

LUCAS BARBOSA QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES FERRAMENTAS DE
CORTE NO MICROFRESAMENTO DO AÇO
FERRAMENTA ABNT H13**



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

2022

LUCAS BARBOSA QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES FERRAMENTAS DE
CORTE NO MICROFRESAMENTO DO AÇO
FERRAMENTA ABNT H13**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva

Uberlândia - MG

2022

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

Q3
2022 Queiroz, Lucas Barbosa, 1995-
AVALIAÇÃO DE DIFERENTES FERRAMENTAS DE CORTE NO
MICROFRESAMENTO DO AÇO FERRAMENTA ABNT H13 [recurso
eletrônico] / Lucas Barbosa Queiroz. - 2022.

Orientador: Marcio 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.2022.305>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Silva, Marcio 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.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico nº 610, COPEM				
Data:	04/07/2022	Hora de início:	14:00h	Hora de encerramento:	17:15h
Matrícula do Discente:	12022EMC009				
Nome do Discente:	Lucas Barbosa Queiroz				
Título do Trabalho:	Avaliação da influência de diferentes ferramentas de corte no microfresamento do aço ferramenta ABNT H13				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Microusinagem de Materiais Avançados				

Reuniu-se por Webconferência via Microsoft Teams, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Álisson Rocha Machado (FEMEC/UFU); Alexandre Mendes Abrão(UFMG) e Márcio Bacci da Silva (FEMEC/UFU) orientador(a) do(a) candidato(a). Ressalta-se que os Prof.Álisson Rocha Machado, Márcio Bacci da Silva e o Discente participaram por videoconferência desde a cidade de Uberlândia/MG; Alexandre Mendes Abrão participou por videoconferência desde a cidade de Belo Horizonte/MG.

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

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

Aprovado.

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

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

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



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Bacci da Silva, Membro de Comissão**, em 04/07/2022, às 17:21, 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 **ALISSON ROCHA MACHADO, Usuário Externo**, em 04/07/2022, às 17:24, 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 04/07/2022, às 17:30, 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 **3702586** e o código CRC **0873D97D**.

DEDICATÓRIA

À minha esposa e à minha família...

AGRADECIMENTOS

À Deus por me conceder capacidade e me dar direcionamento para chegar até aqui. Sem a fé e esperança que n'Ele há, nada disso seria possível.

À minha esposa, Bianca, por me apoiar incondicionalmente, me incentivando e dando força em todos os momentos. Sua determinação é inspiradora.

Aos meus pais, Nivaldo e Elizene, por toda educação que me deram e por não medirem esforços para que conseguisse alcançar meus sonhos.

Ao meu irmão Danilo, e toda minha família por sempre estarem ao meu lado.

Ao meu orientador, prof. Dr. Marcio Bacci da Silva, por todos os ensinamentos, paciência e dedicação.

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, Samuel Freitas, Arthur Vieira, Tamires Botelho, Thaise Alonso e Milla Caroline, 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.

*“Ao Rei eterno, o Deus único, imortal
e invisível, sejam honra e glória para
todo o sempre. Amém.”*

1 Timóteo 1:17

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

Resumo

O desenvolvimento de novas tecnologias tem demandado a fabricação de componentes com dimensões cada vez menores e, para atender esta demanda, tem-se empregado o microfresamento. Este processo pode ser aplicado em diferentes materiais, incluindo aços ferramenta. O aço ferramenta ABNT H13 é comumente utilizado em moldes e matrizes para trabalho a quente. Diante desse cenário, o microfresamento do aço ferramenta H13 têm sido o objeto de estudo de diferentes trabalhos, com o intuito de analisar os fenômenos envolvidos e a qualidade do processo. Contudo, ainda há poucas pesquisas sobre a influência da ferramenta no microfresamento, uma vez que as microfresas impactam diretamente a qualidade da peça fabricada bem como os custos da manufatura. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é analisar diferentes ferramentas no microfresamento do aço ferramenta ABNT H13. O trabalho utilizou microfresas de topo reto com diâmetro de 400 μm com diferentes geometria e revestimento. Os testes experimentais foram realizados numa microfresadora CNC de precisão. Em todos os testes foi aplicado fluido de corte em regime de MQF e os parâmetros de corte foram mantidos constantes. Foram avaliados o desgaste das ferramentas, a rugosidade da superfície usinada e a formação de rebarbas. Constatou-se forte correlação positiva entre os ângulos de posição primário e secundário com o desgaste e correlação negativa entre ângulo de ponta e o desgaste da ferramenta. Percebeu-se também correlação positiva entre o raio de aresta, a quantidade de rebarbas formadas e a rugosidade do canal. Já o revestimento também teve influência sobre as variáveis de saída, porém em menor intensidade.

