicado na fabricação de moldes, matrizes, ferramentas de corte e conformação, além de componentes para máquinas. Devido à sua relevância, esses aços demandam rigorosos cuidados em sua fabricação e utilização, pois precisam atender a requisitos específicos para suportar as condições de trabalho a que serão submetidos (Chiaverini, 2005).

Nesse contexto, a relevância dos processos de microfresamento e do uso de aços ferramenta torna-se evidente. Assim, a realização de pesquisas que integrem essa técnica

de fabricação a esse material é indispensável para atender às exigências crescentes da indústria moderna.

A microusinagem ainda possui sua importância no contexto atual dos processos de fabricação, entretanto, utilizando-se da base de dados da SCOPUS, notou-se um leve decaimento em publicações, conforme pesquisas vão sendo feitas, o conhecimento sobre o assunto tende a se estabilizar, e com isso diminuir pesquisas que sejam inovadoras sobre o assunto. Apesar disso, a subárea de microfresamento continua em ascendência, que representa ainda estudos a serem feitos. Isso pode ser visto nas **Figura 1.1** e **Figura 1.2**.

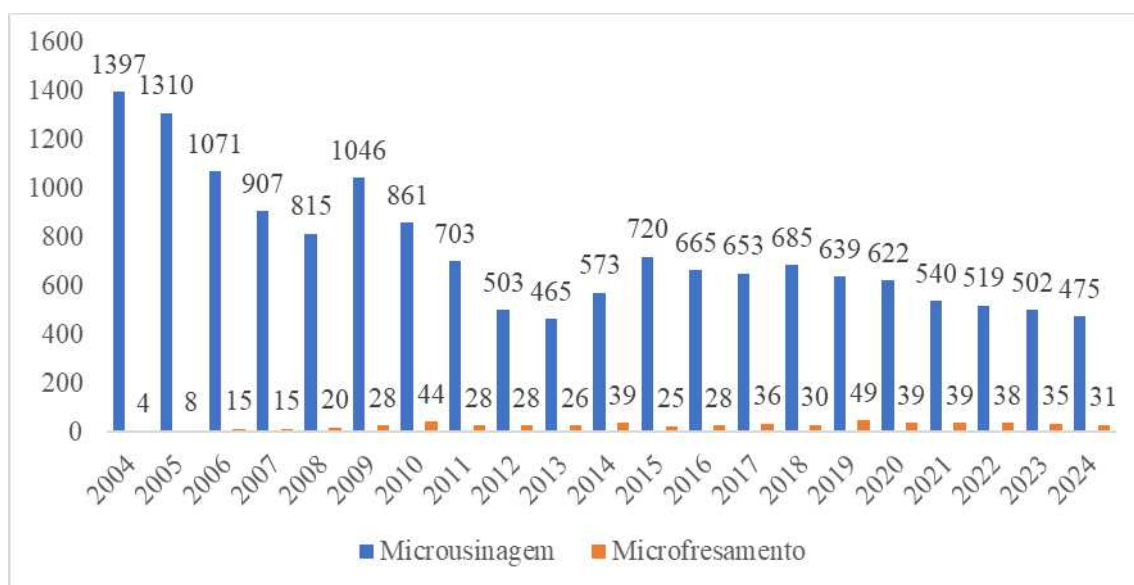


Figura 1.1. Comparação entre a quantidade de artigos publicados sobre os temas microusinagem e microfresamento (absoluto). Base de dados consultada: SCOPUS (<https://www.scopus.com/search>). Palavras-chave: “*micromachining*” e “*micromilling*”, pesquisa realizada em 10/12/2024.

Em conjunto com o tema aço ferramenta AISI H13 tem-se uma quantidade menor ainda de publicações quando comparado ao microfresamento, podendo ser visto na **Figura 1.2**, mostrando a importância de mais estudos abrangendo estes temas.

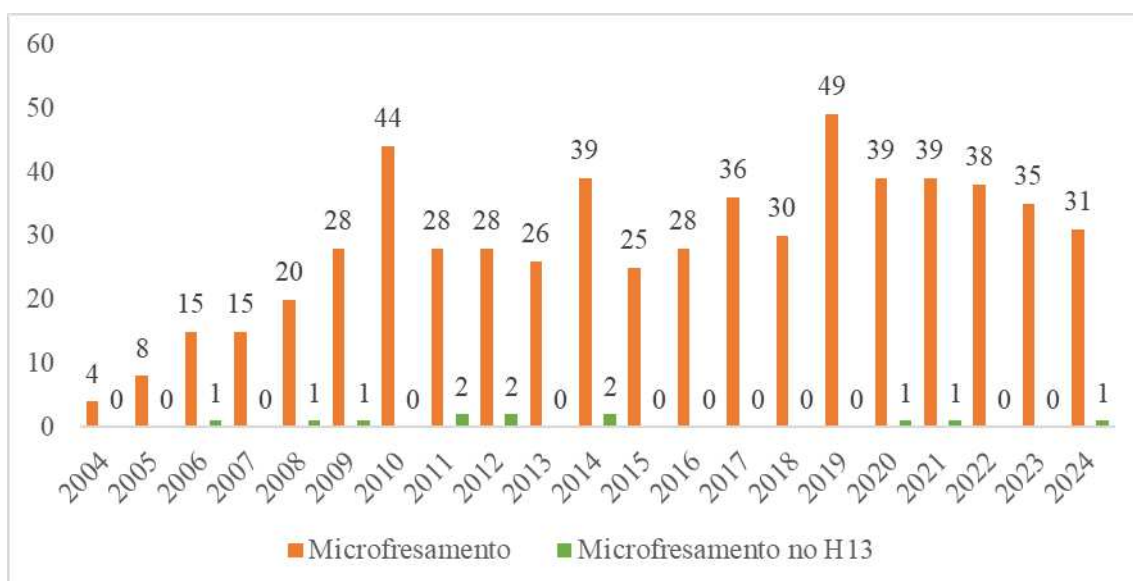


Figura 1.2. Comparação entre a quantidade de artigos publicados sobre os temas microfresamento e microfresamento no H13 (absoluto). Base de dados consultada: SCOPUS (<https://www.scopus.com/search>). Palavras-chave: “micromilling” e “H13 tool steel”, pesquisa realizada em 10/12/2024.

1.1 Objetivos

O principal objetivo do trabalho é comparar o desempenho de três microfresas de um mesmo fabricante. As microfresas apresentam diferenças quanto a geometria e revestimento, fatores que também serão analisados. Já o material a ser utilizado nos ensaios será o aço ferramenta AISIH13 convencional.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Correlacionar as características da geometria da ferramenta e as variáveis de saída: desgaste da microfresa, rugosidade superficial e formação de rebarbas.
- Definir entre as microfresas utilizadas, qual apresentou o melhor desempenho, considerando os resultados de desgaste, rugosidade e rebarbas formadas.

1.2 Estruturação do Trabalho

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. O Capítulo II apresenta a revisão da literatura relacionada ao tema de estudo, com ênfase nos seguintes tópicos:

microfresamento, rugosidade superficial, formação e classificação de rebarbas, microfresas, desgaste de ferramentas e aços ferramenta.

O Capítulo III detalha o procedimento experimental, abrangendo a caracterização do material da peça, os equipamentos utilizados, as microferramentas, a análise da geometria e do revestimento das ferramentas, além da fixação e preparação dos corpos de prova. Também são descritos os ensaios de microfresamento, a análise e medição do desgaste das ferramentas, a avaliação das rebarbas e a medição da rugosidade nos canais usinados.

No Capítulo IV, são apresentados os resultados obtidos, acompanhados de análises e discussões.

O Capítulo V reúne as principais conclusões do estudo, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, o Capítulo VI lista as referências bibliográficas utilizadas ao longo do desenvolvimento da dissertação.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Microfresamento

O microfresamento destaca-se como um dos processos de microusinagem mais versáteis e flexíveis, permitindo a fabricação de uma ampla gama de microcomponentes e microestruturas tridimensionais complexas. Entre os diferentes tipos de operações de fresamento, o microfresamento de topo, utilizando fresas de topo planas ou de ponta esférica, é amplamente predominante nas aplicações principais (Cheng; Huo, 2013).

De acordo com Cheng; Huo (2013), embora seja possível realizar o microfresamento em um centro de usinagem CNC convencional adaptado com uma turbina de alta rotação, o ideal é que o processo seja conduzido em uma fresadora de precisão ou em uma micromáquina projetada especificamente para essa finalidade. Como as microfresas possuem diâmetros muito pequenos, elas exigem rotações extremamente elevadas, geralmente entre 20.000 e 200.000 rpm, para alcançar velocidades de corte adequadas. Além disso, é fundamental que o sistema tenha alta rigidez e baixos erros de movimento para garantir a precisão necessária, mesmo sob a influência das forças de corte. A alta precisão do microfresamento também depende de um controle térmico rigoroso para evitar distorções causadas por variações de temperatura, tornando essencial a realização do processo em ambientes controlados.

As máquinas-ferramenta dedicadas ao microfresamento, possuem características específicas para atender às exigências desse processo. A estrutura dessas máquinas geralmente é construída em granito, um material que apresenta baixo coeficiente de expansão térmica ($6,5 \mu\text{m/mK}$) e densidade de 2.800 kg/m^3 , o que contribui para sua estabilidade térmica e dinâmica. As guias e sistemas de movimentação são frequentemente hidrostáticos ou aerostáticos, minimizando o atrito, e oferecem precisão inferior a $0,1 \mu\text{m}$, com deslocamentos máximos variando entre 100 mm e 1.000 mm. Para gerenciar todo o sistema, são utilizados softwares de controle avançados, capazes de processar dados e controlar variáveis como o posicionamento dos eixos e a velocidade de deslocamento (Cheng; Huo, 2013).

Em uma escala tão reduzida, fatores como a relação entre o raio da aresta de corte e a espessura mínima do material não deformado, o tamanho de grão e as propriedades

mecânicas do material usinado, além da geometria e do material da ferramenta de corte e das forças de usinagem, passam a ser determinantes no processo e não podem ser negligenciados (Lai et al., 2008; Li et al., 2014). Na **Tabela 2.1**, estão listados os parâmetros que regulam o processo de microfresamento, considerando o material, a ferramenta de corte e a máquina-ferramenta (Câmara et al., 2012; Chukewad, 2014).

Tabela 2.1. Parâmetros a serem analisados no microfresamento.

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

2.1.1 Efeito Escala

Ao operar em escalas reduzidas no microfresamento, surge o fenômeno conhecido como "efeito escala", que influencia as forças de corte, o desgaste das microferramentas e o padrão de formação dos cavacos (Simoneau et al., 2006). Esse efeito ajuda a explicar as distintas respostas dos materiais quando processados em dimensões menores (Mougo, 2016).

Devido ao efeito escala, a espessura de corte passa a ser comparável ao raio da aresta da ferramenta e ao tamanho dos grãos presentes na superfície usinada. Dessa forma, os parâmetros espessura de corte (h), raio de aresta principal de corte (r_β) e tamanho dos grãos do material exercem grande influência sobre o processo de corte (Cheng; Huo, 2013).

No microfresamento, diferentemente do fresamento convencional, não é possível desconsiderar o raio de aresta principal de corte (r_β), pois as ferramentas não são consideradas perfeitamente afiadas. Em geral, a espessura de corte (h) apresenta valores inferiores ao raio da aresta, o que resulta em um ângulo de saída (α) bastante negativo e, conseqüentemente, altera o mecanismo de remoção de material (Aramcharoen; Mativenga, 2009; Liu et al., 2004), como mostrado na **Figura 2.1**.

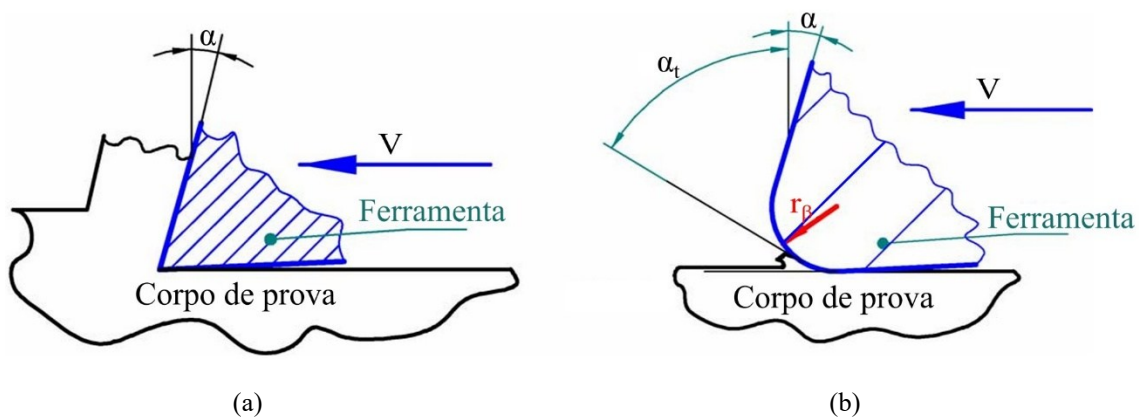


Figura 2.1. Influência do raio da aresta de corte (a) na usinagem convencional e (b) na microusinagem.

(Adaptado de Aramcharoen; Mativenga, 2009; Bissacco et al., 2005).

O fenômeno de *ploughing* ocorre quando o material se deforma, seja elasticamente ou plasticamente, em resposta à ação da ferramenta, impactando de maneira significativa a formação de rebarbas, a rugosidade da superfície e o desgaste da própria ferramenta (Aramcharoen; Mativenga, 2009), considerando que apenas uma parte do material é submetida à deformação plástica (Filiz et al., 2007).

Em uma operação de microfresamento de topo, o *ploughing* tende a se manifestar principalmente nas fases de entrada e saída da ferramenta, enquanto a formação do cavaco acontece na região de cisalhamento. Esse último fenômeno ocorre quando a espessura de corte ultrapassa o valor mínimo necessário para que o cisalhamento seja efetivado, conforme ilustrado na **Figura 2.2**. Observa-se que a espessura de corte (h) inicia em zero, aumenta até atingir o avanço por dente durante o fresamento discordante e, posteriormente, retorna a zero no fresamento concordante.



Figura 2.2. Variação da espessura de corte no microfresamento de topo, vista no plano de trabalho.

(Adaptado de Alonso, 2023).

A eficiência na remoção de material depende tanto da espessura de corte (h) quanto da espessura mínima (h_m), conforme ilustrado na **Figura 2.3**. Segundo Chae et al. (2006), o valor de h_m está diretamente relacionado ao raio da aresta de corte e ao tipo de material da peça.

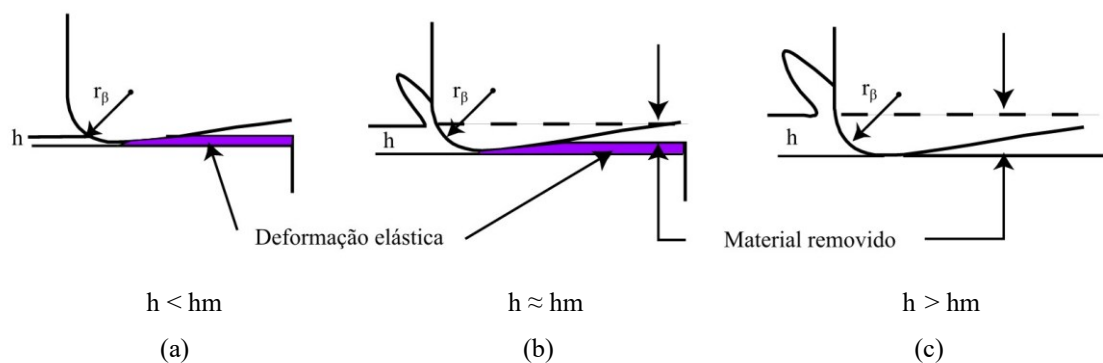


Figura 2.3. Mecanismo de formação de cavaco no microfresamento. (Adaptado de Chae et al., 2006).

Observa-se que na **Figura 2.3a**, quando a espessura de corte (h) é menor que a espessura mínima (h_m), a deformação do material é predominantemente elástica, e a microfresa não consegue remover o material da peça. Nesse cenário, a relação entre os ângulos da superfície de folga da ferramenta e a superfície da peça apresenta valores baixos. Na **Figura 2.3b**, se h se aproxima de h_m , ocorre o fenômeno conhecido como efeito *ploughing*, em que a espessura de corte se iguala à espessura mínima. Nesse caso, parte do material é removida por cisalhamento, enquanto outra parcela passa por deformações plásticas e elásticas. Na **Figura 2.3c**, quando h ultrapassa h_m , o material é removido principalmente por cisalhamento, permitindo desconsiderar as deformações do material.

O tamanho dos grãos do material de trabalho exerce influência significativa devido ao efeito escala. Isso ocorre porque o tamanho dos grãos pode ser semelhante à espessura de corte, o que pode resultar na formação de cavacos a partir de um único grão ou de poucos grãos (Bissacco et al., 2005). Além disso, as dimensões dos grãos são proporcionais ao raio da aresta de corte, conforme ilustrado na **Figura 2.4**.

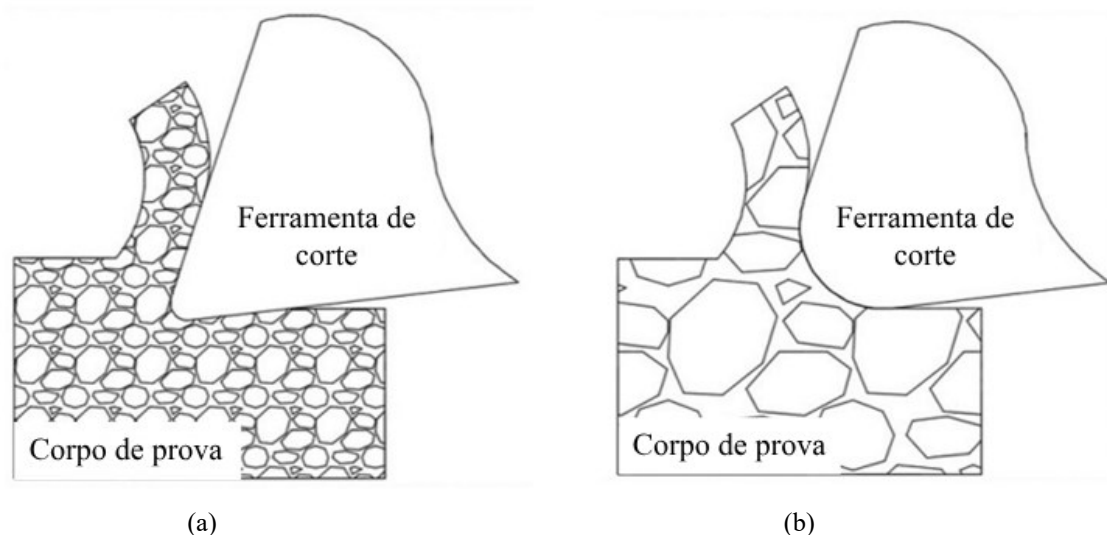


Figura 2.4. Comparação entre o tamanho dos grãos do material usinado e o raio da aresta de corte (a) na usinagem convencional e (b) na microusinagem. (Adaptado de Elkaseer et al., 2018).

2.1.2 Microfresa

A geometria das microfresas disponíveis comercialmente é, em geral, uma versão em escala micrométrica das fresas convencionais. Esses instrumentos podem ter diâmetros que variam entre 25 μm e 1000 μm e, normalmente, apresentam duas ou quatro arestas (Cheng; Huo, 2013).

Conforme descrito por Machado et al. (2015), a geometria das ferramentas de corte é caracterizada por sete ângulos fundamentais: ângulo de posição primário, ângulo de posição secundário, ângulo de ponta, ângulo de cunha, ângulo de saída, ângulo de folga e ângulo de inclinação. Além disso, esses dispositivos possuem dois raios distintos: o raio de aresta e o raio de ponta. Alterações nesses parâmetros geométricos podem impactar diretamente a formação e a evacuação do cavaco, a geração de rebarbas, as forças de corte, o desgaste da ferramenta e a qualidade final da peça usinada.

A porção da ferramenta responsável pelo corte é a cabeça da microfresa, ilustrada na **Figura 2.5** e na **Figura 2.6**. Essa região contém as arestas de corte, bem como as superfícies de saída e de folga, todas primárias e secundárias, além dos ângulos de posição primário (X_r) e secundário (X_r'), de ponta (ϵ_r), de cunha (β_0) e os raios de ponta (r_ϵ) e de aresta principal de corte (r_β). Para garantir precisão no processo de usinagem, o diâmetro dessa parte da ferramenta deve apresentar uma tolerância dimensional extremamente restrita. Qualquer variação pode comprometer a qualidade do corte e resultar em desvios dimensionais na peça produzida (Chen et al., 2021).

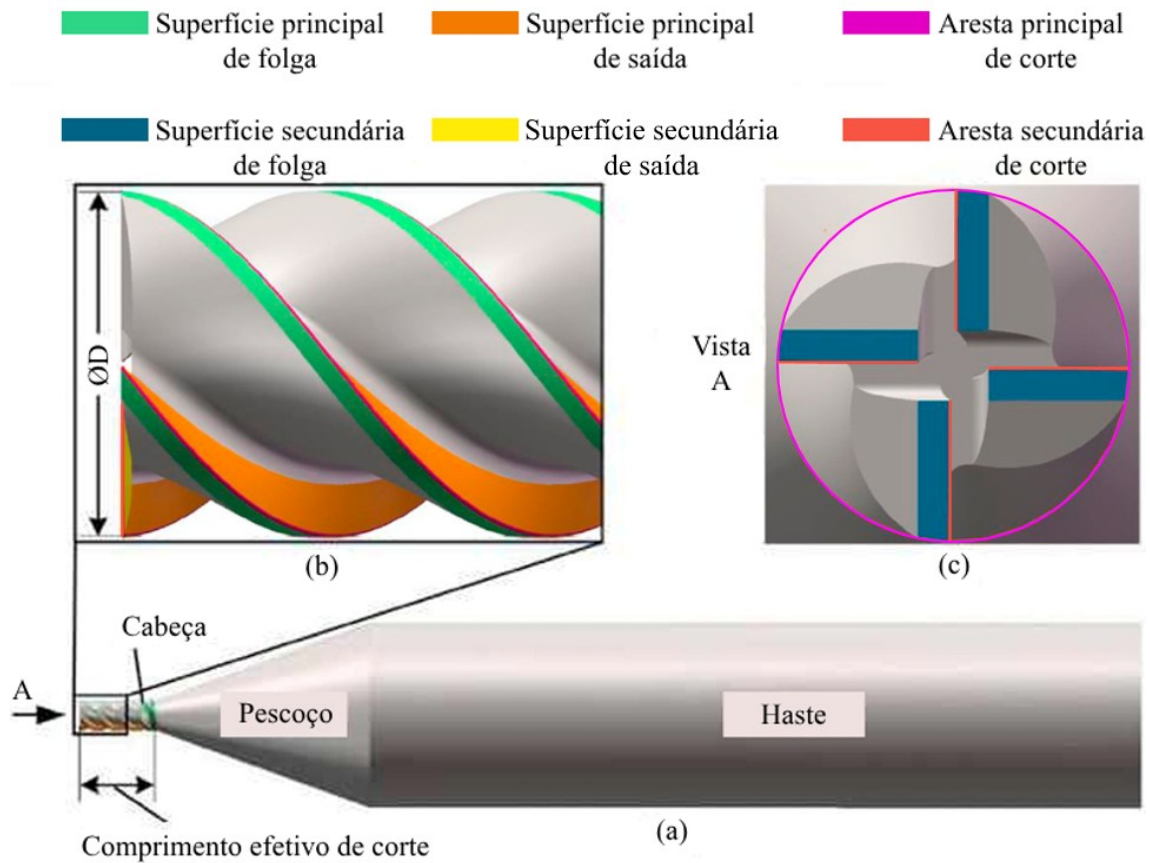


Figura 2.5. (a) Geometria genérica de microfresas contendo cabeça, pescoço e haste, e a ampliação das cabeças das ferramentas a partir das vistas (b) lateral e (c) topo. (Adaptado de Chen et al., 2021).

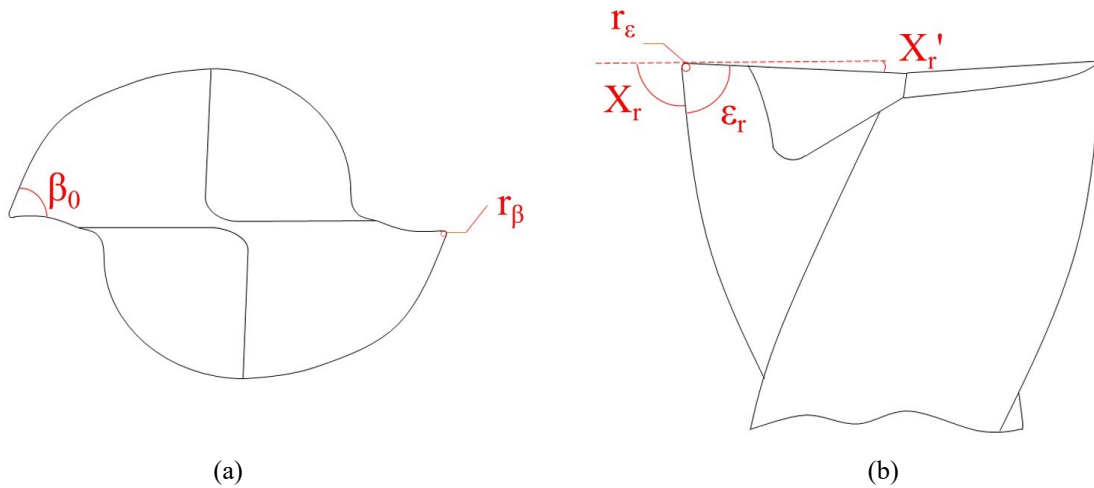


Figura 2.6. Parâmetros geométricos de uma microfresa a partir das vistas (a) topo e (b) lateral. (Adaptado de Queiroz, 2022).