Palavras Chave: Microusinagem; Microfresamento; H13; Microfresa; Geometria de Ferramenta

QUEIROZ, L. B. **Evaluation of Different Cutting Tools when Micromilling ABNT H13 Tool Steel**. 2022, 100p. Master's Thesis, Federal University of Uberlândia – MG.

Abstract

The development of new technologies has demanded the manufacturing of components with increasingly smaller dimensions and, to meet this demand, micromilling has been used. This process can be applied to different materials, including tool steels. ABNT H13 tool steel is commonly used in molds and dies for hot work. Given this scenario, the micromilling of H13 tool steel has been the object of study of different works, in order to analyze the phenomena involved and the quality of the process. However, there are still few researches on the influence of the tool in micromilling, since micromills directly impact the quality of the manufactured part as well as manufacturing costs. In this sense, the objective of this work is to analyze different tools in the micromilling of ABNT H13 tool steel. The work used flat end micromills with a diameter of 400 μm with different geometries and coatings. The experimental tests were performed on a precision CNC micromilling machine. In all tests, cutting fluid was applied in MQF regime and the cutting parameters were kept constant. Tool wear, machined surface roughness and burr formation were evaluated. There was a strong positive correlation between of the side-cutting edge angle and the end-cutting edge angle on tool wear and there was a negative correlation between the nose angle on tool wear. A strong positive correlation was also observed between the cutting-edge radius, the area of burrs formed and the roughness of the channel. The coating also had an influence on the output variables, but to a lesser extent.

Keywords: Mircomachining; Micromilling; H13; Micromill; Tool Geometry

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Miniaturização de ferramentas e componentes: (a) microfresa em comparação com palito de fósforo; (b) microreator; (c) micromolde. (adaptado de CHENG e HUO, 2013)	2
Figura 1.2 - Comparação entre a quantidade de artigos publicados (valores absolutos e percentuais) sobre os temas Usinagem e Microusinagem, em revistas indexadas de elevado impacto no campo da manufatura entre 2010-2020.	3
Figura 1.3 - Comparação entre a quantidade de artigos publicados sobre os temas Microusinagem e Microfresamento (absoluto e percentual), em revistas indexadas de elevado impacto no campo da manufatura entre 2010-2020.	4
Figura 2.1 - Dimensão e precisão para diferentes processos de usinagem (adaptado de CHENG; HUO, 2013)	8
Figura 2.2 - Representação da relação entre o tamanho do grão e espessura de corte: (a) macrousinagem e (b) microusinagem (adaptado de BISSACCO, 2004 apud BISSACCO et al., 2005).....	10
Figura 2.3 – Efeito do raio de aresta: (a) macrousinagem, (b) microusinagem (adaptado de BISSACCO, 2004 apud BISSACCO et al., 2005).....	11
Figura 2.4 - Formação do cavaco em relação a mínima espessura de corte (adaptado de CHAE et al., 2006)	13
Figura 2.5 - Variação da energia específica de corte com o avanço para diferentes materiais, segundo AWF 158 (FERRARESI,1970).	15
Figura 2.6 - Variação da pressão específica de corte em função da razão h/r_β (adaptado de SAHOO et al. 2020)	15
Figura 2.7 - Relação entre rugosidade superficial e parâmetros de corte: (a) rotação, (b) velocidade de avanço, (c) profundidade de corte (adaptado de CHEN et al., 2020)	18
Figura 2.8 - Representação esquemática do microfresamento na direção de avanço: (a) contato ferramenta-peça, (b) dois dentes consecutivos, (c) marca de avanço e parâmetros com maior influência (adaptado de Meijer et al., 2019).....	19
Figura 2.9 - Classificação das rebarbas quanto à posição (adaptado de LEE; DORNFELD, 2002).	21