Observa-se que as microferramentas para microfresamento apresentam geometrias e elementos semelhantes aos das ferramentas convencionais (Fleischer; Kotschenreuther, 2007), sendo seu projeto e fabricação baseados nos mesmos princípios

dos processos tradicionais. No caso das microfresas, o raio da aresta tipicamente varia entre 1 e 5 μm (Uriarte et al., 2006). Entre as propriedades essenciais dos materiais utilizados em ferramentas de corte, destacam-se a dureza, tenacidade, resistência ao desgaste, estabilidade química, resistência à fadiga, além da alta resistência à tração e ao cisalhamento (Ezugwu; Wang, 1997; Kalpakjian; Schmid, 2008). O metal duro é o principal material empregado na fabricação de microfresas, representando cerca de 85% das ferramentas, sejam elas com ou sem revestimento (Chae et al., 2006).

Além disso, é comum encontrar microfresas que utilizam os mesmos revestimentos aplicados em fresas convencionais, como TiN, AlCrN, AlTiN e TiAlN (Chen et al., 2021). Esses revestimentos não só modificam as propriedades da ferramenta, mas também ajudam a reduzir seu desgaste e a melhorar o desempenho do processo.

2.2 Aços Ferramentas

Os aços ferramenta são materiais de grande importância na indústria metalmeccânica devido às suas propriedades mecânicas, ampla disponibilidade e custo relativamente baixo. Conforme Gabardo (2008), esses aços constituem um dos pilares para o desenvolvimento de processos industriais.

Esses materiais são ligas com alto teor de carbono, geralmente contendo elementos como cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio. Esses elementos formam compostos conhecidos como carbonetos, que conferem elevada dureza e resistência ao desgaste (Callister; Rethwisch, 2009). Os aços ferramenta foram projetados para suportar altas temperaturas, resistir à corrosão e apresentar alta dureza e durabilidade (Chiaverini, 2005; Fallböhmer et al., 2000).

A classificação e especificação dos aços e outras ligas são realizadas por entidades como 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). O AISI categoriza esses materiais com base em sua composição química, tratamento térmico e aplicações, conforme ilustrado na **Tabela 2.2**.

Tabela 2.2. Classificação AISI dos aços ferramentas.

Aços para trabalhos a frio	A	temperáveis ao ar, média-liga
	D	alto carbono, alto cromo
	O	temperáveis em óleo
Aços para trabalhos a quente	H01 – H19	a base de Cr
	H20 – H39	a base de W
	H40 – H59	a base de Mo
Aços rápidos	T	a base de W
	M	a base de Mo
	M50	intermediários
Aços para uso especial	W	temperáveis em água
	S	resistentes ao impacto
	L	baixa-liga
	F	contendo C e W
	P	baixo carbono para aplicações em moldes para plásticos

2.2.1 Aços Ferramentas H13

Entre os aços para trabalho a quente da série H, os mais utilizados comercialmente são os aços à base de cromo, com destaque para os tipos H11, H12 e H13. Esses materiais foram inicialmente desenvolvidos para a fundição de ligas de alumínio devido à sua resistência a trincas.

De acordo com Chiaverini (2005), o aço ferramenta AISI H13 é amplamente reconhecido e empregado na fabricação de matrizes usadas em processos como fundição, extrusão e forjamento.

Roberts et al. (1998) também mencionam que o aço ferramenta AISI H13 se destaca por sua elevada temperabilidade e tenacidade. No entanto, sua superfície de contato pode sofrer desgaste significativo quando exposta a altas cargas, temperaturas elevadas e ambientes corrosivos. Para melhorar a resistência ao desgaste e suportar as altas temperaturas dos metais fundidos, é necessário realizar um tratamento térmico adicional no aço ferramenta AISI H13 (Roberts et al., 1998).

As **Tabela 2.3** e **Tabela 2.4** apresentam, respectivamente, a composição química e as propriedades mecânicas do aço ferramenta AISI H13.

Tabela 2.3. Faixa de composição química, em massa, do aço ferramenta AISI H13 (ASM International, 1990).

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

Tabela 2.4. Propriedades mecânicas do aço ferramenta AISI H13 (ASM International, 1990; Bryson, 2005; Machado et al., 2015).

Densidade (g/cm ³)	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	42-55	40-53	92	10,4 e 13,1	70

O fresamento de aços endurecidos tem sido amplamente empregado na produção de moldes e matrizes devido ao seu excelente desempenho em condições operacionais exigentes (Arruda, 2019).

2.3 Rugosidade

A rugosidade superficial é caracterizada por pequenas irregularidades ou desvios microgeométricos que resultam do próprio processo de corte, como marcas de avanço, formação de aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, entre outros fatores (Machado et al., 2015).

Esse parâmetro é amplamente utilizado para avaliar a qualidade das superfícies usinadas e, por isso, tem sido objeto de estudo em diversas pesquisas teóricas e experimentais ao longo de décadas. A rugosidade pode ser medida em duas dimensões (2D) ou três dimensões (3D), proporcionando diferentes perspectivas de análise (Gadelmawla et al., 2002).

Entre os parâmetros mais conhecidos está o Ra, que representa a média aritmética das irregularidades da superfície. Esse índice é calculado como a média absoluta dos desvios em relação à linha média do perfil avaliado. Sua facilidade de definição e medição, além de fornecer uma visão clara da qualidade da superfície, faz do Ra o

parâmetro mais utilizado no controle de processos para avaliação de rugosidade (Gadelmawla et al., 2002).

De acordo com Aramcharoen; Mativenga (2009), a qualidade da superfície gerada no microfresamento é crucial para o desempenho de microcomponentes. Como a rugosidade superficial é um indicador fundamental de qualidade em peças funcionais, ela tem sido amplamente investigada.

A relação entre a espessura de corte e o raio da aresta de corte desempenha um papel significativo na qualidade da superfície usinada. Durante o fresamento, o valor dessa relação pode ser extremamente baixo, especialmente no início do fresamento discordante e no final do fresamento concordante. Nesses casos, o efeito de sulcamento se torna predominante, comprometendo a qualidade da superfície e aumentando a rugosidade. Esse fenômeno ocorre tanto no fresamento convencional quanto no microfresamento, mas com impacto mais acentuado neste último devido à menor escala envolvida (Bissacco et al., 2005).

Para alcançar baixos níveis de rugosidade no processo produtivo, pode ser necessário incluir etapas adicionais, como operações de acabamento. Contudo, procedimentos como polimento são geralmente onerosos e muitas vezes realizados manualmente. Para otimizar uma linha de produção, é essencial prever os valores de rugosidade gerados por cada etapa do processo. No entanto, essa tarefa é desafiadora devido à multiplicidade de fatores que influenciam a fabricação, incluindo parâmetros de corte, escolha do material, dinâmica do processo, geometria da ferramenta e tipo de revestimento (Meijer et al., 2019).

A vibração também exerce uma influência significativa na qualidade da superfície usinada. Esse fenômeno está presente em diversos processos de usinagem e afeta tanto a rugosidade superficial quanto a produtividade. Vibrações intensas durante o contato entre a ferramenta e a peça podem aumentar a espessura e as forças de corte, contribuindo para maior rugosidade superficial e desgaste acelerado da ferramenta (Liu et al., 2018; Yue et al., 2019).

De acordo com Alonso (2023), foram feitos microfresamentos no aço ferramenta AISI H13 de dureza $193,7 \pm 3,0$ HB, com uma microfresa denominada pela fabricante MS2MSD0040, a mesma a ser usada neste trabalho. Na **Tabela 2.5** observa-se os parâmetros de corte e resultados obtidos para a rugosidade Ra.

Tabela 2.5. Parâmetros de corte e resultados para a rugosidade Ra. (Adaptado de Alonso, 2023).

Testes	Velocidade de corte (m/min)	Rotação (rpm)	Profundidade de corte (μm)	Avanço por dente ($\mu\text{m}/\text{dente}$)	Ra (μm)
1	40,2	32.000	40	1	0,1308
2				5	0,1457
3				10	0,1379
4			20	5	0,1532
5			10		0,1506

De acordo com Queiroz (2022), foram feitos microfresamentos no aço ferramenta AISI H13 de dureza $193,7 \pm 3,0$ HB, com 5 microfresas de diferentes geometrias, todas sob a mesma condição de corte, sendo que as microfresas B1 e B2 estão presentes neste trabalho. Na **Tabela 2.6** observa-se os parâmetros geométricos ângulo de posição primária (X_r), ângulo de posição secundária (X_r'), ângulo de ponta (ϵ_r), ângulo de cunha (β_0), raio de aresta principal de corte (r_β) e raio de aresta principal de corte (r_ϵ) das ferramentas e na **Tabela 2.7** observa-se os resultados obtidos da rugosidade Ra para cada um dos testes.

Tabela 2.6. Parâmetros geométricos das ferramentas. (Adaptado de Queiroz, 2022).

Ferramenta	X_r ($^\circ$)	X_r' ($^\circ$)	ϵ_r ($^\circ$)	β_0 ($^\circ$)	r_β (μm)	r_ϵ (μm)
A	98,5890	4,6010	76,8100	69,1945	3,4040	4,0320
B1	98,4038	3,8990	77,6973	75,6235	1,3738	1,5509
B2	83,1863	3,8648	92,9490	80,7708	1,9203	0,9491
C	91,7098	2,3965	85,8938	68,9233	0,9008	1,6807
D	77,0175	2,5820	100,4005	72,5495	4,0713	5,0471

Tabela 2.7. Resultados obtidos para a rugosidade Ra. (Adaptado de Queiroz, 2022).

Ferramenta	Ra (μm)
A	0,0682
B1	0,0530
B2	0,0543
C	0,0515
D	0,0907

De acordo com Queiroz (2022), a variação dos parâmetros geométricos ângulo de ponta e de cunha, foram as principais para a diferença dos resultados obtidos da rugosidade, sendo mostrado essas relações a **Figura 2.7**.

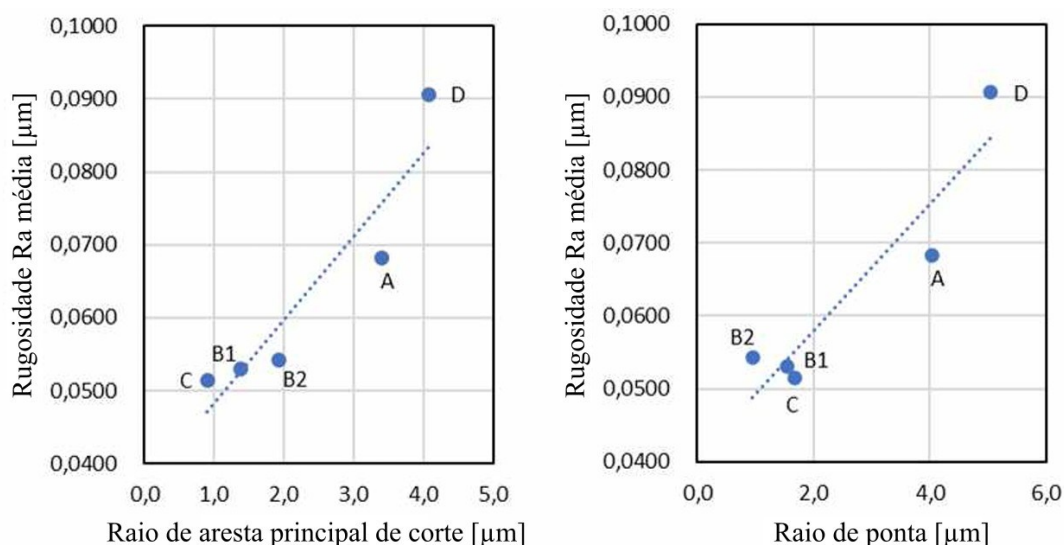


Figura 2.7. Gráficos de relação entre os parâmetros geométricos e rugosidade. (Adaptado de Queiroz, 2022).

2.4 Desgaste da ferramenta

As ferramentas de corte utilizadas tanto na usinagem em escala macro quanto na escala micro passam por desgaste ao longo do processo. Esse desgaste é inevitável, sendo causado pelo contato e pelo deslizamento relativo entre a ferramenta e o material de trabalho, além do atrito gerado no contato entre a ferramenta e o cavaco (Gomes et al., 2021; Machado et al., 2015).

No caso da microusinagem, o desgaste das ferramentas é ainda mais crítico devido às dimensões reduzidas das microferramentas. Essa miniaturização reduz a rigidez da ferramenta, tornando-a mais suscetível a vibrações, o que impacta negativamente sua vida útil, a qualidade do acabamento superficial e as tolerâncias dimensionais das peças produzidas (Malekian et al., 2009).

Além disso, as pequenas dimensões das microferramentas dificultam a medição do desgaste. Diferentemente da usinagem convencional, onde normas como a ISO 8688-1:1989 e a ISO 8868-2:1989 estabelecem padrões para medição, na microusinagem não há diretrizes padronizadas. Alhadeff et al. (2019) desenvolveram uma metodologia para

medir o desgaste em microferramentas, já que métodos disponíveis na literatura frequentemente não capturam com precisão o comportamento real do desgaste, que segue uma curva típica em três estágios, similar ao desgaste das macroferramentas (Dos Santos et al., 2018; Ziberov et al., 2020).

De acordo com o estudo de Alhadeff et al. (2019), medições baseadas apenas no raio de corte, como as realizadas por Dadgari et al. (2018) e Uzun et al. (2013), não representam adequadamente o desgaste das microferramentas. A abordagem mais adequada combina medições realizadas na superfície de saída e no desgaste de flanco.

Os autores também destacam que medir o desgaste pela redução do diâmetro da microferramenta é viável, desde que o critério de fim de vida esteja bem definido. Trabalhos de Filiz et al. (2007); Li et al. (2011); Santos (2020) e Teng et al. (2018) empregaram esse método e obtiveram resultados que refletem adequadamente o comportamento do desgaste. As curvas obtidas nesses estudos seguem o padrão em três estágios observado nas macroferramentas.

O primeiro estágio da curva é marcado por uma taxa de desgaste elevada. No segundo estágio, o desgaste ocorre de forma mais constante. Já o terceiro estágio é caracterizado por desgaste severo, acompanhado de altas forças de corte e aumento significativo da temperatura (Colpani et al., 2019).

Ziberov et al. (2020) realizaram um estudo sobre o desgaste de microfresas de metal duro com diâmetro de 152,4 μm , comparando ferramentas revestidas com DLC, TiNAl e ferramentas sem revestimento, durante o processo de microfresamento da liga de titânio Ti6Al4V. O desgaste foi avaliado na superfície de folga principal, sendo medido como a distância entre a ferramenta nova e a usada em duas direções distintas: a direção 1, denominada W1, e a direção 2, denominada W2, conforme ilustrado na **Figura 2.8**.

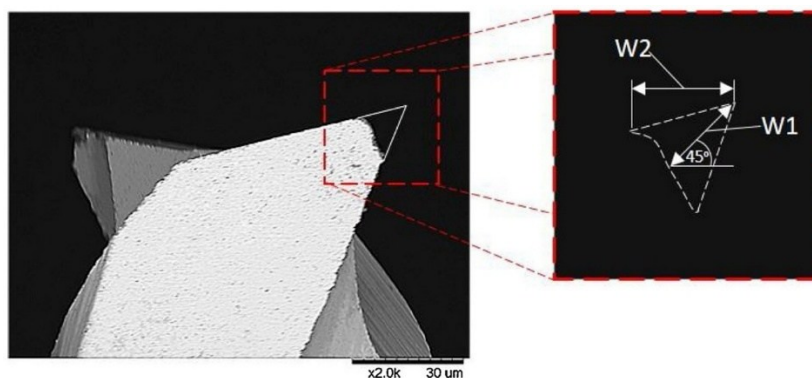


Figura 2.8. Desgaste medido da superfície principal de folga (Adaptado de Ziberov et al., 2020).

Gomes et al. (2020) investigaram o desgaste de microfresas de metal duro com revestimento de TiNAl e diâmetro de 400 μm durante o microfresamento do aço inoxidável 316L. A análise foi realizada na superfície de folga secundária das ferramentas, utilizando a sobreposição de imagens das microferramentas novas e usadas. O desgaste foi determinado com o auxílio do software ImageJ, medindo a distância entre as pontas das ferramentas nova e usada em ambas as arestas de corte, conforme ilustrado na **Figura 2.9**.

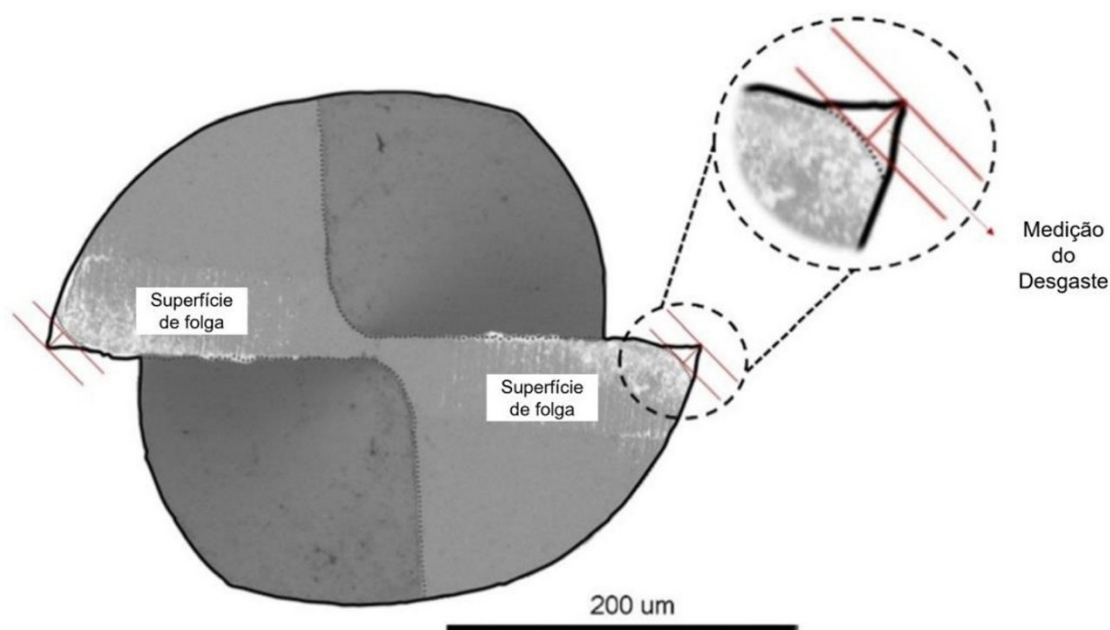


Figura 2.9. Metodologia para medição do desgaste (Adaptado de Gomes et al., 2020).

A partir dessas 2 metodologias, será feita a medição dos desgastes das microfresas na direção denominada W1, de acordo com Ziberov et al. (2020) na **Figura 2.8**, porém na superfície de folga secundária mostrada na **Figura 2.9**.

Alonso (2023) utilizou a metodologia de diferença do diâmetro da ferramenta através da comparação das imagens obtidas no MEV da ferramenta nova com a desgastada na vista de topo e medindo através do software ImageJ. Os experimentos dela foram o microfresamento do aço ferramenta AISI H13 de dureza $193,7 \pm 3,0$ HB com uma microfresa denominada pela fabricante MS2MSD0040, a mesma a ser usada neste trabalho, alterando as condições de corte. Na **Tabela 2.8** observa-se os parâmetros de corte utilizados e os resultados obtidos para o desgaste da microfresa em cada teste.

Tabela 2.8. Parâmetros de corte e resultados para o desgaste. (Adaptado de Alonso, 2023)

Testes	Velocidade de corte (m/min)	Rotação (rpm)	Profundidade de corte (μm)	Avanço por dente ($\mu\text{m}/\text{dente}$)	Desgaste (μm)
1	40,2	32.000	40	1	8,73
2				5	5,67
3				10	5,06
4			20	5	5,65
5			10		9,1162

De acordo com Alonso (2023), foi identificado o mecanismo de desgaste por abrasão de dois e três corpos após análises nas imagens das superfícies principal e secundária de folga.

Queiroz (2022), utilizou-se da mesma metodologia que Alonso (2023). Em seus experimentos, foram feitos microfresamentos no aço ferramenta AISI H13 de dureza $193,7 \pm 3,0$ HB, com 5 microfresas de diferentes geometrias, todas sob a mesma condição de corte, sendo que as microfresas B1 e B2 estão presentes neste trabalho. Na **Tabela 2.9**, observa-se os resultados obtidos para o desgaste de cada microfresa.

Tabela 2.9. Resultados obtidos para o desgaste. (Adaptado de Queiroz, 2022).

Ferramenta	Desgaste (μm)
A	9,00
B1	9,03
B2	6,32
C	5,61
D	5,08

De acordo com Queiroz (2022), a variação dos parâmetros geométricos ângulo de posição primário e secundário e ângulo de ponta foram as principais para a diferença dos resultados obtidos do desgaste, sendo mostrado essas relações na **Figura 2.10**.

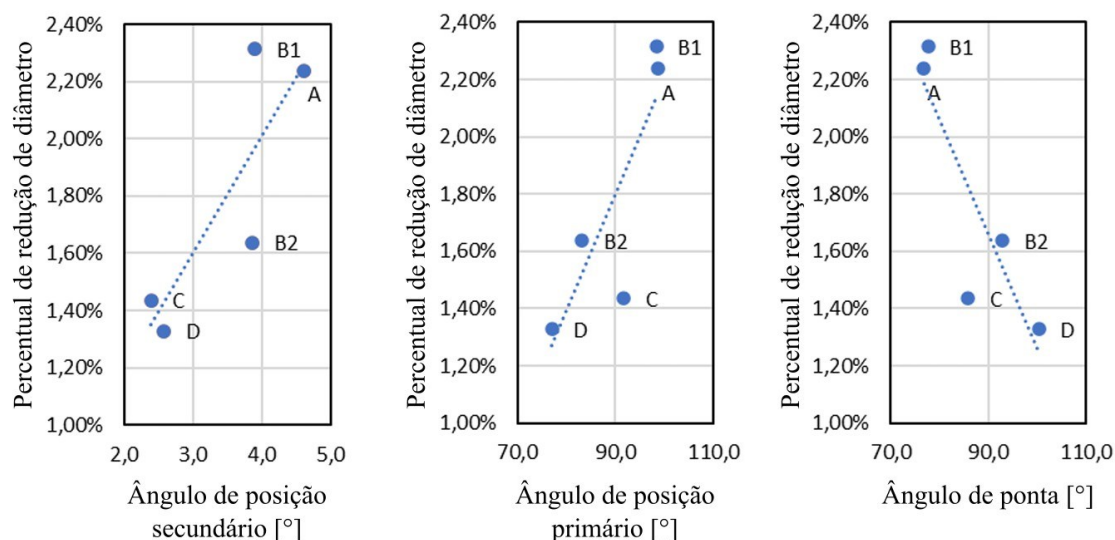


Figura 2.10. Gráficos de relação entre os parâmetros geométricos e desgaste. (Adaptado de Queiroz, 2022).

2.5 Rebarbas

Rebarbas são definidas como irregularidades ou bordas elevadas formadas em materiais durante processos de usinagem, seja por ação de máquinas ou ferramentas. Esses materiais podem incluir metais, madeira, plásticos ou outras substâncias submetidas a operações de corte. No contexto da usinagem, rebarbas são consideradas como material plastificado, gerado nas bordas ou cantos das peças devido ao fluxo plástico provocado pelas operações de corte e cisalhamento. Esse fenômeno exige atenção, pois frequentemente requer operações posteriores para remoção (Jin et al., 2020).

Segundo O'Toole et al. (2021), rebarbas impactam de forma significativa a qualidade da superfície usinada, reduzindo o desempenho funcional das peças. Esse efeito é ainda mais crítico em componentes de microescala, especialmente aqueles de forma livre e alta precisão. No entanto, o controle, avaliação e mitigação das rebarbas permanecem como grandes desafios no processo de microfresamento.

Além de comprometerem a qualidade das peças usinadas e montadas, as rebarbas aumentam os custos de produção em até 9 % do total de usinagem, devido à necessidade de processos adicionais de remoção, como a rebarbação. Esse processo secundário depende de fatores como tamanho, localização e material das rebarbas. Assim, as pesquisas têm se concentrado em métodos para reduzir ou eliminar completamente as

rebarbas durante a microusinagem, seja através de melhorias na geometria das ferramentas ou da otimização dos parâmetros de corte (O'Toole et al., 2021).

No microfresamento, as rebarbas podem ser classificadas conforme sua posição ou tipo. Quanto à posição, existem oito categorias, descritas na **Figura 2.11**, sendo cinco delas consideradas mais relevantes para o processo: rebarba de entrada lateral concordante, rebarba de topo concordante, rebarba de topo discordante, rebarba de saída e rebarba de saída lateral discordante. As demais categorias, como rebarba de entrada lateral discordante, rebarba de entrada e rebarba de saída lateral concordante, são classificadas como secundárias devido à sua quantidade reduzida após o processo de usinagem (Lee; Dornfeld, 2002).

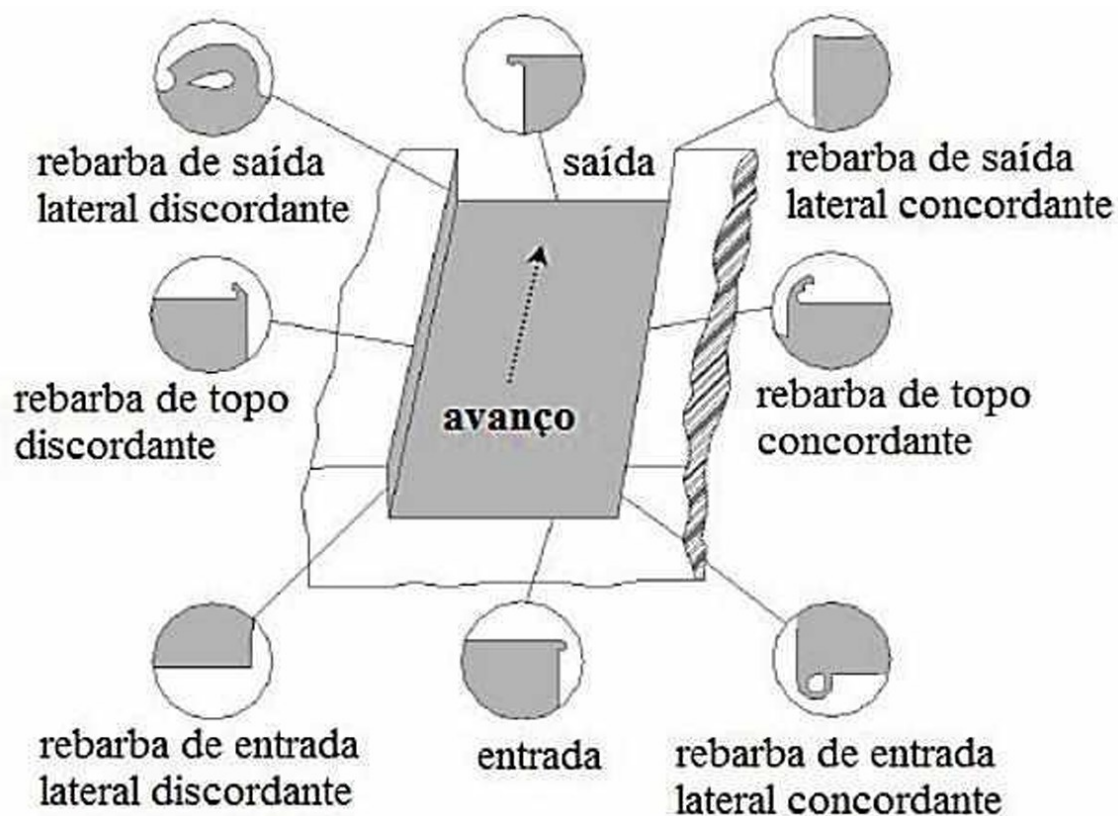


Figura 2.11. Classificação das rebarbas quanto à posição (Adaptado de Lee; Dornfeld, 2002).

No contexto do microfresamento, a classificação mais amplamente utilizada para os tipos de rebarbas foi proposta por Chern et al. (2007), abrangendo quatro categorias. A **Figura 2.12** ilustra as nomenclaturas adotadas pelos autores, que incluem: rebarba primária (**Figura 2.12a**), rebarba em forma de agulha (**Figura 2.12b**), rebarba do tipo pena (**Figura 2.12c**) e rebarba menor (**Figura 2.12d**).

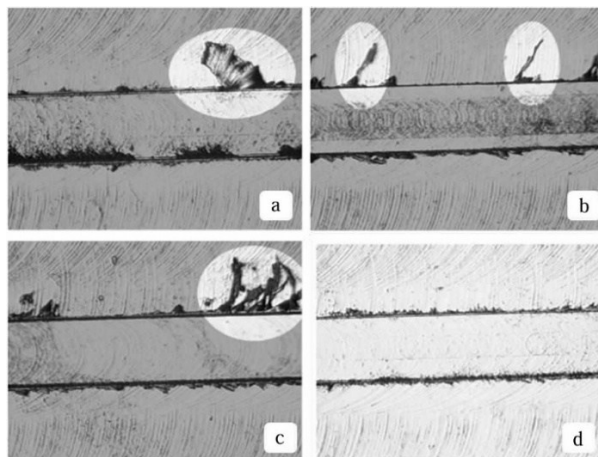


Figura 2.12. Classificação das rebarbas quanto ao tipo: (a) primária, (b) agulha, (c) pena e (d) menor (Adaptado de Chern et al. (2007)).

Em Alonso (2023) foram vistos rebarbas de topo semelhantes às rebarbas de saída do tipo onda encontradas em Chern (2006). A **Figura 2.13** ilustra as classificações de rebarbas encontradas no fresamento de face. Com isso será feita a comparação das rebarbas encontradas neste estudo com ambas as referências de classificação.

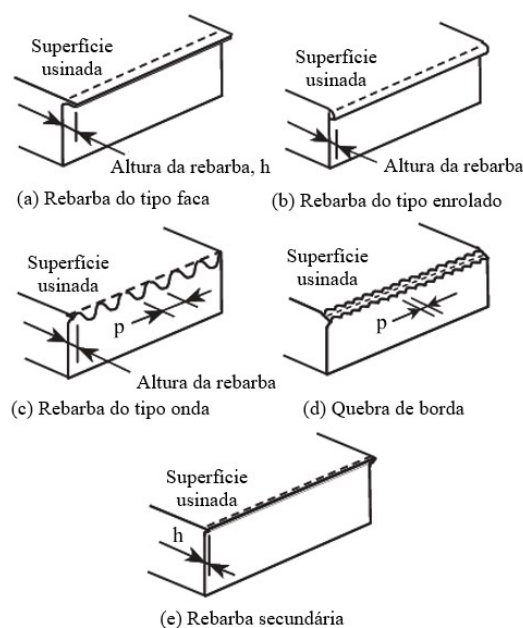


Figura 2.13. Cinco tipos de rebarbas no fresamento de face (Adaptado de Chern, 2006).

Em Queiroz (2022), a metodologia utilizada para a medição das rebarbas formadas foi a captura de imagens dos canais no MEV e utilizar do software ImageJ para medir a área das rebarbas de topo formadas e deixá-las em função do comprimento avaliado através da **Equação 2.1**. A unidade dos resultados é $\mu\text{m}^2/\text{mm}$.

$$\text{Quantidade de rebarba} = \frac{\text{Área de rebarba}}{\text{Comprimento avaliado}} \quad (2.1)$$

Em seus experimentos, foram feitos microfresamentos no aço ferramenta AISI H13 de dureza $193,7 \pm 3,0$ HB, com 5 microfresas de diferentes geometrias, todas sob a mesma condição de corte, sendo que as microfresas B1 e B2 estão presentes neste trabalho. Na **Tabela 2.10** observa-se os resultados obtidos para as rebarbas formadas.

Tabela 2.10. Resultados obtidos para as rebarbas formadas. (Adaptado de Queiroz, 2022).

Ferramenta	Quantidade de rebarba ($\mu\text{m}^2/\text{mm}$)	
	Concordante	Discordante
A	39.676,0	13.597,6
B1	15.174,4	9.635,1
B2	17.750,7	6.605,2
C	10.973,8	7.834,5
D	119.317,9	20.540,2

De acordo com Queiroz (2022), a variação dos parâmetros geométricos ângulo de posição primário e secundário e ângulo de ponta foram as principais para a diferença dos resultados obtidos do desgaste, sendo mostrado essas relações na **Figura 2.14**.

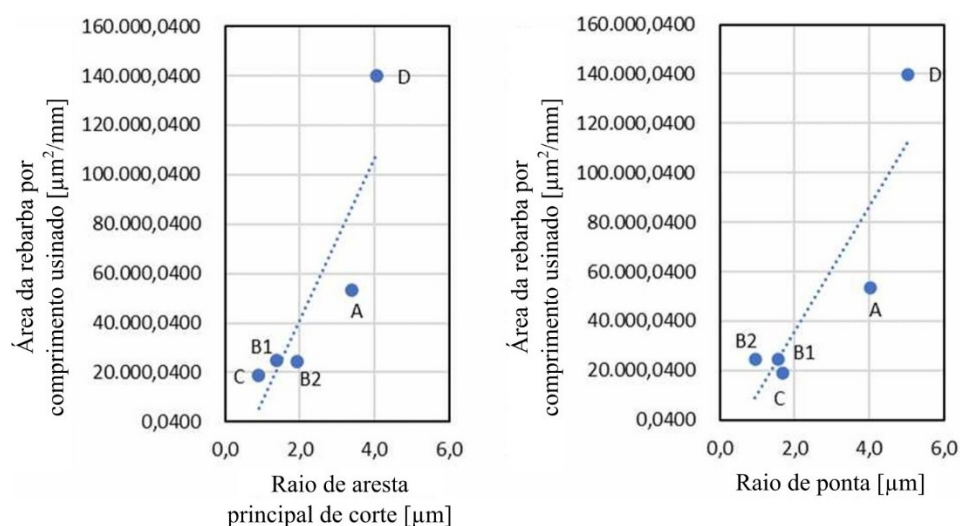


Figura 2.14. Gráficos de relação entre os parâmetros geométricos e a área da rebarba por comprimento usinado. (Adaptado de Queiroz, 2022).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

No presente capítulo, são apresentados os procedimentos experimentais utilizados para investigar a usinabilidade do aço ferramenta AISI H13 no processo de microfresamento, podendo ser visto o fluxograma dos passos a serem feitos na **Figura 3.1**.

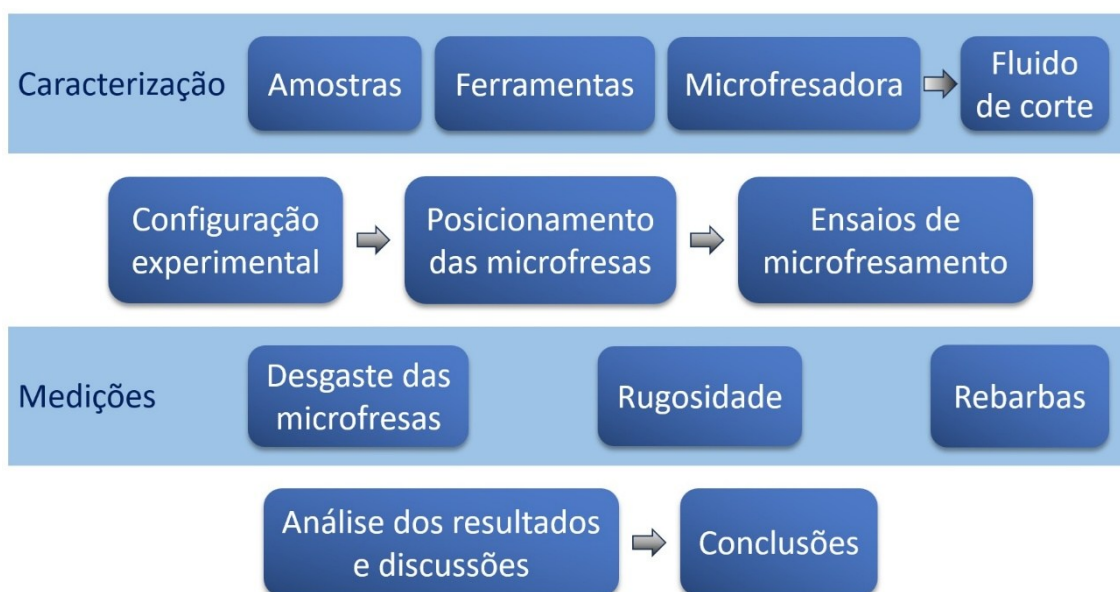


Figura 3.1. Fluxograma da metodologia deste trabalho.

O primeiro item refere-se à preparação e caracterização das amostras de material. São também apresentadas as principais especificações das microferramentas utilizadas e as informações sobre os equipamentos utilizados nos ensaios de microfresamento, de medição da rugosidade e de análise das superfícies usinadas.

Descrevem-se as metodologias aplicadas na análise da rugosidade superficial, desgaste das ferramentas e formação de rebarbas nas peças usinadas. O procedimento experimental consistiu na usinagem de 10 microcanais de 10 mm cada em aço ferramenta AISI H13, utilizando 3 microfresas de topo reto de um mesmo fabricante, 2 com 2 arestas e 1 com 4 arestas, todas com diâmetro de 400 μm , além de possuírem geometrias e revestimentos diferentes, empregando uma microfresadora CNC de alta precisão.

As ferramentas foram analisadas com auxílio de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), possibilitando a medição e análise dos mecanismos de

desgaste. A integridade superficial e a medição de rebarbas nos corpos de prova foram avaliadas pelo mesmo equipamento e em conjunto com o perfilômetro modelo Form Talysurf Intra do fabricante *Taylor Hobson*® (com resolução de 16 nm com 1,0 mm de campo ou 3 nm com 0,2 mm de campo). Todo o desenvolvimento do trabalho ocorreu no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), tendo também a participação do Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) da Faculdade de Engenharia Química (FEQUI) da UFU pela utilização do MEV da marca Tescan, modelo VEGA 3 LMU disponível.

3.1 Caracterização das Amostras

O aço ferramenta AISI H13 foi selecionado como material para os testes de microfresamento. As amostras foram produzidas por meio do processo de laminação e, em seguida, submetidas a um tratamento térmico de recozimento a 690 °C durante 3 horas e 30 minutos. Após essa etapa, o material foi resfriado lentamente até atingir a temperatura de 480 °C.

As barras de aço foram recebidas em formato bruto e preparadas por fresamento para alcançar as dimensões finais necessárias para os corpos de prova, conforme ilustrado na **Figura 3.2**.

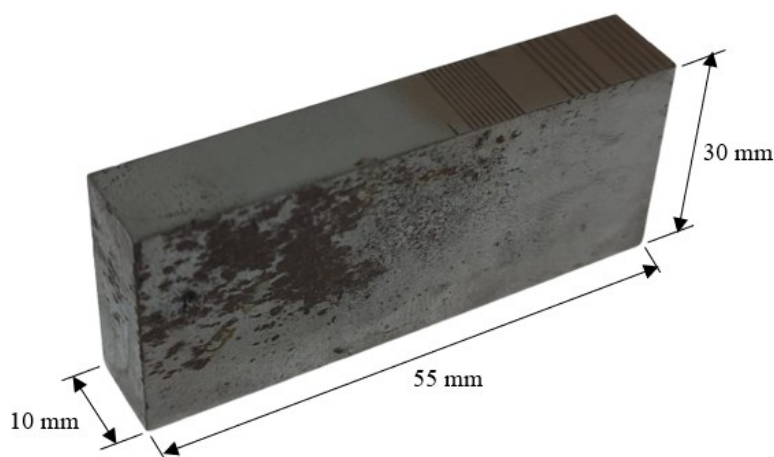


Figura 3.2. Corpo de prova e suas dimensões.

Para a realização da análise metalográfica, (Alonso, 2023) foram utilizadas lixas com granulometrias de 220, 320, 600 e 1200 mesh. Posteriormente, a superfície da

amostra foi polida com óxido de alumínio (alumina) de 1 μm para obter um acabamento adequado.

Após o polimento, a amostra foi submetida a um ataque químico por imersão durante 15 segundos em uma solução composta por 10% de ácido nítrico (HNO_3) e 90% de álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). A microestrutura do material foi analisada utilizando um microscópio óptico, e as imagens foram processadas com o software Image-Pro Plus, conforme apresentado na **Figura 3.3**.

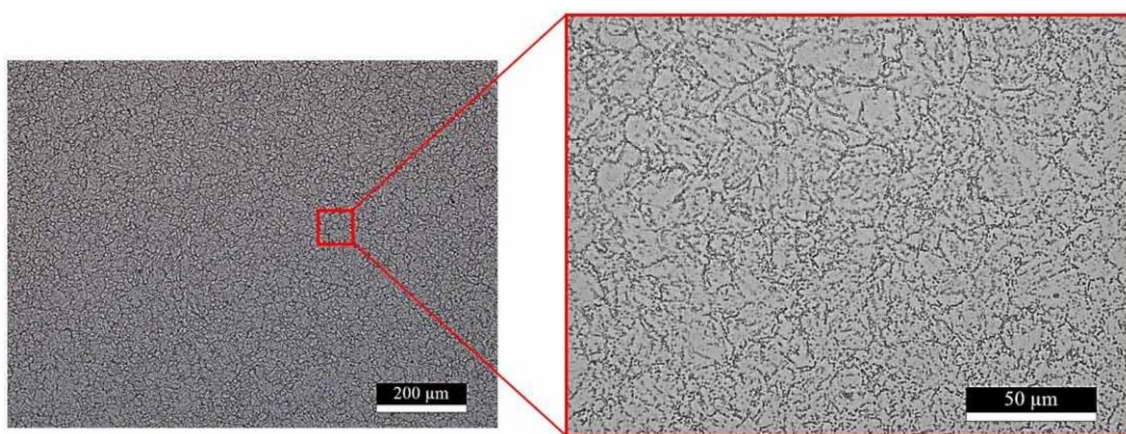


Figura 3.3. Microestrutura do aço ferramenta AISI H13 com ampliação de 200 μm e 50 μm (Adaptado de Alonso, 2023).

Para determinar a composição química do material, uma amostra foi encaminhada ao Laboratório de Ensaio e Análises em Materiais (LAMAT) - SENAI, localizado em Itaúna-MG. A análise foi realizada utilizando a técnica de Espectroscopia de Emissão Óptica, seguindo as especificações das normas ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014a. Os principais elementos químicos identificados estão listados na **Tabela 3.1**, enquanto o relatório completo encontra-se no Anexo 1.

Além disso, no mesmo laboratório, foi realizada a medição da dureza do material, obtendo-se um valor médio de $(193,7 \pm 3,0)$ HB.

Tabela 3.1. Composição química da amostra de aço AISI H13.

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

3.2 Microfresas

Neste trabalho foram utilizadas três microfresas com geometrias diferentes, do mesmo fabricante. Uma das geometrias já é utilizada nos trabalhos de microfresamento do laboratório. As outras duas geometrias foram sugeridas pelo fabricante. Além de geometria diferente, possuem revestimentos diferentes e são ferramentas de maior custo.

As três microfresas são de metal duro com diâmetro de corte de 0,4 mm e são denominadas MS2MSD0040 - *MSTAR*, VF2XLD0040N010 - *IMPACT MIRACLE* e VQXLD0040N010 - *SMART MIRACLE* da fabricante ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation (2024). Para simplificações, suas respectivas nomenclaturas serão abreviadas para MS, VF e VQ.

Os parâmetros geométricos das ferramentas foram medidos no Inkscape através da escala das imagens das ferramentas obtidas no MEV e ferramentas disponíveis no software, podendo observá-las na **Tabela 3.2**. Pelo alto nível de dificuldade na captura de imagem da vista lateral das ferramentas, foram medidos apenas uma vez os ângulos de posição primário e secundário e o ângulo e raio de ponta. Para o ângulo de cunha e raio de aresta principal de corte foram obtidas 8 amostras para cada variável para as ferramentas MS e VF e 16 amostras para a ferramenta VQ por ter o dobro de arestas que as outras, aplicando um intervalo de confiança de 95 % nesses dados.

Tabela 3.2. Parâmetros geométricos das ferramentas utilizadas.

Ferramenta	X_r (°)	X_r' (°)	ϵ_r (°)	β_0 (°)	r_ϵ (μm)	r_β (μm)
MS	95,98956	4,18788	79,82256	$66,08870 \pm 6,94115$	1,796	$1,347 \pm 0,446$
VF	82,67202	3,97122	93,35676	$82,50923 \pm 1,70884$	0,698	$1,638 \pm 0,326$
VQ	82,33531	6,27052	91,39417	$80,42587 \pm 1,02149$	1,509	$0,736 \pm 0,117$

Foi aplicado o teste t de Student para determinar se há diferença entre as ferramentas quanto ao ângulo de cunha e raio de aresta principal de corte e como resultado, as geometrias são diferentes entre si, porém o raio de aresta principal de corte das microfresas MS e VF podem ser consideradas iguais.

3.2.1 MS2MSD0040 - *MSTAR* - MS

Esta é uma microfresa de topo reto, com diâmetro de corte de 400 μm , possui duas arestas e são revestidas com (Al, Ti) N, denominado pelo fabricante de *MSTAR*.

Na **Figura 3.4** são apresentadas as dimensões em milímetros da microfresa MS, na **Figura 3.5** é apresentado uma foto da ferramenta com ampliação em sua gravura de fábrica e na **Figura 3.6** a sua geometria através de imagens registradas no MEV. Quanto ao revestimento *MSTAR*, na **Tabela 3.3** tem-se suas propriedades conforme o catálogo da ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation (2024).

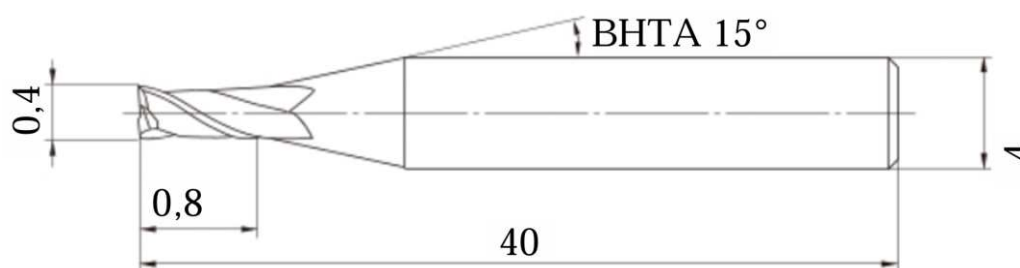


Figura 3.4. Dimensões em milímetros da microfresa MS2MS0040 (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).

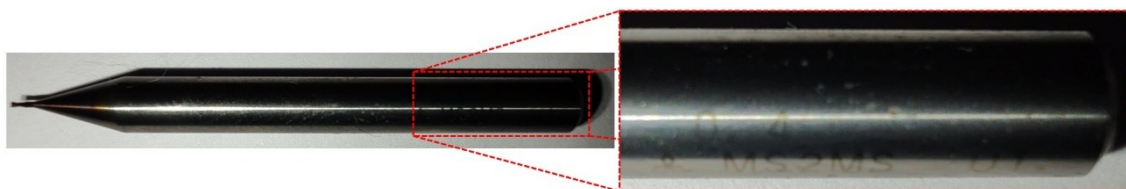
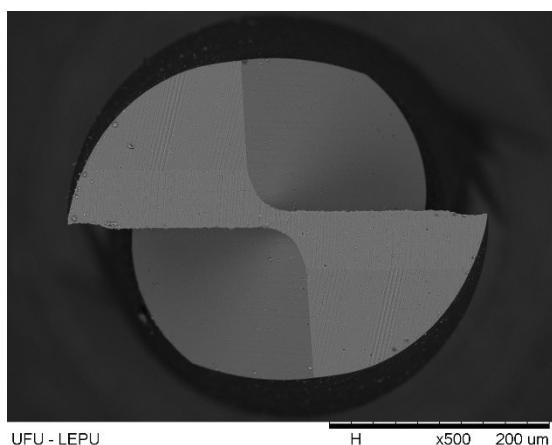
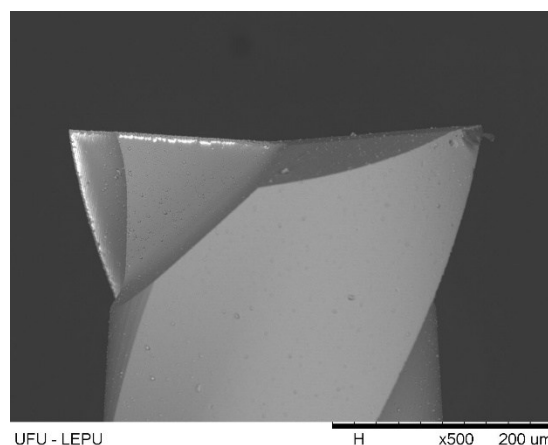


Figura 3.5. Foto da microfresa MS com ampliação em sua gravura.



(a)



(b)

Figura 3.6. Imagens da microfresa MS obtidas no MEV nas vistas (a) topo e (b) lateral.

Tabela 3.3. Propriedades do revestimento *MSTAR* (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).

Propriedades	(Al, Ti) N
Dureza (HV)	2800
Temperatura de Oxidação (°C)	800
Adesão (N)	80

3.2.2 VF2XLD0040N010 - *IMPACT MIRACLE* - VF

Esta é uma microfresa de topo reto, com diâmetro de corte de 400 µm, possui duas arestas e são revestidas com (Al, Ti, Si) N, denominado pelo fabricante de *IMPACT MIRACLE*. De acordo com a fabricante, seu valor de venda é 150 % o valor da MS.

Na **Figura 3.7** são apresentadas as dimensões em milímetros da microfresa VF, na **Figura 3.8** é apresentado uma foto da ferramenta com ampliação em sua gravura de fábrica e na **Figura 3.9** a sua geometria através de imagens registradas no MEV. Quanto ao revestimento *IMPACT MIRACLE*, na **Tabela 3.4** tem-se suas propriedades conforme o catálogo da ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation (2024).