Figura 2.10 - Classificação das rebarbas quanto ao tipo: (a) primária, (b) agulha, (c) pena e (d) menor (CHERN et al. 2006).....	22
Figura 2.11 - Representação do processo de formação de rebarbas primárias (adaptado de CHERN et al. 2006).....	23
Figura 2.12 - Quantificação da rebarba utilizando perfilômetro de contato (adaptado de SILVA; DA SILVA, 2019).....	24
Figura 2.13 - Método de medição da largura da rebarba (adaptado de MUHAMMAD et al., 2021)	25
Figura 2.14 - Quantificação das rebarbas por medição de área: (a) imagem obtida no MEV; (b) isolamento da rebarba; (c) binarização e medição (Dos Santos, 2020).....	25
Figura 2.15 - Relação entre largura da rebarba e parâmetros de corte: (a) rotação, (b) avanço, (c) profundidade de corte (adaptado de CHEN et al., 2020)	26
Figura 2.16 - Microfresa de metal duro sem revestimento com 254 μm (0,01”) de diâmetro: (a) superfície secundária de folga e (b) superfície principal de folga. (Ampliação de 800x)	27
Figura 2.17 - Principais materiais utilizados em microfresas (adaptado de CÂMARA et al., 2012)	28
Figura 2.18 – Geometria genérica de uma microfresa de 4 arestas: (a) ferramenta inteira, (b) vista lateral e (c) vista de topo (adaptado de CHEN et al., 2021).....	29
Figura 2.19 - Rugosidade superficial (R_a) em razão da razão entre espessura de corte (h) e raio de aresta (r_β) (adaptado de ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009)	30
Figura 2.20 - Comparação do desempenho de diferentes revestimentos: (a) formação de rebarbas, (b) desgaste da ferramenta (adaptado de Aslantas et al., 2016).....	32
Figura 2.21 - Formas de desgaste da ferramenta (DEARNLEY; TRENT, 1982 apud MACHADO et al., 2009).	33
Figura 2.22 - Desgaste medido da superfície principal de folga (adaptado de ZIBEROV et al., 2020).....	34
Figura 2.23 - Medição do desgaste na superfície secundária de folga através da aresta de corte (adaptado de SILVA; DA SILVA, 2019).....	35
Figura 2.24 - Medição do desgaste na superfície secundária de folga através da diferença de diâmetro (adaptado de FILIZ et al., 2007)	35
Figura 2.25 - Matriz em aço ferramenta H13 para extrusão de alumínio (KRAFT, 2015).	36

Figura 2.26 - Microestrutura do aço ferramenta ABNT H13 (GABARDO, 2008).....	39
Figura 3.1 - Análise metalográfica do material usinado.....	41
Figura 3.2 - Corpo de prova utilizado com as respectivas dimensões. Faces 1 e 2 representam as superfícies faceadas.....	42
Figura 3.3 - Fixação da amostra na morsa de precisão	43
Figura 3.4 - Modelo de microfresadora utilizada nos ensaios (adaptado de MINITECH MACHINERY, 2022)	44
Figura 3.5 - Equipamentos: (a) MEV; (b) EDS e (c) Perfilômetro (adaptado de TAYLOR HOBSON, 2012; HITACHI HIGH-TECHNOLOGIES CORPORATION, 2013).....	45
Figura 3.6 - Representação Esquemática da Microfresa com as dimensões evidenciadas (adaptado de REWIID, 2021)	47
Figura 3.7 - Fotos das microfresas obtidas no MEV.....	48
Figura 3.8 - Representação esquemática da ferramenta com os ângulos e raios medidos. (a) vista superior; (b) vista lateral.....	49
Figura 3.9 - Medições nos ângulos e raios utilizando o software Image J	50
Figura 3.10 - Caracterização geométrica da ferramenta utilizando o Zedge Pro HR	51
Figura 3.11 - Etapas de medição do ângulo de posição secundário: (a) escaneamento da superfície; (b) leitura dos dados no TalyMap Gold e (c) Alinhamento das arestas, ampliação e medição dos ângulos.....	52
Figura 3.12 - Montagem da amostra na microfresadora através de uma morsa de precisão.....	54
Figura 3.13 – Aproximação da ferramenta utilizando o microscópio USB.....	55
Figura 3.14 - Posicionamento e movimentação da ferramenta, peça e bocal.....	56
Figura 3.15 - Representação esquemática da movimentação da ferramenta sobre a peça (Visão no plano XY).....	57
Figura 3.16 - Medição da rugosidade do canal: (a) posicionamento do apalpador e (b) sentido de retração	58
Figura 3.17 - Metodologia para medição da área da rebarba: (a) imagem original, (b) separação da rebarba, (c) binarização, (d) inserção da escala.....	59
Figura 3.18 - Representação da metodologia para medição do desgaste da ferramenta através da comparação do diâmetro inicial e final	60
Figura 4.1 - Imagens das ferramentas antes e após a usinagem de 116 mm.....	63