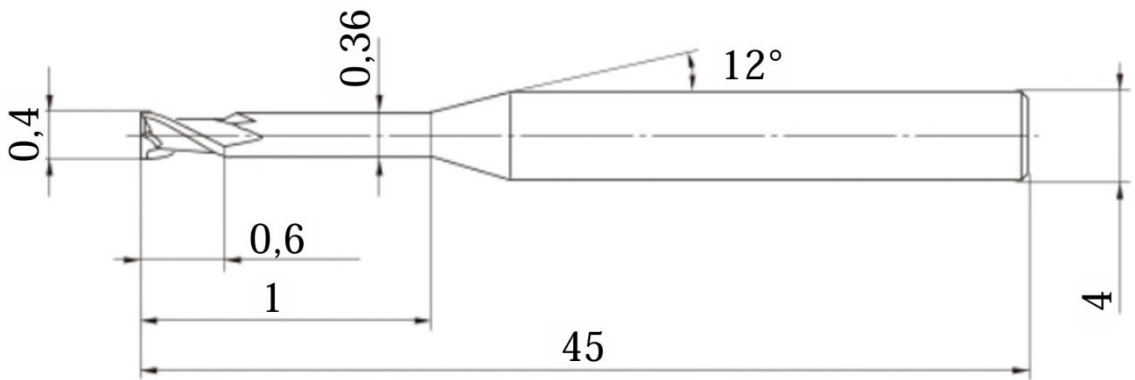


Figura 3.7. Dimensões em milímetros da microfresa VF2XLD0040N010 (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).

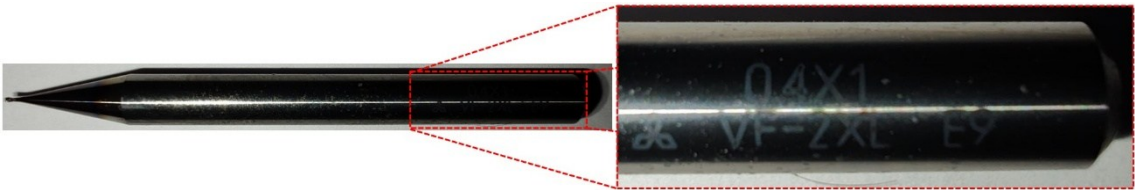


Figura 3.8. Foto da microfresa VF com ampliação em sua gravura.

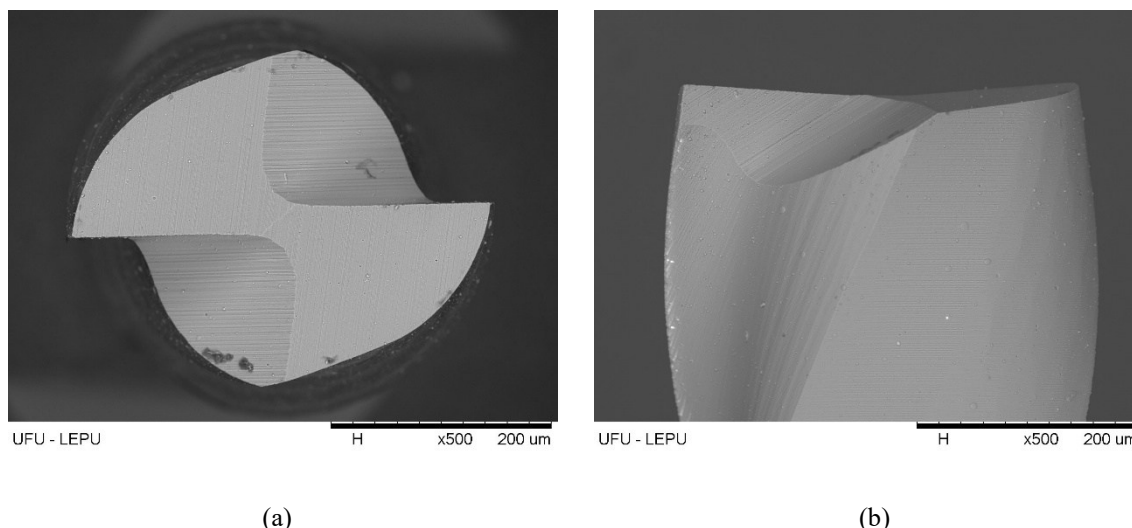


Figura 3.9. Imagens da microfresa VF2XLD0040N010 obtidas no MEV nas vistas (a) topo e (b) lateral.

Tabela 3.4. Propriedades do revestimento *IMPACT MIRACLE* (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).

Propriedades	(Al, Ti, Si) N
Dureza (HV)	3700
Temperatura de Oxidação (°C)	1300
Adesão (N) ¹⁾	100
Coeficiente de Atrito ²⁾ (800 °C)	0,48

1) Adesão: Medida pelo teste crítico de descascamento.

2) Coeficiente de Atrito: Medido pelo método de esfera-no-disco.

(Mecanismo de contagem: AISI D2 60HRC0,5)

3.2.3 VQXLD0040N010 - *SMART MIRACLE* - VQ

Esta é uma microfresa de topo reto, com diâmetro de corte de 400 μm, possui quatro arestas e são revestidas com (Al, Cr) N, denominado pelo fabricante de *SMART MIRACLE*. De acordo com a fabricante, seu valor de venda é 220 % o valor da MS.

Na **Figura 3.10** são apresentadas as dimensões em milímetros da microfresa VQ, na **Figura 3.11** é apresentado uma foto da ferramenta com ampliação em sua gravura de fábrica enquanto na **Figura 3.12** a sua geometria através de imagens registradas no MEV. Quanto ao revestimento *SMART MIRACLE*, na **Figura 3.13** é possível observar a sua microestrutura e na **Tabela 3.5**, as suas propriedades conforme o catálogo da ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation (2024).

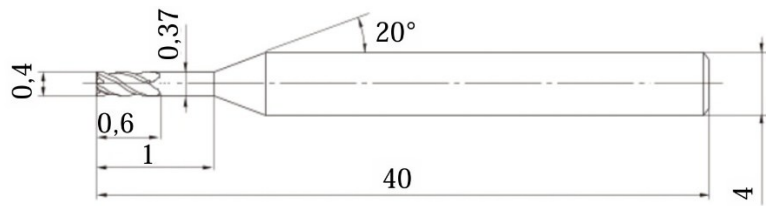


Figura 3.10. Dimensões em milímetros da microfresa VQXLD0040N010 (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).

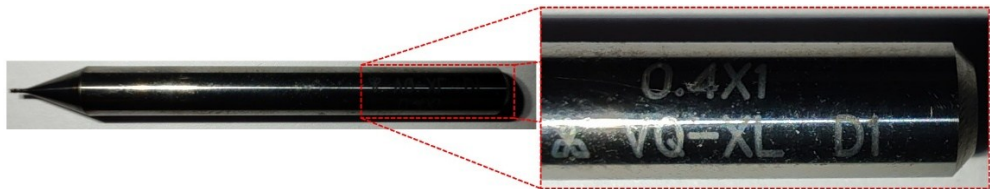


Figura 3.11. Foto da microfresa VQ com ampliação em sua gravura.

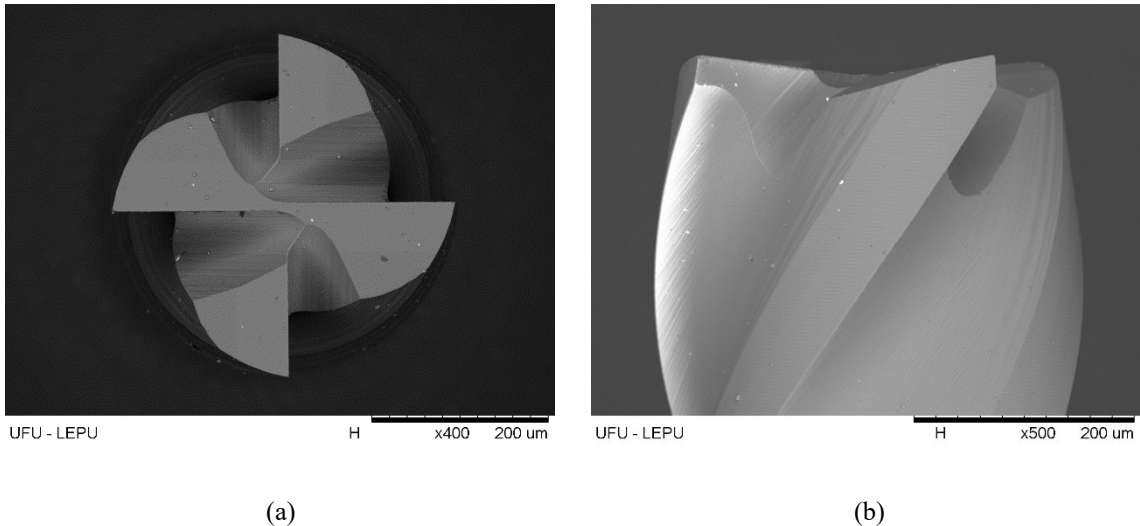


Figura 3.12. Imagens da microfresa c obtidas no MEV nas vistas (a) topo e (b) lateral.

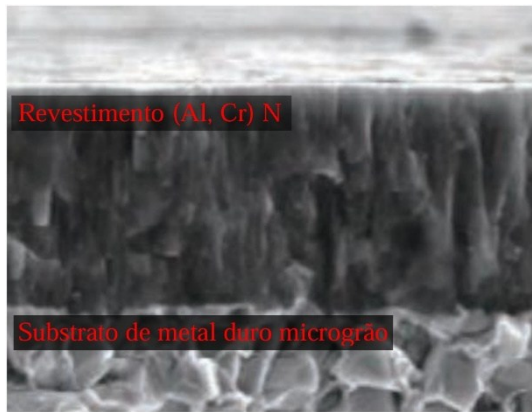


Figura 3.13. Microestrutura do revestimento SMART MIRACLE.

Tabela 3.5. Propriedades do revestimento SMART MIRACLE (Adaptado de ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024).

Propriedades	(Al, Cr) N
Dureza (HV)	3100
Temperatura de Oxidação (°C)	1100
Adesão (N)	80

3.3 Microfresadora

Para a execução dos ensaios de microfresamento, foi utilizada uma microfresadora CNC do modelo CNC Mini-mill/GX, fabricada pela Minitex Machinery Corporation®, conforme mostrado na **Figura 3.14**. O equipamento conta com um mandril Nakanishi modelo EM3060, capaz de alcançar uma rotação máxima de 60.000 rpm, com resolução de posicionamento nos eixos de 0,1 μm e velocidade máxima de avanço de 1.000 mm/min. Todo o sistema está montado sobre uma mesa inercial para minimizar vibrações externas que possam afetar o processo.



Figura 3.14. Microfresadora CNC modelo Mini-mil/GX, Minitex CNC (2024).

3.4 Fluido de Corte

Os ensaios foram conduzidos utilizando fluido de corte aplicado por meio da técnica de MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante), com uma vazão de 100 ml/h e pressão de 0,6 MPa. O fluido empregado foi o Vascomill MMS FA2, fabricado pela

Blaser®. A aplicação do fluido de corte foi realizada diretamente na microfresa na mesma direção que o avanço da microfresa. O bocal responsável pela aplicação foi posicionado a uma distância de 10 mm da microferramenta.

3.5 Configuração Experimental

O corpo de prova foi fixado à mesa da microfresadora utilizando uma morsa de precisão. Para conter o fluido de corte aplicado durante a usinagem, foi colocada uma cuba de acrílico entre a morsa e a mesa. A morsa foi firmemente presa à mesa por meio de parafusos e apoios, assegurando a rigidez necessária para o processo de microfresamento.

É necessário garantir que os desvios de planeza e perpendicularidade sejam insignificantes em relação à profundidade de corte é fundamental. Por isso, após a fixação do corpo de prova na morsa, a superfície da peça é nivelada através do faceamento na microfresadora CNC a qual foi empregada uma fresa de metal duro com diâmetro de 3,0 mm e duas arestas de corte. Os parâmetros de usinagem utilizados foram profundidade de corte de 0,5 μm e rotação de 40.000 rpm e por último uma profundidade de corte de 0,1 μm e rotação de 40.000 rpm.

3.6 Posicionamento das Microfresas

Uma etapa fundamental para ensaios de microfresamento, é o referenciamento da ferramenta. Neste trabalho, utilizou-se um teste de continuidade com multímetro digital. Uma ponta de prova é conectada na ferramenta e a outra na peça. Utiliza-se um avanço manual de 0,1 mm, através do software da microfresadora e sem rotação, até que o multímetro acuse contato.

Para o referenciamento da microfresa VQXLD0040N010, que possui cromo em seu revestimento e por isso possui baixa condutividade elétrica, foi utilizado outro método, segundo Alonso (2023). A aproximação da microfresa em relação ao corpo de prova foi acompanhada por meio de um microscópio USB, conforme mostrado na **Figura 3.15**. Após alcançar a menor distância possível observável, a microferramenta foi deslocada nas direções radial e axial, utilizando incrementos de profundidade de corte de 0,1 μm , através do software da microfresa, até entrar em contato com a peça. Durante esse

procedimento, a microfresa permaneceu em rotação de 10.000 rpm. Quando ocorreu o contato com o corpo de prova, uma marca visível foi registrada pela câmera. Esse processo permitiu definir o referenciamento do eixo z, resultando em uma precisão próxima à resolução de posicionamento da microfresadora, de 0,1 μm .

Não foi observado diferença na profundidade dos canais usinados com a profundidade de corte, porém o método com o multímetro, estimasse o tempo de 5 minutos para o referenciamento ser feito, enquanto no outro método, estimasse o tempo de 2 horas para o referenciamento ser feito.

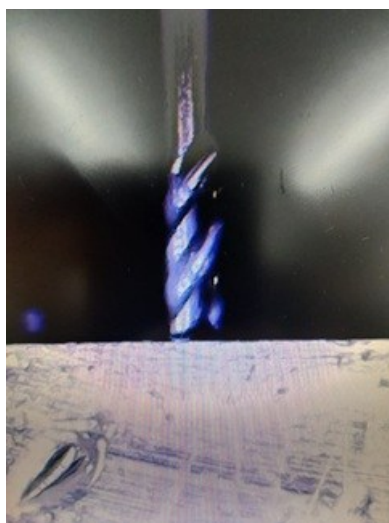


Figura 3.15. Posicionamento da microfresa sobre o corpo de prova.

3.7 Ensaios de Microfresamento

Os ensaios envolveram a fabricação de canais com 400 μm de penetração de trabalho, correspondente ao diâmetro da ferramenta. Os parâmetros de corte foram definidos em reunião com o representante do fabricante das microfresas. Foi sugerido a realização dos testes mantendo uma taxa de remoção de material constante para as três ferramentas, definidos no Teste 1. Também foram realizados testes, Teste 2, utilizando os parâmetros específicos para cada microfresa conforme o catálogo da ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation (2024). Os parâmetros de corte utilizados estão descritos na **Tabela 3.6**. Para cada condição de corte, foram produzidos 10 canais com 10 mm de comprimento cada, mantendo um espaçamento de 0,5 mm a cada canal, aumentando para 0,7 mm a cada 5 canais e aumentando mais uma vez para 1 mm a cada 10 canais conforme

o esquema ilustrativo mostrado na **Figura 3.16**. Esta configuração foi escolhida para melhor visualização e contabilidade dos canais para as análises.

Tabela 3.6. Parâmetros de corte.

Planejamento experimental	Teste 1			Teste 2		
	MS	VF	VQ	MS	VF	VQ
Rotação [rpm]	40.000			40.000		12.000
Penetração de trabalho (ae) [mm]	0,4					
Velocidade de corte (Vc) [m/min]	50,27			50,27		15,08
Número de dentes	2		4	2		4
Avanço por dente [mm/dente]	0,01		0,005	0,0075	0,01	0,005
Avanço (Vf) [mm/min]	800			600	800	240
Profundidade de corte (ap) [mm]	0,04			0,01	0,008	0,06
Taxa de remoção de material (TRM) [mm³/min]	12,8			2,4	2,56	5,76

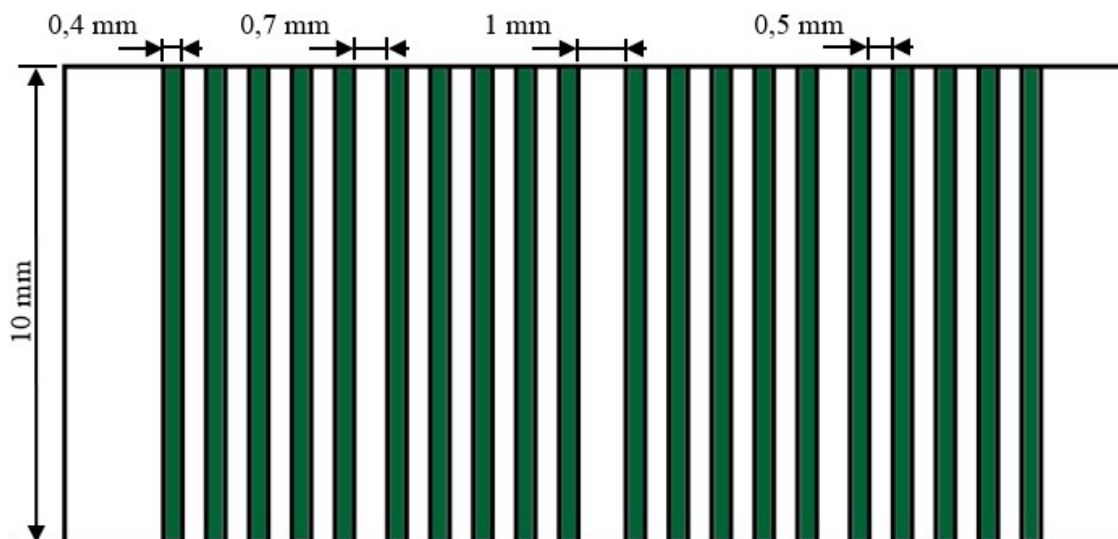


Figura 3.16. Configuração experimental para os ensaios de microfresamento.

3.8 Medição do Desgaste das Microfresas

Antes de iniciar os ensaios, é fundamental verificar a condição das microferramentas. Para isso, todas as microfresas novas são examinadas no MEV. São

capturadas imagens da superfície secundária de folga (vista superior) para garantir que a ferramenta esteja em boas condições, evitando possíveis interferências nos resultados do processo de microfresamento.

Após a usinagem de todo o comprimento de 100 mm, as microfresas foram novamente analisadas no MEV, permitindo a captura de novas imagens. O desgaste de flanco foi determinado conforme a **Figura 3.17** por comparação direta de cada aresta com as imagens da microfresa nova, usando a mesma posição e ampliação. Utilizando o software Inkscape, foi possível medir o desgaste individual de cada aresta conforme a seção 2.4 desta tese.

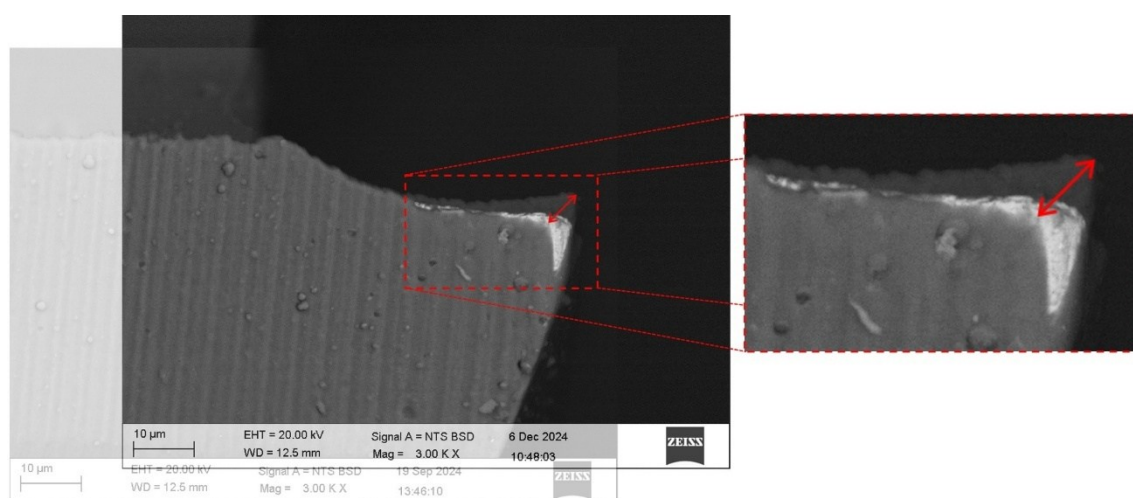


Figura 3.17. Desgaste de flanco medido na superfície secundária de folga da microfresa MS.

3.9 Medição de Rugosidade

Para avaliar a rugosidade superficial dos canais, foi utilizado um perfilômetro modelo Form Talysurf Intra, fabricado pela Taylor Hobson®, com resolução de 16 nm ao operar em um campo de 1,0 mm. O apalpador possui um raio de ponta de 2 µm. O equipamento foi montado sobre uma mesa inercial para minimizar vibrações externas que pudessem comprometer a precisão das medições. As medições foram realizadas em um ambiente com temperatura controlada a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. O apalpador foi inserido no interior do microcanal, deslocando-se perpendicularmente às marcas deixadas pelo avanço. A rugosidade foi medida em três partes do microcanal, divididas conforme entrada, meio e saída do caminho da microfresa no microcanal, fazendo três medições

aleatoriamente em cada parte. O esquema da divisão do microcanal em três partes está ilustrado na **Figura 3.18**. Na **Figura 3.19** observa-se uma foto da medição da rugosidade.

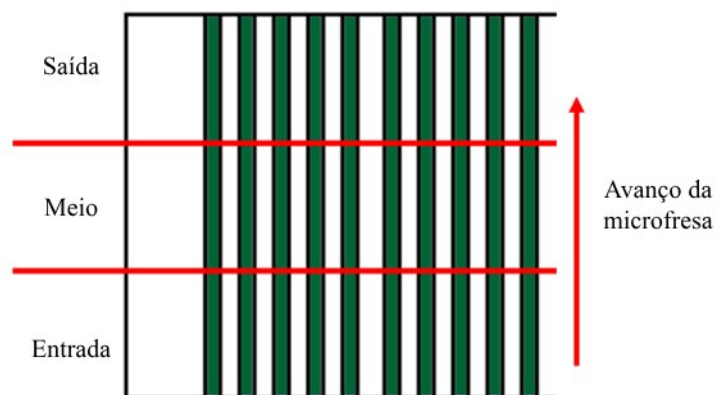


Figura 3.18. Divisão aproximada dos microcanais em três partes.

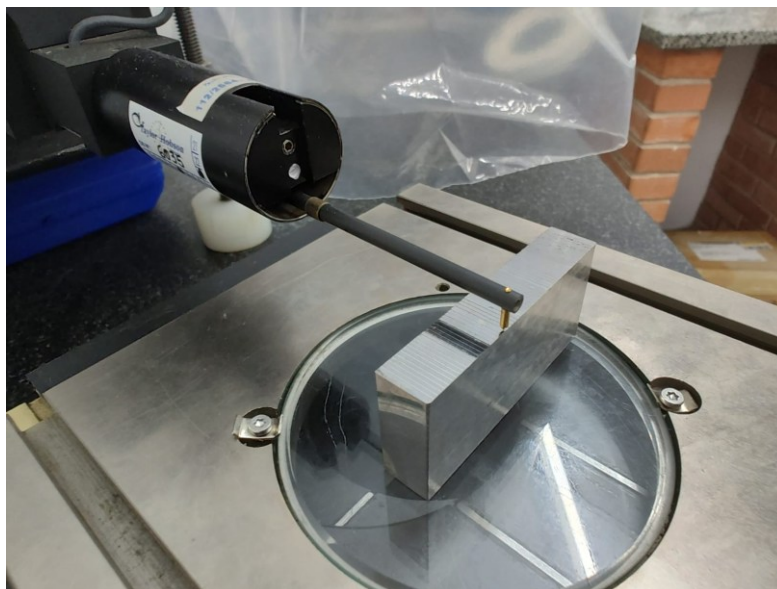


Figura 3.19. Medição da rugosidade na entrada de um canal.

Para a aquisição do perfil de rugosidade será seguida a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008), utilizando um comprimento de avaliação de 7 amostras. Desta forma, das 7 amostras, serão excluídas do perfil a primeira e a última amostra, resultando em um perfil de rugosidade com 5 amostras. Inicialmente será escolhido um comprimento de amostragem de 0,25 mm, resultando em um comprimento de avaliação de 1,75 mm e comparar o resultado R_a do perfil adquirido com a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008) para determinar se o resultado é válido ou se necessita mudar o cut-off e o comprimento de avaliação para uma nova aquisição.

3.10 Medição de Rebarbas

Para a avaliação de rebarbas foi usado a metodologia de análise de altura com um perfilômetro, conforme metodologia utilizada por Gomes (2022). A direção para a aquisição das alturas será perpendicular aos microcanais microfresados, conforme a **Figura 3.20**, tendo um comprimento de avaliação de 9,7 mm para percorrer todos os 10 microcanais gerados pelo processo de microfresamento de uma única microfresa. Foi utilizado a mesma divisão mostrada na **Figura 3.18** para esta aquisição, sendo feito também três medições aleatórias em cada parte.



Figura 3.20. Medição da altura das rebarbas.

3.11 Análise Qualitativa das Superfícies Microusinadas

Para avaliar a qualidade da superfície microusinada, além das análises previamente citadas, foram obtidas imagens no MEV de todos os microcanais produzidos. As imagens agregam às análises, mostrando as marcas deixadas pelo avanço das microfresas, bem como os tipos e a localização das rebarbas, com base nas classificações propostas na seção 2.5.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados do processo de microfresamento do aço ferramenta AISI H13, utilizando três microfresas de metal duro revestidas, mantendo-se constantes os parâmetros de corte em um primeiro instante e depois utilizando parâmetros definidos no catálogo (©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024). A apresentação dos resultados está organizada em quatro seções, nas quais são analisados e discutidos os seguintes aspectos: desgaste das microfresas, rugosidade, formação de rebarbas e acabamento superficial nos microcanais.

4.1 Desgaste da Microfresas

Esta seção apresenta o desgaste das microfresas após a usinagem de 100 mm, resultado da usinagem de 10 microcanais. Conforme descrito anteriormente, o desgaste foi avaliado com base na imagem do topo das microfresas. Além disso, serão apresentadas análises estatísticas para verificar se essa variação é significativa em termos de desgaste e para correlacionar as microfresas com os resultados obtidos nos ensaios.

Na **Figura 4.1** são exibidas imagens obtidas por MEV da superfície secundária de folga das microfresas empregadas no processo de microfresamento. São apresentadas tanto as imagens das ferramentas novas quanto aquelas após a usinagem de dez canais (com 10 mm de comprimento cada), incluindo os testes e suas respectivas réplicas. As ferramentas foram posicionadas de forma idêntica, ou seja, o lado direito das ferramentas novas corresponde ao lado direito das ferramentas desgastadas. Os ensaios receberam nomes de acordo com a **Tabela 3.6** mencionada no capítulo anterior, sendo feito uma nova sigla que começa abreviando o nome de cada microfresa: MS2MSD0040 (MS), VF2XLD0040N010 (VF) e VQXLD0040N010 (VQ), adicionando o número à direita que representa qual o teste que a microfresa foi utilizada (1 ou 2), para as réplicas será também adicionado um R de réplica ao lado direito deste número. No ensaio VQ2R, ocorreu a quebra da microfresa no meio do quinto canal, dessa forma não há imagens da microfresa desgastada.

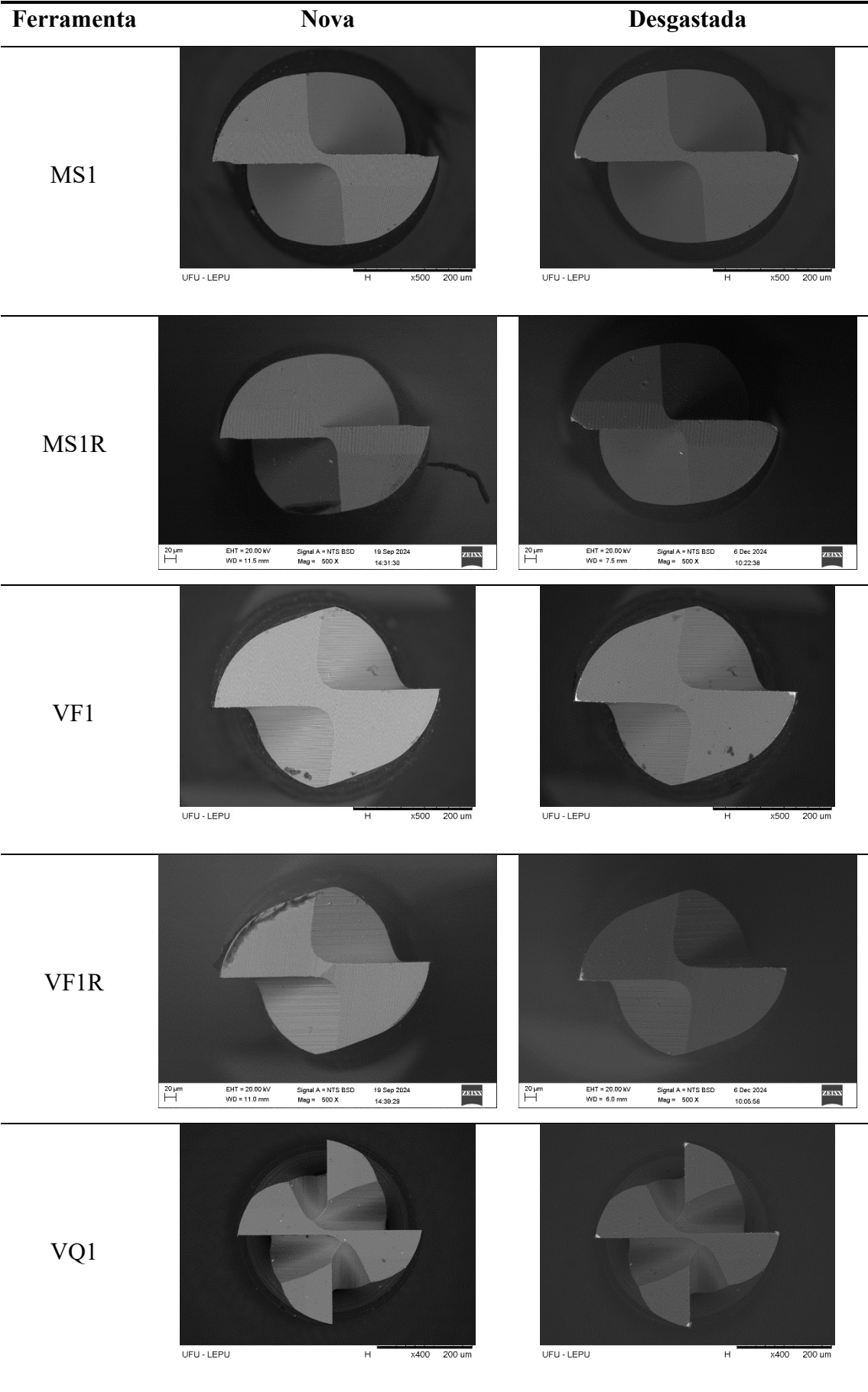


Figura 4.1. Imagens da superfície secundária de folga das microfresas novas e desgastadas.

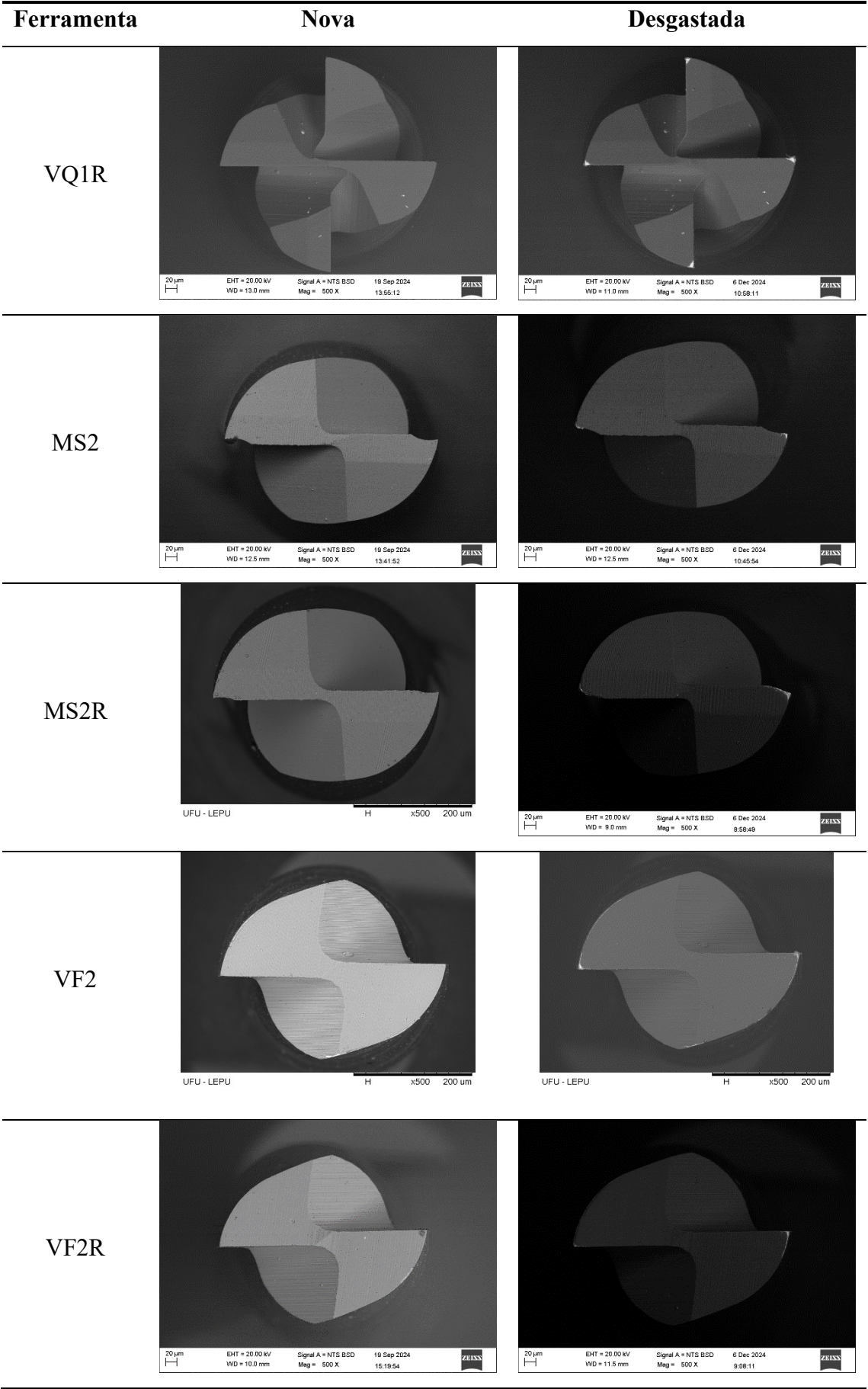


Figura 4.1. Imagens da superfície secundária de folga das microfresas novas e desgastadas.

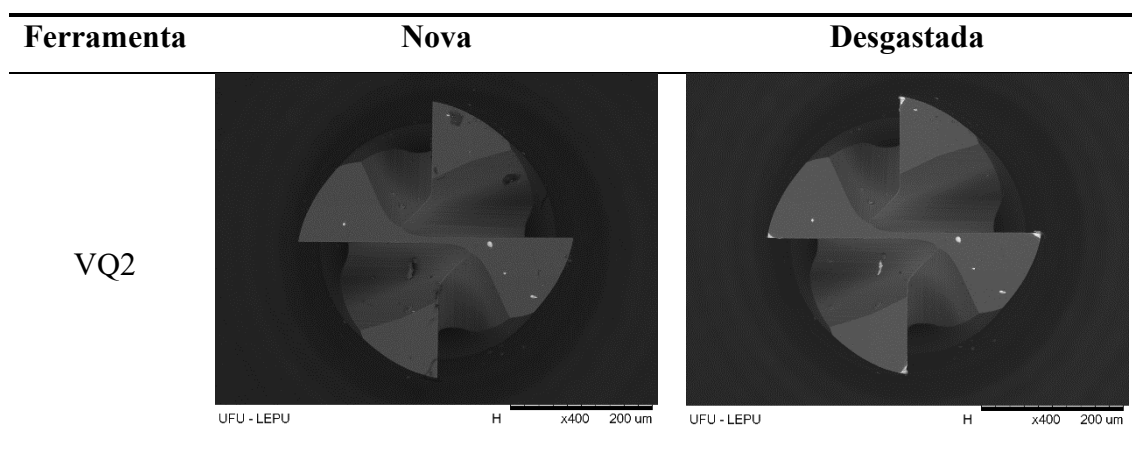


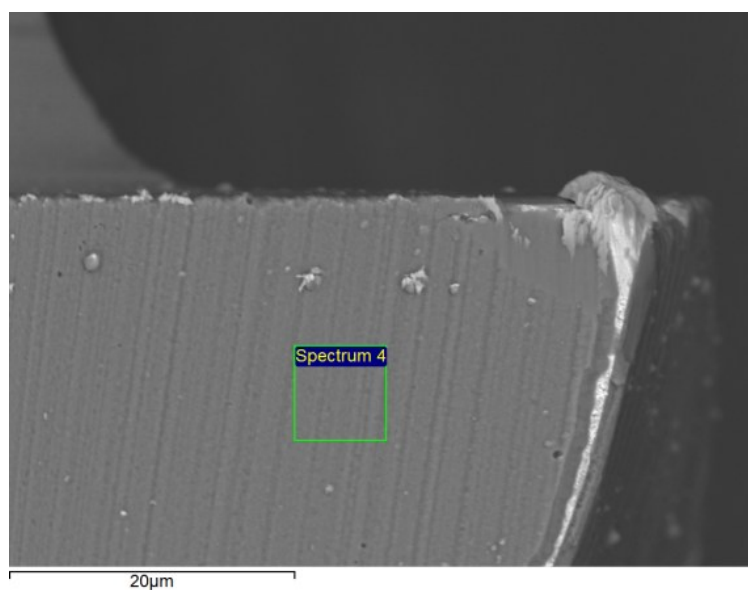
Figura 4.1. Imagens da superfície secundária de folga das microfresas novas e desgastadas.

No estudo dos mecanismos de desgaste, constatou-se que a adesão, também conhecida como *attrition*, é o mecanismo predominante após a remoção do revestimento, podendo também ser observado a presença de material aderido em algumas das arestas. Esse fenômeno ocorre quando o material da peça de trabalho adere à superfície da ferramenta, e, ao se desprender, provoca o arrancamento de fragmentos microscópicos da ferramenta, deixando a área com uma aparência áspera (Machado et al., 2015).

Outro mecanismo de desgaste observado foi a abrasão, porém somente no revestimento antes de ser totalmente removido. Esse processo consiste no desprendimento de material tanto da superfície da peça quanto da superfície da ferramenta através do *attrition* e essas partículas abrasivas entram no fluxo de material, sendo considerado o caso de “três corpos” e causam a deformação plástica e fratura frágil, formando sulcos paralelos nas superfícies (Machado et al., 2015). Como nos revestimentos há nitreto e no aço ferramenta AISI H13 carbono, podem ser formados óxidos, carbonetos, nitretos e carbonitretos como partículas abrasivas.

Para confirmar que o material aderido pertence à peça de trabalho e que há resquíio da peça de trabalho nas áreas desgastadas, foi realizada uma análise de composição química utilizando Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS), utilizando-a também no revestimento para comparação. O resultado dessa análise, apresentado nas **Figura 4.2** a **Figura 4.5**, demonstram que as composições químicas são compatíveis com a composição química das amostras da peça de trabalho descritas na seção 3.1. Isso confirma que o material aderido é, de fato, proveniente da peça usinada e há resquíios dela após o contato no microfresamento. Vale destacar que a análise EDS foi conduzida para todas as microferramentas utilizadas, e os resultados corroboram que

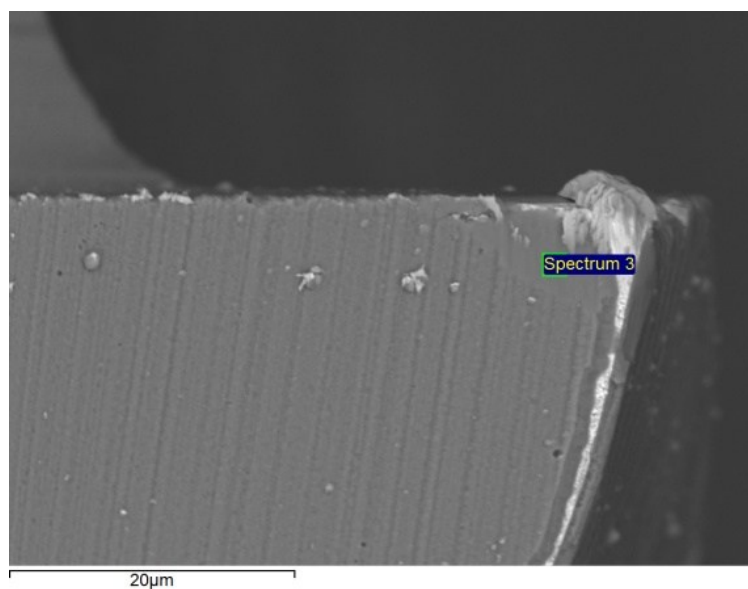
a composição química do material aderido e dos desgastes são consistentes com a da peça de trabalho.



Espectro 4 - Composição química em % de peso

C	N	O	Al	Si	Ti
34,531	51,462	3,940	4,636	0,644	4,787

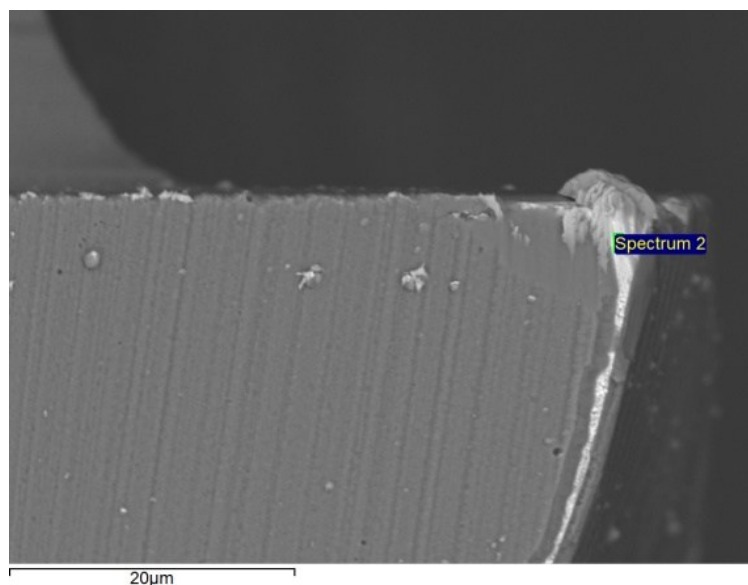
Figura 4.2. Composição química do revestimento da microfresa VF2.



Espectro 3 - Composição química em % de peso

C	N	O	Al	Si	Ti	Fe	Mo	W
31,080	35,473	8,001	9,017	1,012	13,272	0,985	0,257	0,904

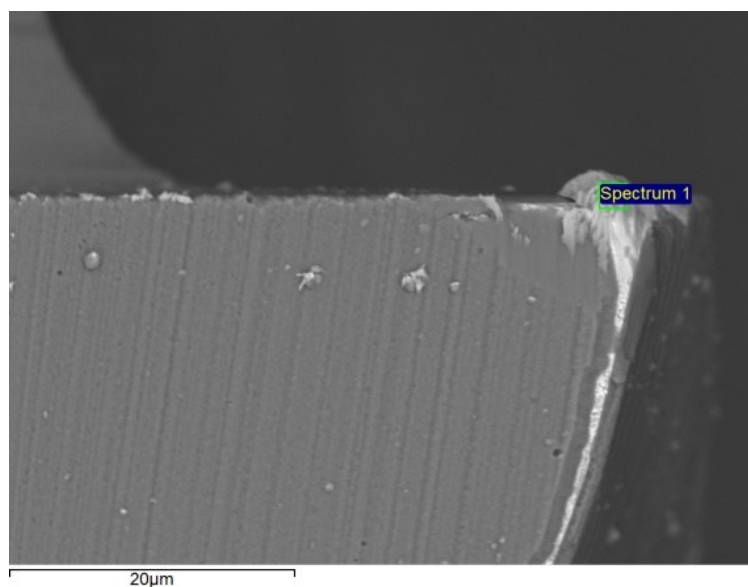
Figura 4.3. Composição química do desgaste por abrasão da microfresa VF2.



Espectro 2 - Composição química em % de peso

C	N	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Co	W
42,756	37,945	6,877	4,300	0,802	5,607	0,459	0,623	0,470	0,161

Figura 4.4. Composição química do desgaste por adesão da microfresa VF2.



Espectro 1 - Composição química em % de peso

C	N	O	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Ni	W
26,825	48,801	1,330	4,993	0,451	9,100	0,459	3,121	0,339	4,580

Figura 4.5. Composição química do material aderido na microfresa VF2.

Em relação à formação da aresta postiça de corte (APC), não existem estudos específicos na microusinagem que comprovem que o material aderido na microfresa

corresponde, de fato, à APC, apesar de muitos trabalhos relatarem a ocorrência desse fenômeno (Gomes, 2019). A análise dessa formação ainda é limitada devido às dimensões reduzidas envolvidas no processo de microusinagem, o que dificulta, por exemplo, a aplicação de técnicas como o *QuickStop* (Santos, 2020).

Na **Figura 4.6**, observa-se o desgaste das microfresas, sendo cada amostra o desgaste de uma aresta e utilizando das réplicas de testes para o aumento das amostras, sendo incluído um IC de 95 % para cada microfresa que também pode ser visto na **Tabela 4.1**.

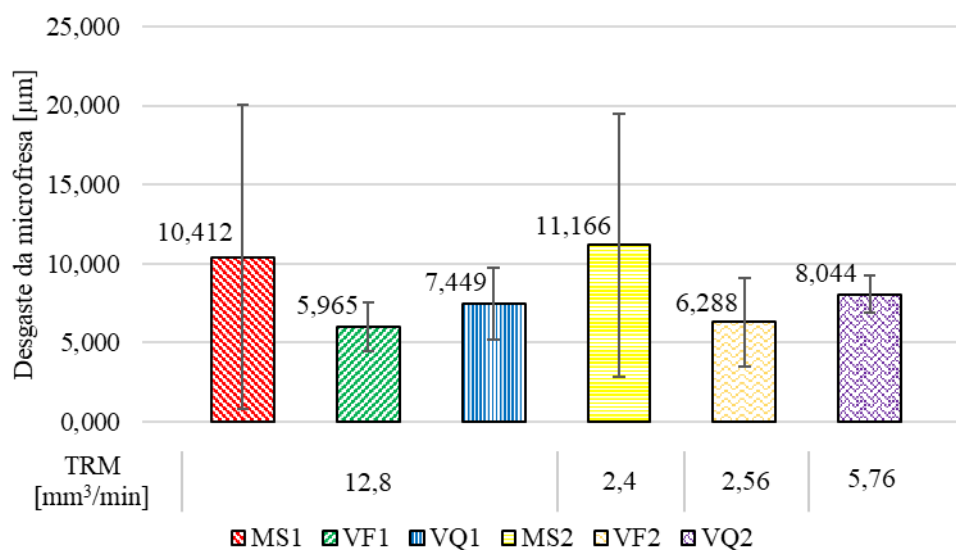


Figura 4.6. Desgaste das microfresas.

Tabela 4.1. Intervalo de confiança de 95 % para o desgaste de cada microfresa.

Teste	Microfresa	IC de 95 % [μm]
1	MS	[0,779; 20,045]
	VF	[4,405; 7,525]
	VQ	[5,178; 9,720]
2	MS	[2,845; 19,487]
	VF	[3,496; 9,080]
	VQ	[6,881; 9,207]

Utilizando um nível de significância α de 0,05, analisando em duplas na distribuição t de Student, não se tem confiança o suficiente para afirmar que o desgaste

de cada microfresa é diferente entre si. Entretanto destaca-se o alto valor do IC para ambos os testes na microfresa MS, nota-se que o pior caso possível para ela possui um desgaste maior que o dobro em relação às outras duas microfresas.

Para a microfresa MS, o alto intervalo de confiança se deve pelo alto desgaste que algumas arestas sofreram no microfresamento, representando os maiores valores, enquanto em outras pôde ser observado material aderido nelas, protegendo a aresta e dificultando a medição do desgaste, representando os menores valores obtidos.

Quanto as outras microfresas VF e VQ, ambas foram projetadas com geometrias reforçadas (maior ângulo de cunha, sendo elas 24,85 % e 21,69 % maiores que a MS respectivamente) e revestimentos diferentes (maiores durezas, sendo elas 32,14 % e 10,71 % maiores que a da MS) com o intuito de aumentar a vida da ferramenta ©MITSUBISHI MATERIALS Corporation, 2024), podendo notar um menor intervalo de confiança em relação à MS2MS0040. Apesar da diferença da TRM entre ambos os testes, este não foi um fator que resultou em diferença no desgaste da ferramenta.

No Teste 2, a microfresa VQ quebrou no meio do quinto canal, isso se deve, provavelmente, por dois fatores, sua geometria com 4 arestas, tendo um menor espaço para a eliminação de cavaco e o parâmetro de profundidade de corte. Ao ser comparado os 2 testes dessa mesma microfresa, no Teste 1 que não houve quebra, tendo uma profundidade de corte de 0,04 mm, enquanto no Teste 2 de 0,06 mm, um aumento de 50 %, dessa forma, o fluido de corte pode ter tido dificuldades em entrar no canal e auxiliar na remoção do cavaco. Investigações em cima desta questão podem ser feitas em futuros trabalhos.

4.2 Rugosidade

O acabamento superficial é um requisito fundamental para que peças microfresadas cumpram sua função de maneira eficiente. A rugosidade dos microcanais está diretamente vinculada a diversos fatores, como as características das microferramentas, a precisão da máquina-ferramenta, os parâmetros de corte e as condições de lubrificação.

Entre os parâmetros relacionados à amplitude, o desvio aritmético médio (R_a) é amplamente utilizado, principalmente no controle de processos. Alterações no valor de R_a indicam mudanças no processo, como o desgaste da ferramenta (Mummery, 1992;

Machado et al., 2015). Já o parâmetro desvio quadrático médio (R_q) tem a função de acentuar os valores de picos e vales, facilitando a identificação de defeitos ou marcas em superfícies com acabamento refinado (Machado et al., 2015).

Nesta seção, são apresentados os valores de rugosidade R_a e R_q obtidos nos microcanais fresados para cada microfresa e condição de corte analisada. As médias dos valores experimentais estão ilustradas nas **Figura 4.7** e **Figura 4.8**. Essas figuras mostram, o comportamento das rugosidades R_a e R_q para cada microfresa e condição de corte ao longo do comprimento microfresado.



Figura 4.7. Rugosidades R_a e R_q para as 3 ferramentas no Teste 1.

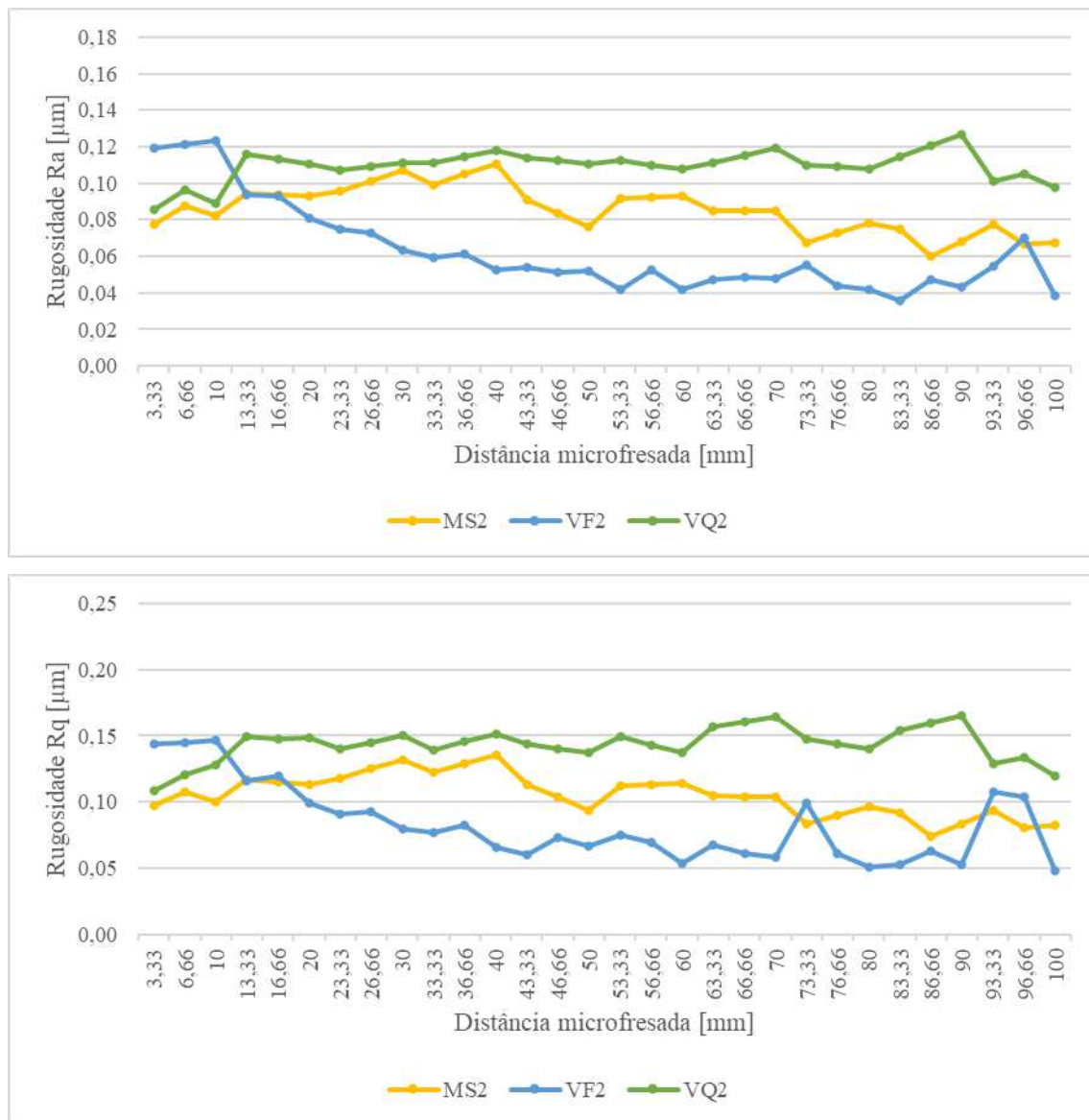


Figura 4.8. Rugosidades Ra e Rq para as 3 ferramentas no Teste 2.

Foi feita uma análise estatística através da distribuição F de Fisher-Snedecor, com o intuito de eliminar a variabilidade das variáveis (parâmetros de corte, geometrias das ferramentas, canais e divisão do canal), tornando possível a análise de seus efeitos nos resultados obtidos com um único teste tendo como base o somatório dos quadrados dos desvios de cada variável e utilizando um nível de significância α de 0,05, tanto na rugosidade Ra quanto na Rq. Desta forma, será determinado se a mudança das variáveis de entrada causa mudança nos resultados das rugosidades obtidas.

Os resultados da análise sugerem que:

- Em relação a Ra, as divisões (entrada, meio e saída) e os canais são diferentes entre si e resultam em rugosidades diferentes. Apenas para as

microfresas MS e VQ no Teste 2 que não há diferença entre as divisões. Em relação a R_q a única diferença foi que para a microfresa VQ no Teste 1, também não há diferença entre as divisões.

- Para ambos os Testes, 1 e 2, a mudança de geometria entre as microfresas causam mudança nas rugosidades obtidas.
- Na microfresa MS, ao compará-la em condições de corte diferentes, obtém-se rugosidades diferentes.
- Na microfresa VF, ao compará-la em condições de corte diferentes, não se obtém rugosidades diferentes.
- Na microfresa VQ, ao compará-la em condições de corte diferentes, obtém-se rugosidades diferentes.

Nota-se que dos 6 experimentos, em 4 houve a redução das rugosidades R_a e R_q conforme o comprimento microfresado, enquanto em 2 houve o aumento e uma delas caiu no meio no microfresamento.

Em relação às divisões nos canais, presume-se que na entrada há maior força atuando na ferramenta, gerando vibrações que conforme o microfresamento avança, a ferramenta se acomode ao processo devido ao desgaste e menor força atuante e no final com menor volume de material a ser fresado diminua novamente a força atuante, ocorrendo uma diminuição de vibrações ao longo do processo entre a entrada e final dos canais.

A diferença de rugosidades nos testes da MS, tem como principais causas seriam a diminuição do avanço por dente e da profundidade de corte, gerando menores sulcos e possuindo menor volume de material a ser removido, tendo uma menor força atuante na ferramenta, gerando menos vibrações.

Em relação ao Teste 2 da microfresa VQ, foi observado nos microcanais sulcos formados nas marcas de avanço da microfresa (indicado por seta vermelha), materiais aderidos na superfície dos microcanais (indicado por círculo vermelho) e regiões de destacamento (indicado por círculo amarelo), podendo serem vistos na **Figura 4.9**, fatos que corroboram com a ideia previamente explicada na seção 4.1 de que neste experimento provavelmente o fluido de corte não conseguiu chegar de forma efetiva no contato da microfresa com a peça para a lubrificação do processo e eliminação de cavacos, causando este aumento nas rugosidades R_a e R_q .

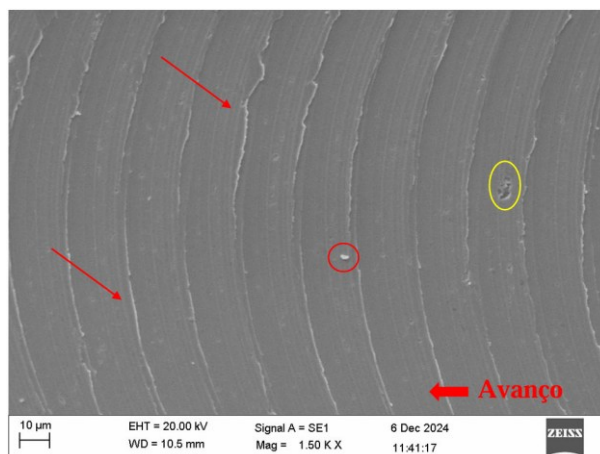


Figura 4.9. Superfície de um microcanal do Teste 2 da microfresa VQ.

Em relação aos experimentos que ocorreram a diminuição das rugosidades, estima-se que, ao contrário do experimento anterior, o fluido de corte foi efetivo na lubrificação e remoção de cavaco, foi encontrado nas superfícies dos micronais material aderido (indicados por um círculo amarelo) e regiões de destacamento (indicados por um círculo amarelo), podendo ser visto na **Figura 4.10**. Além disso, conforme ocorre o microfresamento, a microfresa desgasta e se estabiliza ao processo, suavizando o contato entre a microfresa e a peça.

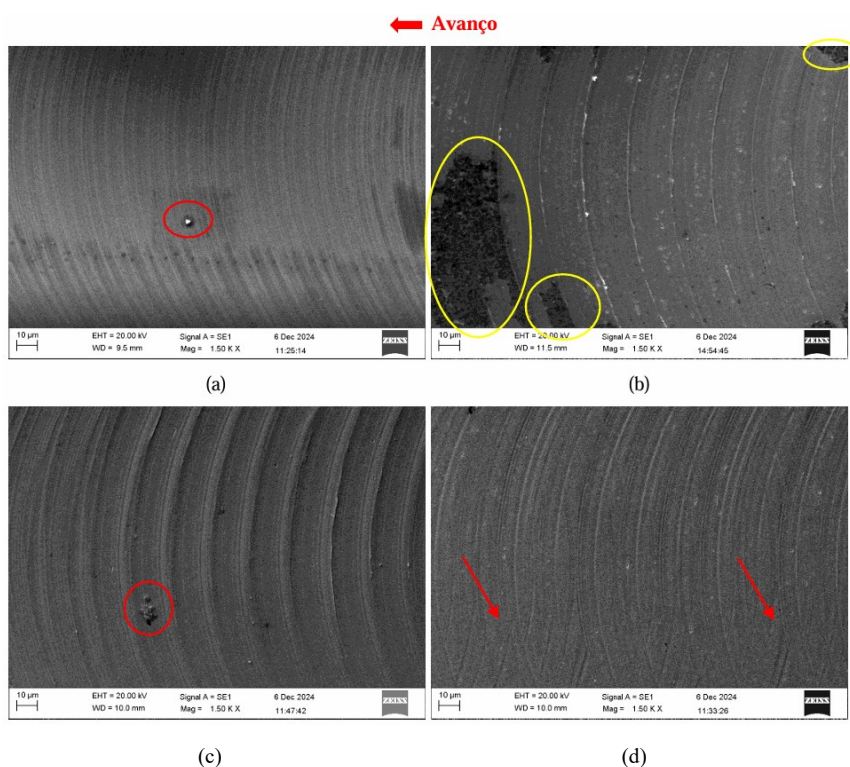


Figura 4.10. Superfície dos microcanais dos seguintes experimentos: (a) Teste 1 MS, (b) Teste 1 VF, (c) Teste 1 VQ, (d) Teste 2 VF.

Ainda na **Figura 4.10d**, observa-se marcas de avanço do período inativo (indicados por uma seta vermelha). Isso pode melhorar o acabamento superficial e diminuição das rugosidades. Essas marcações também podem ser vistas no Teste 2 da microfresa MS na **Figura 4.11** (indicados por uma seta vermelha), podendo ser relacionada ao Teste 2 da microfresa VF através da taxa de remoção de material de ambas serem as mais baixas dos experimentos e terem resultados menores de rugosidades Ra e Rq quando comparadas com suas respectivas microfresas no Teste 1. Tal resultado pode ser mais bem estudado para melhor correlação em conjunto com força, pois com menor volume a ser removido, menor será a força imposta sobre a microfresa.

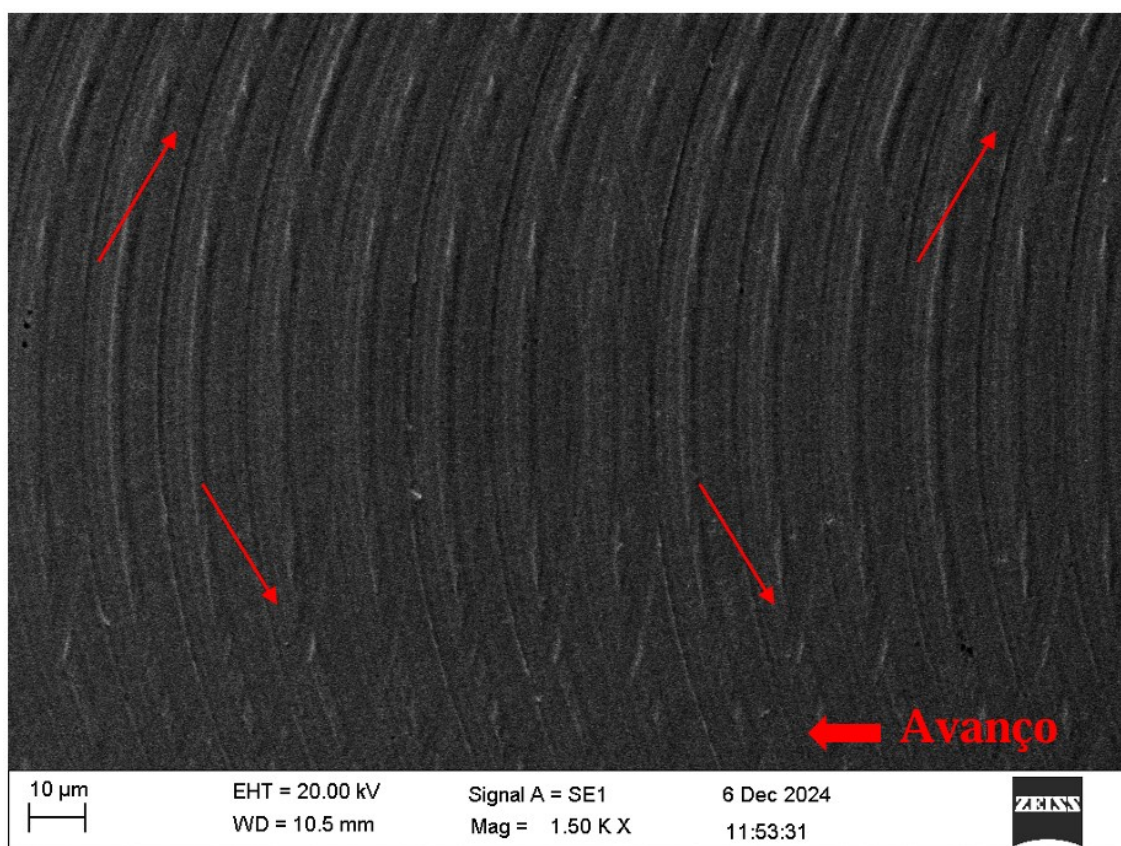


Figura 4.11. Superfície de um microcanal do Teste 2 da microfresa MS.

Por fim, na **Figura 4.12**, tem-se os resultados das rugosidades Ra e Rq, formadas pela média das rugosidades em cada experimento juntamente com o intervalo de confiança de 95 % afim de determinar qual obteve as menores rugosidades.

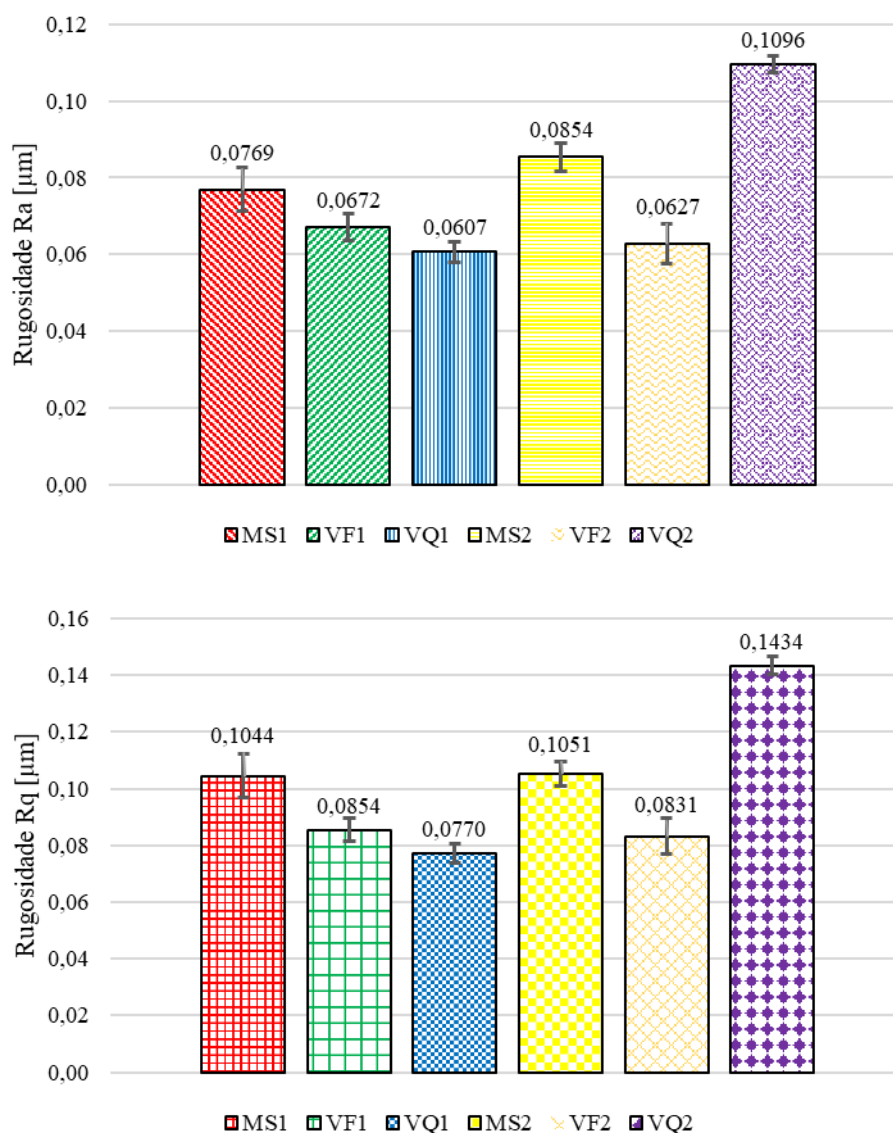


Figura 4.12. Resultados das rugosidades Ra e Rq para cada experimento.

Observa-se que o experimento de Teste 1 com a microfresa VQ obteve as menores rugosidades médias em Ra e Rq. Com um nível de significância α de 0,05, fez a comparação então entre os 2 experimentos com menores rugosidades Ra e Rq na distribuição F de Fisher-Snedecor, obtendo como resultado, não ter diferença entre os resultados de Ra, porém há diferença nos resultados de Rq. Desta forma, dentre os experimentos apresentados, a microfresa VQ com os parâmetros de corte do Teste 1 demonstra ser mais eficiente para se obter um melhor acabamento superficial quanto à rugosidade. Entretanto, quanto ao custo-benefício, a microfresa VF possui melhor desempenho.

4.3 Formação de Rebarbas

Nesta seção, serão exibidos os resultados referentes à formação de rebarba de topo no canal microfresado (10 mm), além da média geral obtida para cada uma das microfresas utilizadas. Conforme mencionado previamente, a medição da altura da rebarba (concordante e discordante) foi realizada em nove diferentes pontos do canal.

As **Figura 4.13** a **Figura 4.18** apresentam o comportamento das alturas das rebarbas discordante e concordante em função do comprimento de usinagem para cada microfresa. Os resultados exibem a média calculada dos valores experimentais, acompanhadas do intervalo de confiança de 95 %.

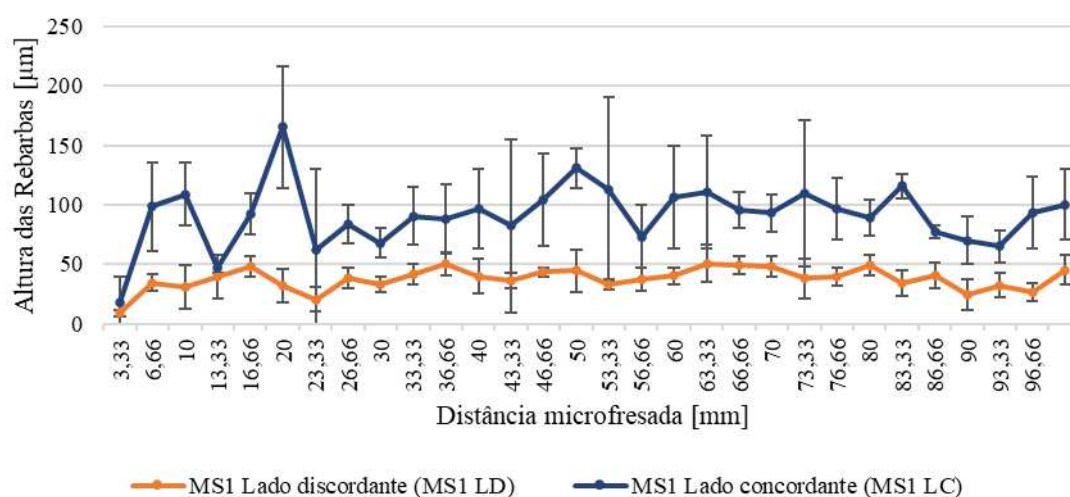


Figura 4.13. Altura das rebarbas para a microfresa MS no Teste 1.

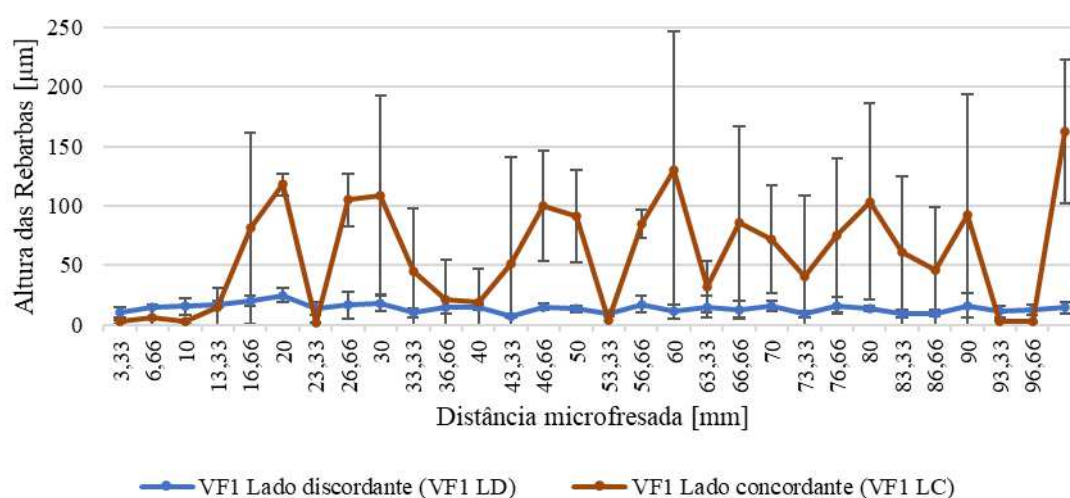


Figura 4.14. Altura das rebarbas para a microfresa VF no Teste 1.

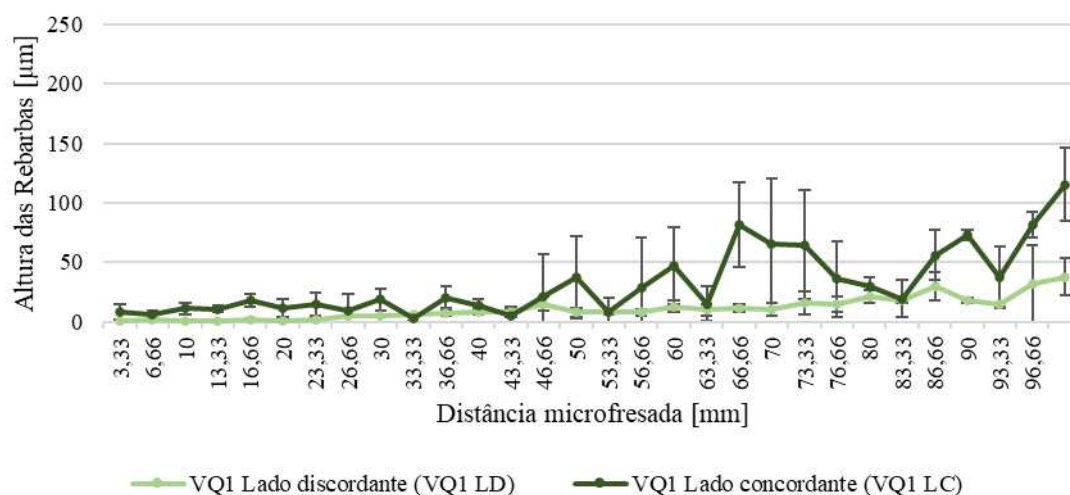


Figura 4.15. Altura das rebarbas para a microfresa VQ no Teste 1.

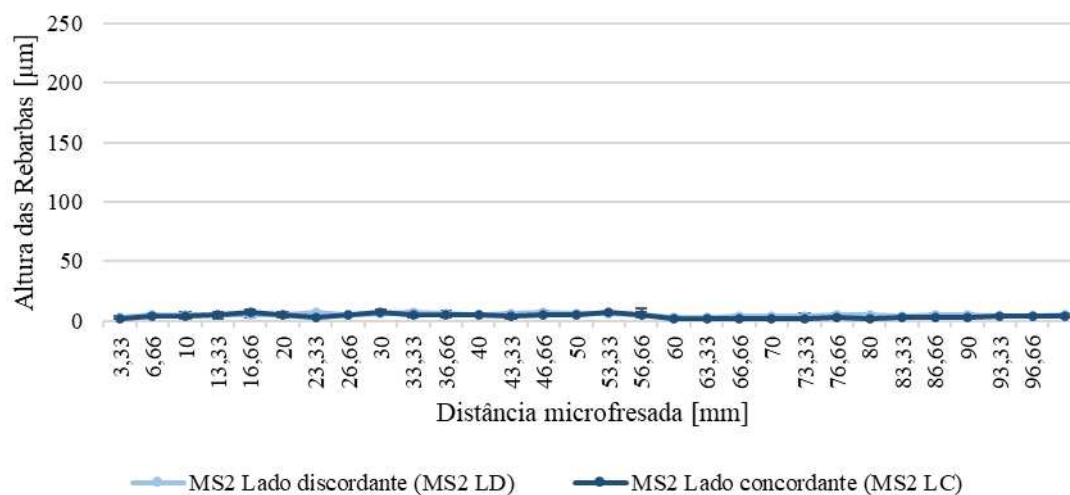


Figura 4.16. Altura das rebarbas para a microfresa MS no Teste 2.

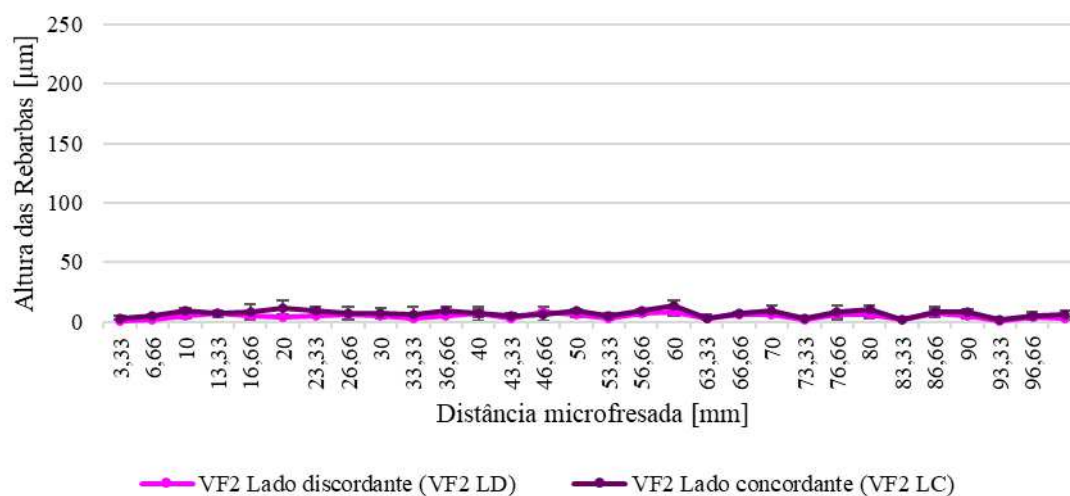


Figura 4.17. Altura das rebarbas para a microfresa VF no Teste 2.

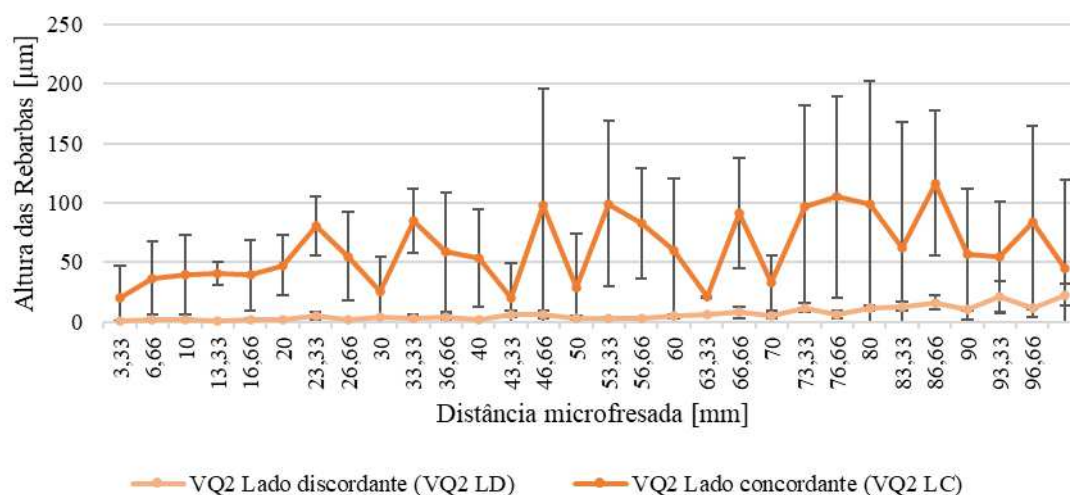


Figura 4.18. Altura das rebarbas para a microfresa VQ no Teste 2.

Ao comparar o fresamento discordante com o concordante, é evidente, que as rebarbas do lado concordante são maiores. De acordo com Queiroz (2022), isso se deve pela cinemática do corte em ambos os fresamentos. No fresamento discordante, no início do corte a espessura do cavaco não deformado é zero, sendo comprimido e empurrado conforme se aumenta a espessura, com isso, o efeito do suporte do material que ainda será microfresado também aumenta, ocorrendo então o cisalhamento do material. No fresamento concordante se inverte a espessura do cavaco deformado ao longo do microfresamento em relação ao fresamento discordante, sendo menor o efeito de suporte do material não microfresado, não ocorrendo o cisalhamento, empurrando o material na direção de menor resistência, sendo essa a parte superior do canal. Adicionalmente, a direção da força e tensão para o cisalhamento com fresamento discordante é direcionada para longe da parede lateral, contribuindo também para a redução da formação de rebarbas.

Observou-se nas **Figura 4.13** a **Figura 4.18** que em todos os experimentos há uma inconsistência na formação de rebarbas, não sendo contínuo, sendo representado pelos picos e vales e pelos altos valores dos intervalos de confiança de 95 % existentes nos fresamentos concordantes.

Nas **Figura 4.16** e **Figura 4.17**, há uma semelhança entre os dois fresamentos discordantes e concordantes, ocorrido pela baixa profundidade de corte, tendo uma diminuição da área de formação do cavaco e com isso haverá menos material a ser deformado conforme explicado anteriormente, formando rebarbas de menores altitudes.

Nota-se também o aumento gradual da formação de rebarbas nos experimentos, nos quais pode ser determinado em qual distância do microfresamento houve um aumento na altura das rebarbas, sendo ela diferente para cada experimento, conforme mostrado na **Tabela 4.2**. Desta forma, este aumento pode ser considerado um fator para o critério de fim de vida de uma microfresa.

Tabela 4.2. Distância microfresada para o aumento da altura das rebarbas.

Ferramenta	Distância microfresada [μm]
MS1	6,66
VF1	16,66
VQ1	46,66
MS2	6,66
VF2	10
VQ2	23,33

Por fim, foi feito uma análise estatística através da distribuição F de Fisher-Snedecor com nível de significância α de 0,05, para as alturas de rebarbas. Desta forma, será determinado se a mudança das variáveis: parâmetros de corte, geometria das microfresas, canais e divisão dos canais (entrada, meio e saída) mudam também os resultados obtidos para a altura das rebarbas.

Os resultados da análise sugerem que:

- Em todos os experimentos, analisados separadamente, há diferença entre os fresamentos discordantes e concordantes.
- Para as divisões, só não há diferença entre si nos experimentos de Teste 2 nas microfresas MS e VQ. Enquanto para os canais, não há diferença entre elas apenas no experimento de Teste 2 na microfresa VQ.
- Na microfresa MS, ao compará-la em condições de corte diferentes, tem-se que a diferença de parâmetros resulta em diferentes alturas de rebarbas.
- Na microfresa VF, ao compará-la em condições de corte diferentes, tem-se que a diferença de parâmetros resulta em diferentes alturas de rebarbas.
- Na microfresa VQ, ao compará-la em condições de corte diferentes, tem-se que a diferença de parâmetros resulta em diferentes alturas de rebarbas.

- Comparando as geometrias das microfresas entre si em ambos os Testes 1 e 2, obtém-se que a diferença de geometria causa diferença nos resultados para a altura das rebarbas.

Na **Figura 4.19**, tem-se os resultados das alturas das rebarbas para cada experimento, formadas pela média de todas as amostras obtidas das alturas das rebarbas em cada experimento juntamente com o intervalo de confiança de 95 % afim de determinar qual obteve as menores alturas das rebarbas.

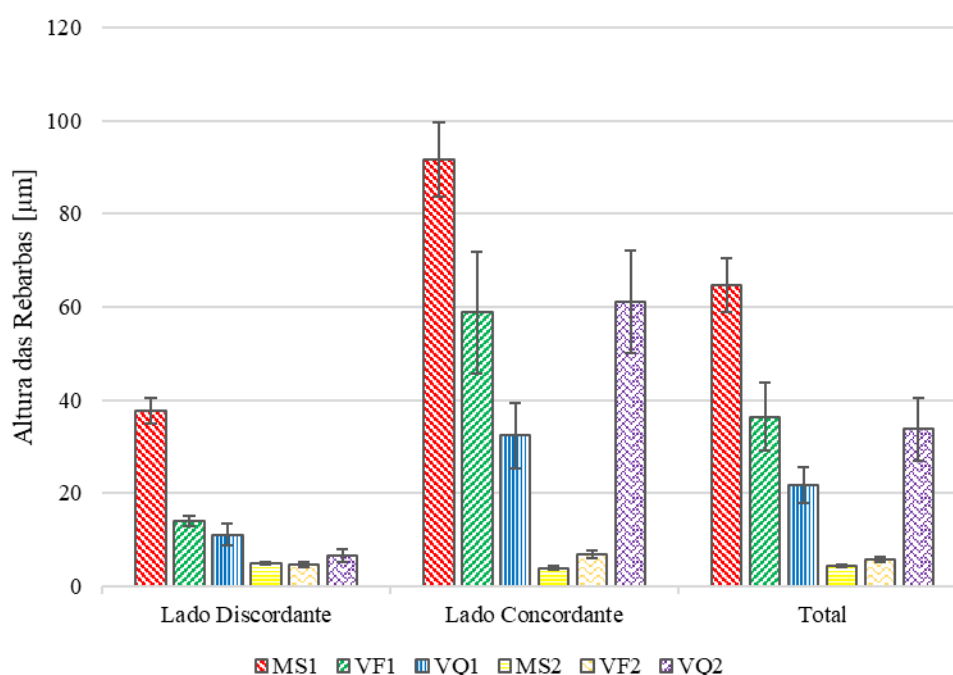


Figura 4.19. Resultados das alturas das rebarbas para todos os experimentos.

Observou-se na **Figura 4.19** que os dois experimentos com menores formações de rebarbas foram no Teste 2 as microfresas MS e VF, com a MS possuindo o menor valor total. Foi feito uma análise com nível de significância α de 0,05 na distribuição F de Fisher-Snedecor e foi determinado que há diferença entre os resultados obtidos. Desta forma a microfresa MS com os parâmetros de corte do Teste 2 é a combinação de melhor resultado para se obter menores formações de rebarbas quanto a sua altura em relação aos experimentos desta dissertação. Na **Tabela 4.2**, tem-se a microfresa VQ que possui em ambos os Testes 1 e 2, uma maior distância microfresada até o aumento da formação das rebarbas em relação aos outros experimentos, sendo interessante utilizá-la em trabalhos futuros para investigar ela com o parâmetro da profundidade de corte menor de 0,01 mm

e analisar sua formação de rebarbas. Como no Teste 1 que todas as microfresas estão nas mesmas condições de corte e a microfresa VQ apresentou menor formação de rebarba quanto à altura, há um potencial a ser investigado nessa questão.

Com estes resultados pode determinar que a profundidade de corte tem maior influência quanto às alturas das rebarbas e a geometria da microfresa tem maior influência na relação do surgimento das rebarbas com a distância microfresada.

Por fim será feito a análise quanto a classificação das rebarbas formadas em cada experimento, sendo mostradas nas **Figura 4.20** a **Figura 4.27**.

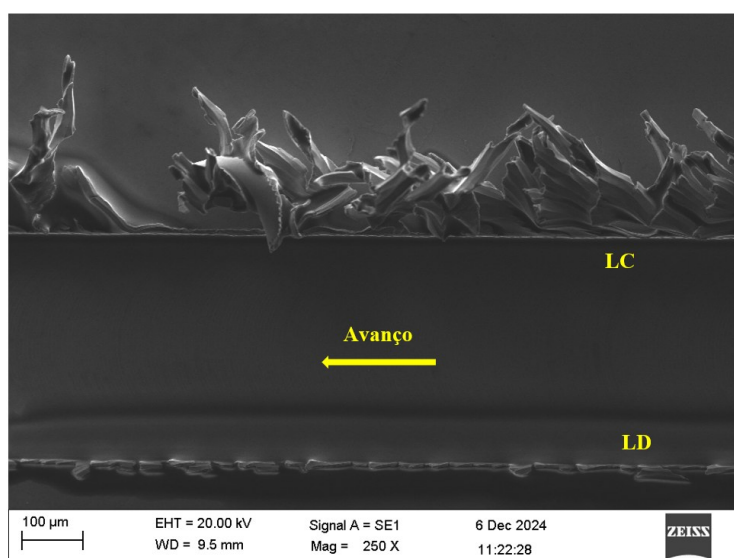


Figura 4.20. Rebarbas do tipo pena e menor no fresamento concordante e do tipo menor enrolado no fresamento discordante no Teste 1 da microfresa MS.

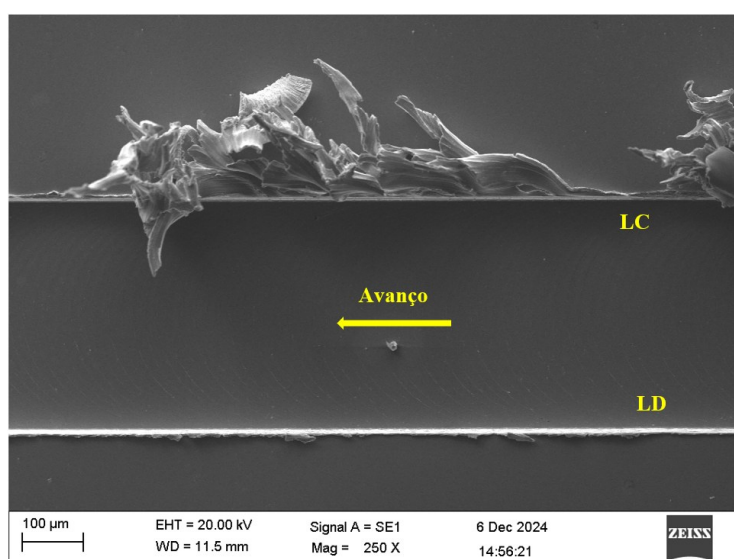


Figura 4.21. Rebarbas do tipo pena e menor no fresamento concordante e do tipo menor enrolado no fresamento discordante no Teste 1 da microfresa VF.

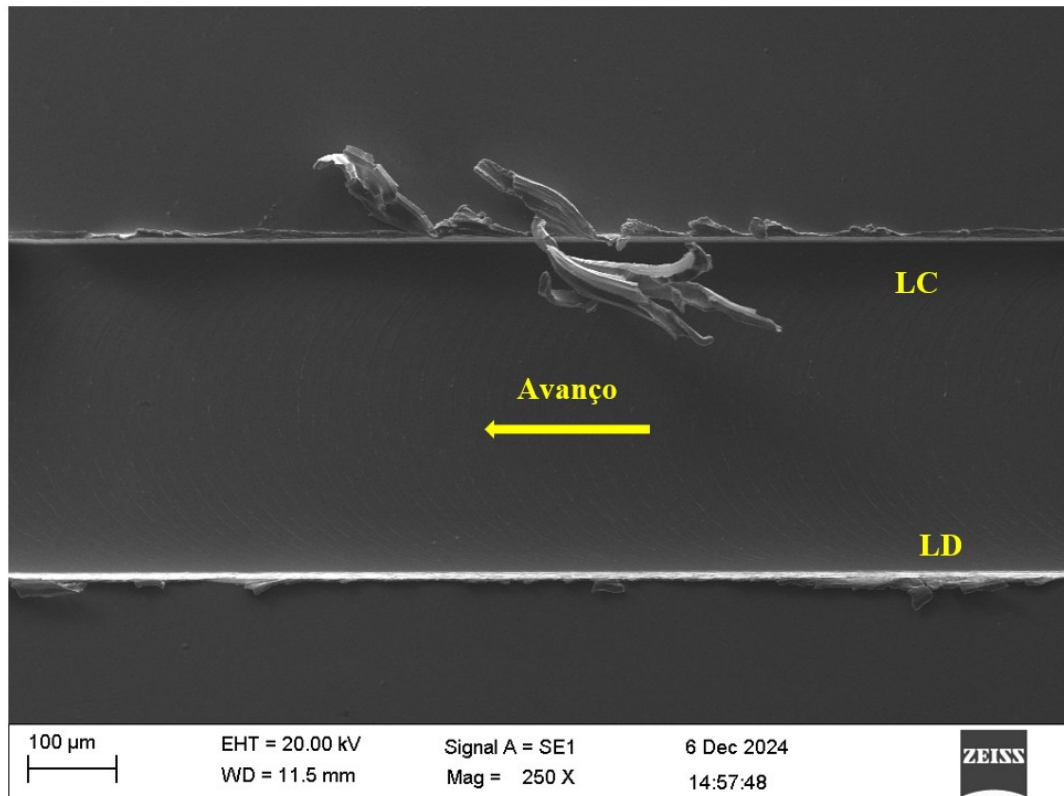


Figura 4.22. Rebarbas do tipo agulha no fresamento concordante e do tipo menor enrolado no fresamento discordante no Teste 1 da microfresa VF.

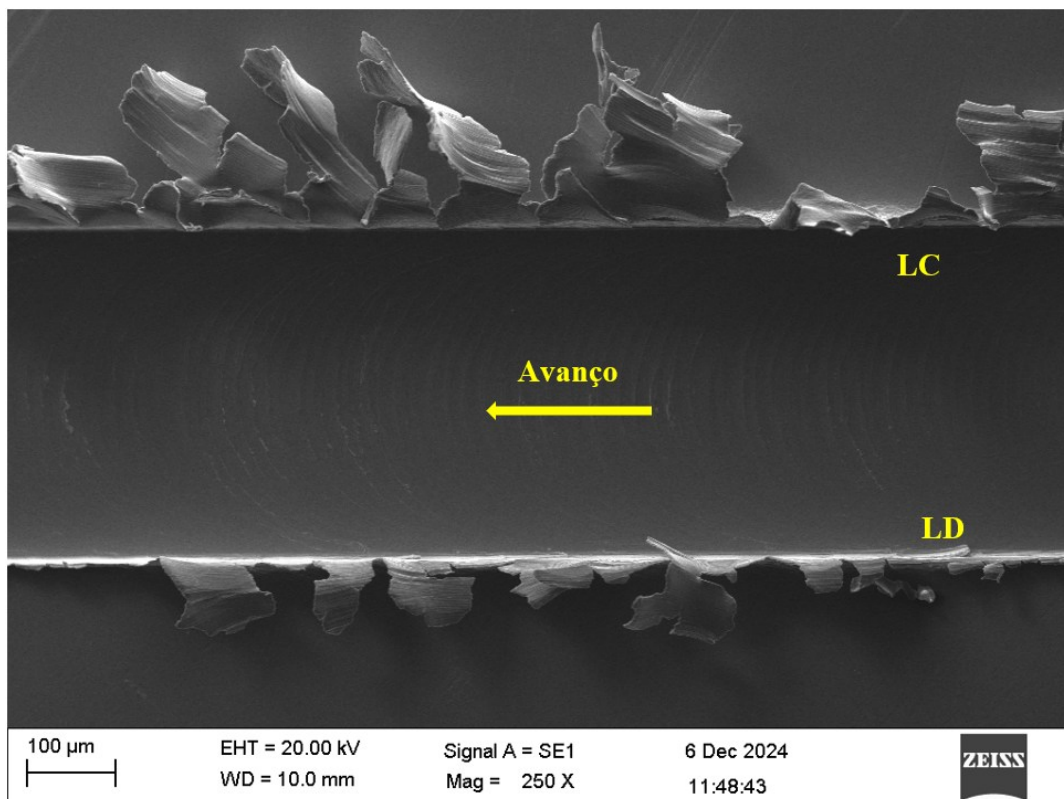


Figura 4.23. Rebarbas do tipo pena e primário no fresamento concordante e do tipo primário e menor no fresamento discordante no Teste 1 da microfresa VQ.

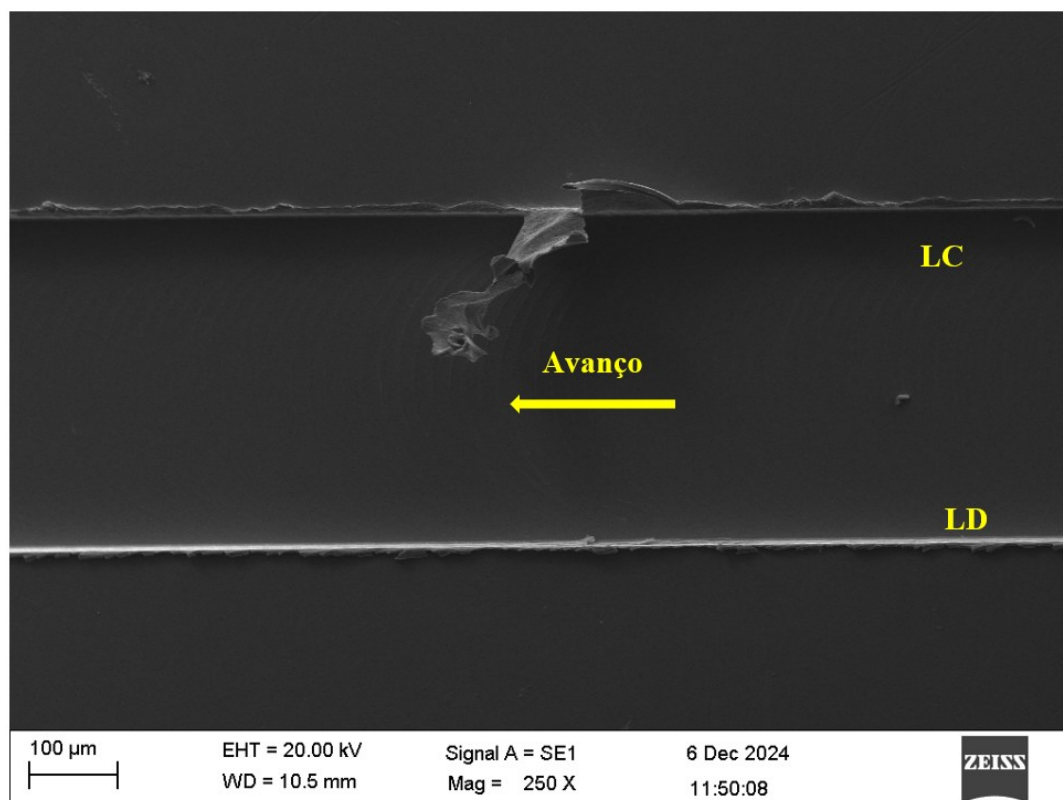


Figura 4.24. Rebarbas do tipo agulha no fresamento concordante e do tipo menor no fresamento discordante no Teste 1 da microfresa VQ.

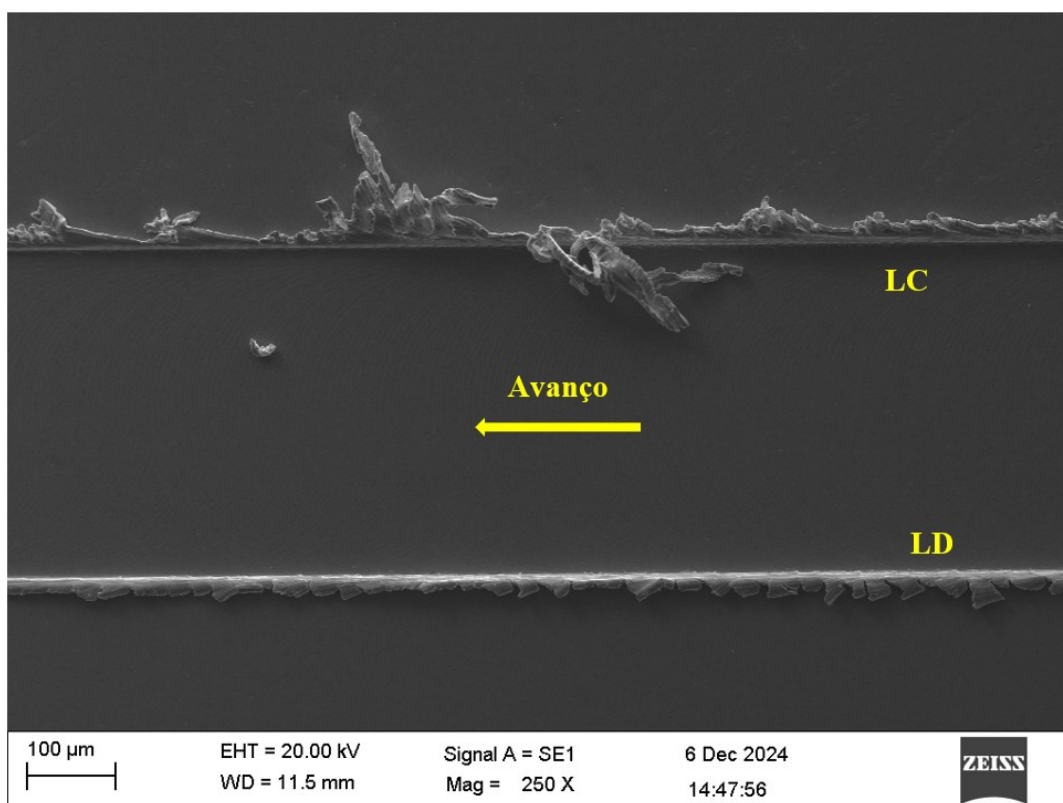


Figura 4.25. Rebarbas do tipo agulha e menor no fresamento concordante e do tipo menor enrolado no fresamento discordante no Teste 2 da microfresa MS.

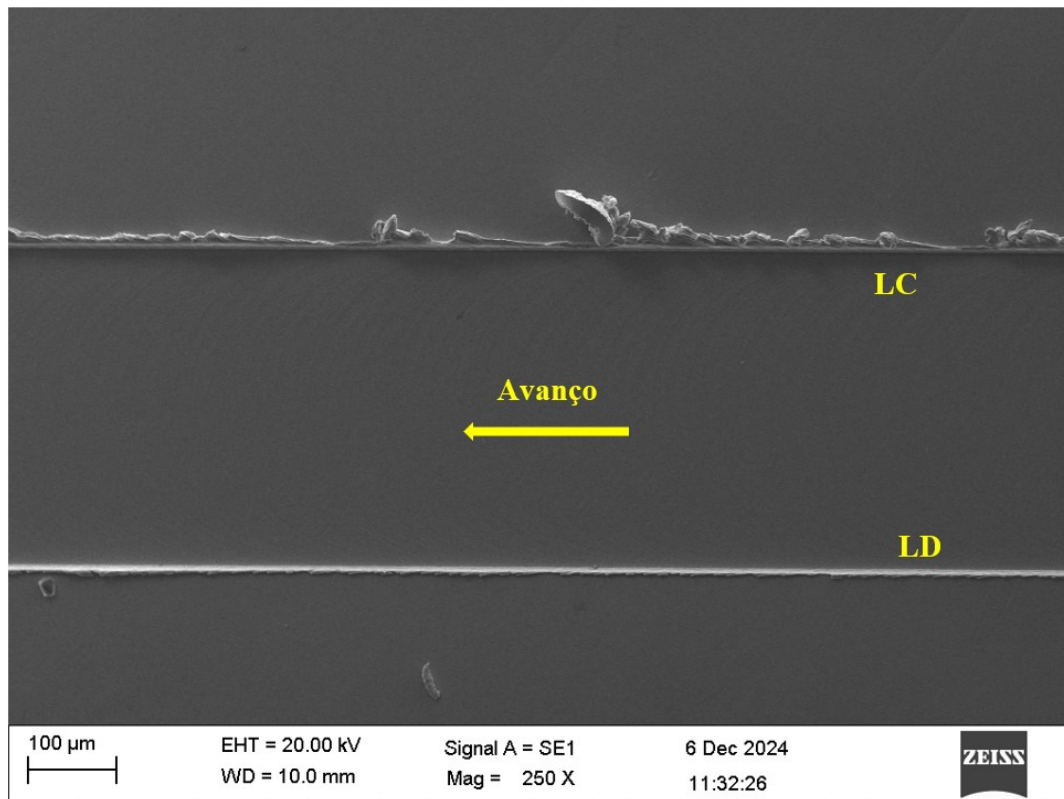


Figura 4.26. Rebarbas do tipo menor em ambos fresamento concordante e discordante no Teste 2 da microfresa VF.

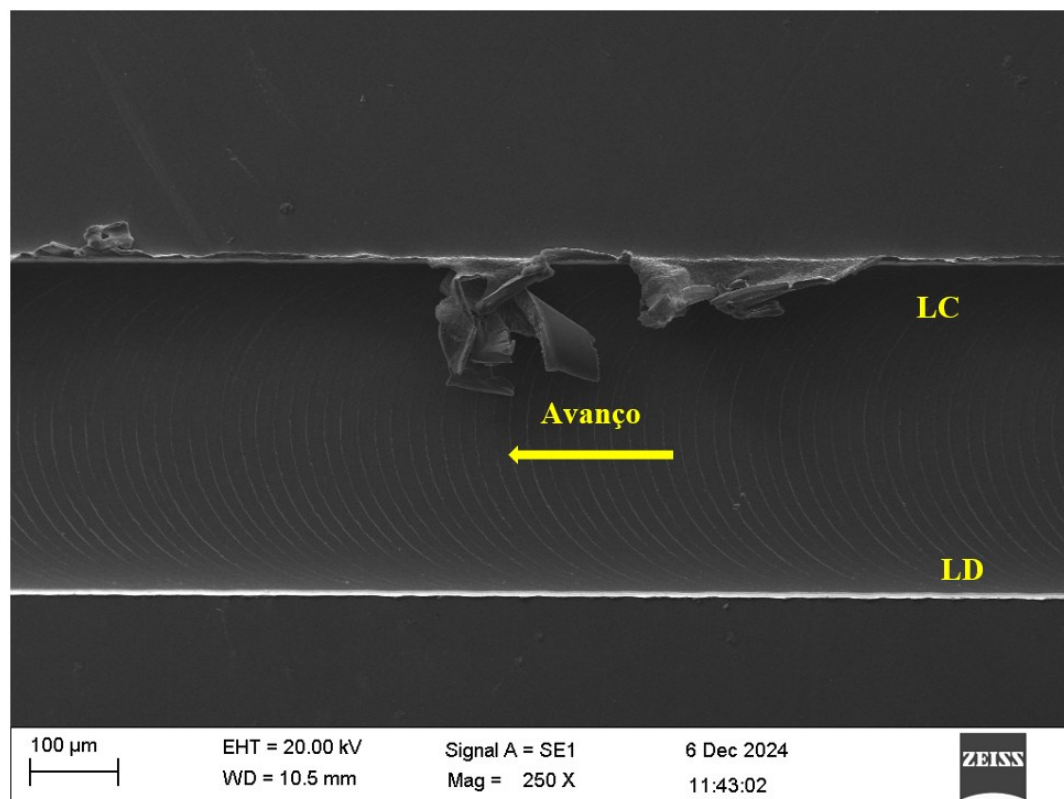


Figura 4.27. Rebarbas do tipo primário e menor no fresamento concordante e do tipo menor no fresamento discordante no Teste 2 da microfresa VQ.

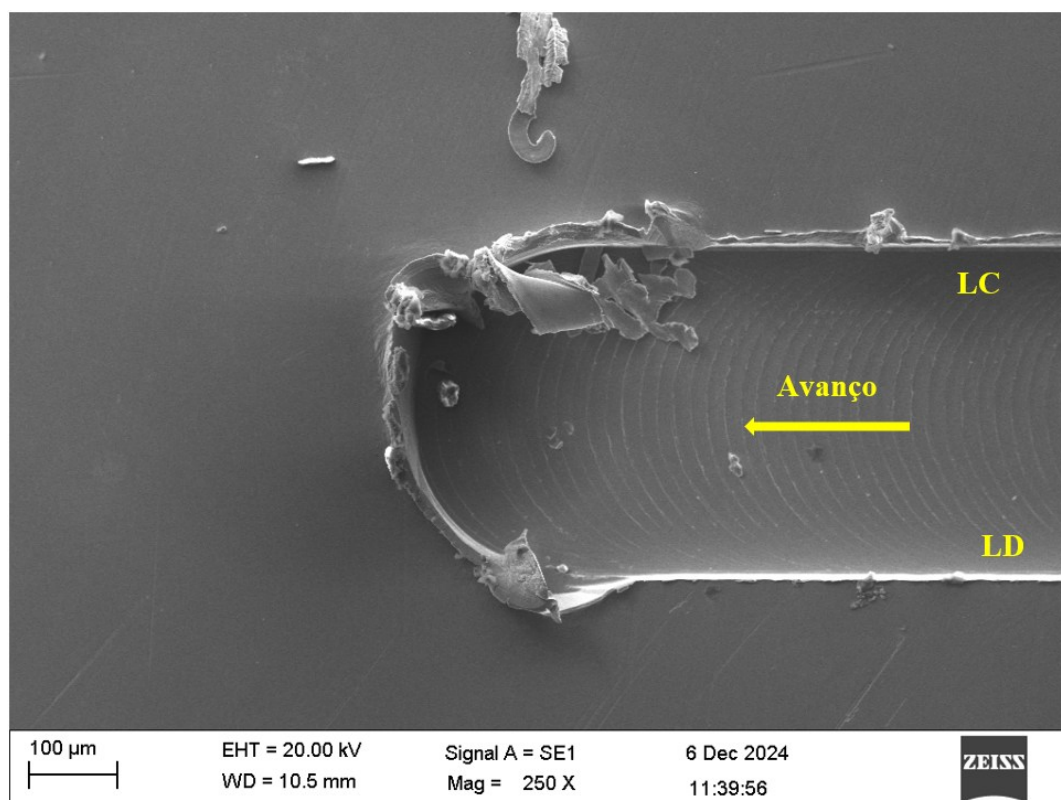


Figura 4.28. Momento em que a microfresa VQ quebrou no experimento de réplica no Teste 2.

Nota-se que há uma predominância nas rebarbas do tipo pena e agulha no fresamento concordante nos experimentos de Teste 1, enquanto nos de Teste 2 a formação de rebarba para cada um foi mais diversa, porém há também do tipo menor, representando a não continuidade das rebarbas em todos os experimentos.

Segundo Chern et al. (2007), a rebarba primária é gerada quando o material é deslocado e deformado plasticamente, sem que haja a formação de cavacos. Em situações de avanços e penetrações reduzidas, a fragmentação dessa rebarba primária pode resultar na formação de rebarbas menores. Já as rebarbas do tipo pena e agulha também surgem a partir do processo de fragmentação da rebarba primária, sendo a do tipo pena um aglomerado das do tipo agulha em sequência.

4.4 Síntese dos Resultados Obtidos

Na **Tabela 4.3** é mostrado o compilado dos resultados obtidos do desgaste, rugosidade R_a e altura das rebarbas para ambos os testes.

Tabela 4.3. Todos os resultados obtidos.

Ferramenta	TRM [mm ³ /min]	Desgaste [μm]	Rugosidade Ra [μm]	Altura das rebarbas no lado concordante [μm]
MS1	12,8	10,412 ± 9,633	0,0769 ± 0,0057	91,5857 ± 8,0336
VF1		5,965 ± 1,560	0,0672 ± 0,0035	58,8092 ± 13,0523
VQ1		7,449 ± 2,271	0,0607 ± 0,0027	32,3524 ± 7,0295
MS2	2,4	11,166 ± 8,321	0,0854 ± 0,0037	3,9278 ± 0,4320
VF2	2,56	6,288 ± 2,792	0,0627 ± 0,0053	6,9441 ± 0,8636
VQ2	5,76	8,044 ± 1,163	0,1096 ± 0,0020	61,1208 ± 11,0127

Através das análises estatísticas, foi determinado que quanto ao desgaste, independente da geometria da ferramenta, o desgaste obtido será o mesmo, porém pelo alto IC da ferramenta MS, possuindo um aumento de 166,38 % e 106,22 % em relação às VF e VQ no Teste 1 respectivamente e 114,61% e 111,65 % em relação às VF e VQ no Teste 2 respectivamente, sendo as ferramentas VF e VQ possuindo ambas o melhor desempenho

Sobre a rugosidade, em relação ao Ra, as que tiveram o melhor desempenho foram as ferramentas VF e VQ, a ferramenta VF teve o mesmo desempenho para ambos os testes, enquanto a VQ apenas no Teste 1, tendo uma diferença entre as rugosidades VQ1 e VF2 de 3,19 %, porém em relação ao Rq a ferramenta VQ possui o melhor desempenho.

Sobre a altura das rebarbas, as ferramentas que obtiveram melhores resultados foram a MS e a VF, sendo a MS a que obteve melhor desempenho, tendo uma diminuição de 56,56 % em relação à VF. Entretanto, estes resultados tiveram maior influência nos parâmetros de corte do que quanto às geometrias das ferramentas.

Desta forma, VF apresentou resultados semelhantes às com melhor desempenho e visando o custo-benefício, em que a ferramenta VF possui um valor 150 % maior que a MS e a VQ 220 % maior que a MS, tem-se a VF a ferramenta que apresentou o melhor custo-benefício, sendo assim a com melhor desempenho.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de microfresamento no aço ferramenta AISI H13 com diferentes microfresas de metal duro revestidas de diâmetro de 0,4 mm em diferentes condições de corte, pode-se concluir o seguinte conforme cada seção analisada.

Desgaste das microfresas:

- Não há diferença entre os desgastes de cada experimento, porém há o alto intervalo de confiança para a microfresa MS em ambos os testes, logo as microfresas VF e VQ possuem melhor desempenho, independente das condições de corte.
- Foi observado dois mecanismos de desgaste para todos os experimentos, sendo o de abrasão para os revestimentos e adesão para o metal duro.
- O maior ângulo de cunha (β_0) nas ferramentas VF e VQ tiveram maior influência para a diminuição do IC.

Rugosidade:

- O experimento que resultou em menor rugosidade foi o de Teste 1 com a microfresa VQ.
- Em sua maioria, a mudança das variáveis: divisões feitas nos canais (entrada, meio e saída), os canais, a geometria das microfresas e os parâmetros de corte resultam em mudanças em ambas as rugosidades Ra e Rq.

Formação de Rebarbas:

- O experimento que resultou em menor altura de rebarba foi o de Teste 2 com a microfresa MS.
- Em todos os experimentos, há diferença entre os fresamentos discordantes e concordantes. Sendo que a formação de rebarbas no fresamento concordante são maiores do que as formadas no fresamento discordante. Com exceção do experimento de Teste 2 com a microfresa MS.

- Em sua maioria, a mudança das variáveis: divisões feitas nos canais (entrada, meio e saída), os canais, a geometria das microfresas e os parâmetros de corte resultam em mudanças para as alturas das rebarbas formadas.
- A profundidade de corte foi a maior influente para a altura das rebarbas, enquanto a geometria das microfresas foi a maior influente para uma maior distância microfresada até o aumento da altura das rebarbas, podendo este ser um critério para o fim de vida de uma microfresa.

Desempenho das microfresas:

- A microfresa com melhor desempenho e custo-benefício é a VF2XLD0040N010.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Investigar sobre os materiais aderidos nas microfresas e relacioná-los ao desgaste das arestas da microfresa.
- Investigar a relação da profundidade de corte, avanço, taxa de remoção de material, força exercida sobre a microfresa, marcações sobre a superfície microfresada e relacioná-los entre si e em conjunto com a rugosidade.
- Além de medir a altura das rebarbas, medir também a área das rebarbas formadas a partir da aquisição de imagens dos canais no MEV.
- Investigar mais sobre o comportamento das microfresas VF2XLD0040N010 e VQXLD0040N010 em outras condições de corte e em outros materiais com maior que o aço ferramenta AISI H13, como por exemplo o aço ferramenta AISI H13 temperado ou depositado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ©MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. Catálogo Fresas de Topo Inteiriças., 2024. Disponível em: <https://data.mmc-carbide.com/1716/7890/1927/catalog_c010z_solid_end_mills.pdf>. Acesso em: 7/5/2024.
- ABNT NBR ISO 4288. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade., 2008.
- ALHADEFF, L. L.; MARSHALL, M. B.; CURTIS, D. T.; SLATTER, T. Protocol for tool wear measurement in micro-milling. *Wear*, v. 420-421, p. 54-67, 2019. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.018>
- ALONSO, T. Análise experimental do efeito das condições de corte no microfresamento do aço ferramenta AISI H13, 31. jan. 2023. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/37082>>. <https://doi.org/10.29327/usinagem.478724>
- ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, v. 33, n. 4, p. 402-407, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.002>
- ARRUDA, É. M. Otimização robusta multi-objetivo do processo de fresamento do aço ABNT H13 endurecido utilizando ferramentas de topo esférico. Itajubá, 2019.
- ASM INTERNATIONAL. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM International, 1990.
- BISSACCO, G.; HANSEN, H. N.; DE CHIFFRE, L. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 167, n. 2-3, p. 201-207, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.029>
- BRYSON, W. E. Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels. 2005. <https://doi.org/10.3139/9783446436701.fm>

- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials science and engineering: an introduction. John Wiley, 2009.
- CÂMARA, M. A.; RUBIO, J. C. C.; ABRÃO, A. M.; DAVIM, J. P. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. Journal of Materials Science & Technology, v. 28, n. 8, p. 673-685, 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1005030212601157>>. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60115-7](https://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. 3-4, p. 313-332, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015>
- CHEN, N.; LI, H. N.; WU, J.; et al. Advances in micro milling: From tool fabrication to process outcomes. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1. jan. 2021. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103670>
- CHENG, K.; HUO, D. Micro-cutting: Fundamentals and applications. 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. 7o ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005.
- CHUKEWAD, Y. M. An Investigation of Kinematic Redundancy for Reduced Error in Micromilling. 2014.

- COLPANI, A.; FIORENTINO, A.; CERETTI, E.; ATTANASIO, A. Tool wear analysis in micromilling of titanium alloy. *Precision Engineering*, v. 57, p. 83-94, 2019. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.03.011>
- DADGARI, A.; HUO, D.; SWAILES, D. Investigation on tool wear and tool life prediction in micro-milling of Ti-6Al-4V. *Nanotechnology and Precision Engineering*, v. 1, n. 4, p. 218-225, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.npe.2018.12.005>
- ELKASEER, A.; DIMOV, S.; PHAM, D.; et al. Material microstructure effects in micro-endmilling of Cu99.9E. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 232, n. 7, p. 1143-1155, 2018. <https://doi.org/10.1177/0954405416666898>
- EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M. *Materials Processing Technology Titanium alloys and their machinability a review*. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00030-1)
- FALLBÖHMER, P.; RODRÍGUEZ, C. A.; ÖZEL, T.; ALTAN, T. 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. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013699003118>>. [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 Blucher, 1969.
- FILIZ, S.; CONLEY, C. M.; WASSERMAN, M. B.; OZDOGANLAR, O. B. An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, n. 7-8, p. 1088-1100, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.024>
- 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, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0596-1>
- GABARDO, J. F. *Estudo da tenacidade do aço ferramenta H13*. Curitiba, 2008.

- GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H. Roughness Parameters. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2)
- GOMES, M. C. Estudo experimental do microfresamento do aço AISI 316L, 18. fev. 2019. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/25279>>.
- GOMES, M. C. Estudo do processo de microfresamento em aço inoxidável ABNT 316L produzido por fundição e manufatura aditiva., 2022.
- GOMES, M. C.; BACCI DA SILVA, M.; ANTONIO, M.; DUARTE, V. Experimental study of micromilling operation of stainless steel., 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06232-7>.
- GOMES, M. C.; BRITO, L. C.; BACCI DA SILVA, M.; VIANA DUARTE, M. A. Tool wear monitoring in micromilling using Support Vector Machine with vibration and sound sensors. Precision Engineering, v. 67, p. 137-151, 2021. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.09.025>
- ISO. ISO 8688-1 Tool life testing in milling-Part 1: Face milling. 1989a.
- ISO. ISO 8688-2 Tool life testing in milling-Part 2: End milling. 1989b.
- JIN, S. Y.; PRAMANIK, A.; BASAK, A. K.; et al. Burr formation and its treatments-a review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1. mar. 2020. Springer.
- KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. Manufacturing processes for engineering materials. Prentice Hall, 5th edition, 2008, 1040p.
- 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 and Manufacture, v. 48, n. 1, p. 1-14, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.011>

- LEE, K. & DORNFELD, DAVID. (2002). An experimental study on burr formation in micro milling aluminum and copper. Transactions of NAMRI/SME. 30. 255-262.
- LI, H.; JING, X.; WANG, J. Detection and analysis of chatter occurrence in micro-milling process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 228, n. 11, p. 1359-1371, 2014. <https://doi.org/10.1177/0954405414522216>
- LI, P.; OOSTERLING, J. A. J.; HOOGSTRATE, A. M.; LANGEN, H. H.; MUNNIG SCHMIDT, R. H. Design of micro square endmills for hard milling applications. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 57, n. 9-12, p. 859-870, 2011. Springer London. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3330-6>
- LIU, X.; DEVOR, R. E.; KAPOOR, S. G.; EHMANN, K. F. The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 126, n. 4, p. 666-678, 2004. <https://doi.org/10.1115/1.1813469>
- LIU, X.; SU, C. Y.; LI, Z.; YANG, F. Adaptive Neural-Network-Based Active Control of Regenerative Chatter in Micromilling. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, v. 15, n. 2, p. 628-640, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2667709>
- MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; BACCI DA SILVA, M. Teoria da Usinagem dos Materiais. 2015.
- MALEKIAN, M.; PARK, S. S.; JUN, M. B. G. Modeling of dynamic micro-milling cutting forces. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 49, n. 7-8, p. 586-598, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.02.006>
- MEIJER, A.; BERGMANN, J. A.; KREBS, E.; BIERMANN, D.; WIEDERKEHR, P. Analytical and simulation-based prediction of surface roughness for micromilling hardened HSS. Journal of Manufacturing and Materials Processing, v. 3, n. 3, 2019. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030070>

- MOUGO, A. L.; Araujo, A. C. M. de, orient. Microfresamento do aço superduplex: uma comparação mecânica com os aços inoxidáveis austenítico e ferrítico para as forças de usinagem e avaliação da superfície usinada. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Programa de Engenharia Mecânica, 2016-06. Disp. em: <<http://objdig.ufrj.br/60/teses/864845.pdf>>.
- MUMMERY, L. Surface texture analysis, The Handbook. West Germany: Hommelwerke GmbH, 1992.
- O'TOOLE, L.; KANG, C. W.; FANG, F. Z. Precision micro-milling process: state of the art. *Advances in Manufacturing*, v. 9, n. 2, p. 173-205, 2021. Shanghai University. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00323-0>
- QUEIROZ, L. B. Avaliação de Diferentes Ferramentas de Corte no Microfresamento do Aço Ferramenta ABNT H13. Uberlândia, 2022.
- ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. Tool Steels. ASM International, 1998. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.ts5.9781627083584>
- SANTOS, A. G. DOS. Investigação experimental do microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V, 11. fev. 2020. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/29023>>. Acesso em: 18/3/2025.
- SANTOS, A. G. DOS; DA SILVA, M. B.; JACKSON, M. J. Tungsten carbide micro-tool wear when micro milling UNS S32205 duplex stainless steel. *Wear*, v. 414-415, p. 109-117, 2018. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.08.007>
- SERJE, D.; PACHECO, J.; DIEZ, E. Micromilling research: current trends and future prospects. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 111, n. 7-8, p. 1889-1916, 2020. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06205-w>
- SIMONEAU, A.; NG, E.; ELBESTAWI, M. A. Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 5, p. 467-481, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.019>

- TENG, X.; HUO, D.; SHYHA, I.; CHEN, W.; WONG, E. An experimental study on tool wear behaviour in micro milling of nano Mg/Ti metal matrix composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 96, n. 5-8, p. 2127-2140, 2018. Springer London. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1672-z>
- UCUN, IRFAN; ASLANTAS, K.; BEDIR, F. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy. *Wear*, v. 300, n. 1-2, p. 8-19, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.103>
- URIARTE, L.; AZCARATE, S.; HERRERO, A.; LOPEZ DE LACALLE, L. N.; LAMIKIZ, A. Mechanistic modelling of the micro- end milling operation. *4M 2006 - Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*. p.237-240, 2006. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008045263-0/50053-2>
- YUE, C.; GAO, H.; LIU, X.; LIANG, S. Y.; WANG, L. A review of chatter vibration research in milling. *Chinese Journal of Aeronautics*, v. 32, n. 2, p. 215-242, 2019. *Chinese Journal of Aeronautics*. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.11.007>
- ZIBEROV, M.; DE OLIVEIRA, D.; DA SILVA, M. B.; HUNG, W. N. P. Wear of TiAlN and DLC coated microtools in micromilling of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 56, p. 337-349, 2020. Elsevier Ltd. <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 Ótica.** / Method utilized - Optical emission spectrometry.

Equipamentos / Instrumentos / Equipments / Instruments:

* **Espectrômetro de Emissão Ótica 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 respective 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

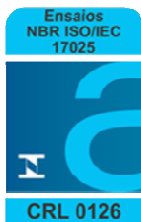
Isabel Cristina de Rezende
Laboratorista CRQ PR3002619

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



Laboratório de Ensaios e Análise em Materiais - LAMAT

Acreditado 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

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

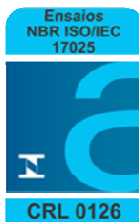
Dureza Brinell / Brinell Hardness				
ENSAIO TEST	RESULTADOS RESULTS	UNIDADE UNITY	CARGA LOAD (kgf)	PENETRADOR INDENTER Ø / mm
Valor 1 Value 1	194,0	HBW	750	5
Valor 2 Value 2	192,0			
Valor 3 Value 3	195,0			
Média / Average	193,7			

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

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