Figura 4.2 - Resultado de desgaste médio para as diferentes ferramentas	64
Figura 4.3 - Gráficos que relacionam os Parâmetros Geométricos com o Desgaste: A) Ângulo de Posição Secundário x Desgaste; B) Ângulo de Posição Primário x Desgaste; C) Ângulo de Ponta x Desgaste	67
Figura 4.4 - Rugosidade média por modelo de ferramenta	69
Figura 4.5 - Gráficos da rugosidade superficial por comprimento usinado para cada uma das ferramentas utilizadas.....	70
Figura 4.6 - Gráficos que relacionam os Parâmetros Geométricos com a Rugosidade: A) Raio de Aresta x Ra; B) Raio de Ponta x Ra	72
Figura 4.7 - Relação entre Raio de Aresta e Raio de Ponta	73
Figura 4.8 - Redução no raio de aresta da ferramenta D	74
Figura 4.9 - Detalhes do revestimento da ferramenta D.....	75
Figura 4.10 - Fotos dos fundos dos canais usinados com as ferramentas A, B1 e B2 (Aumento de 400x).....	76
Figura 4.11 - Fotos dos fundos dos canais usinados com as ferramentas C e D (Aumento de 400x).....	77
Figura 4.12 - Marcas de avanço no quinto canal fabricados com as ferramentas A e D (Aumento de 1500x)	78
Figura 4.13 - Quantidade de rebarba de topo para cada modelo de microfresa	80
Figura 4.14 - Quantidade de rebarba por comprimento usinado para cada ferramenta	81
Figura 4.15 - Gráficos que relacionam os Parâmetros Geométricos com a Formação de Rebarbas: A) Raio de Aresta x Rebarba; B) Raio de Ponta x Rebarba	84
Figura 4.16 - Fotos das rebarbas formadas nos canais usinados com as ferramentas A, B1 e B2 (Aumento de 250x).....	86
Figura 4.17 - Fotos das rebarbas formadas nos canais usinados com as ferramentas C e D (Aumento de 250x).....	87

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Nomenclatura dos aços ferramenta conforme a AISI (SERIACOPI, 2013).....	37
Tabela 2.2 - Composição química nominal, em massa, do aço ABNT H13 (ASM International, 2005)	38
Tabela 3.1 - Composição química do ABNT H13 obtida por espectroscopia de emissão ótica	41
Tabela 3.2 - Dimensões das microfresas utilizadas	47
Tabela 3.3 - Ângulos e raios das ferramentas utilizadas.....	51
Tabela 3.4 – Composição (% em peso) dos revestimentos das microfresas	53
Tabela 4.1 - Correlação entre os parâmetros geométricos e desgaste da ferramenta	66
Tabela 4.2 - Resultados da ANOVA para a rugosidade superficial.....	71
Tabela 4.3 - Correlação entre os parâmetros geométricos e a rugosidade da superfície do canal	72
Tabela 4.4 - Resultados da ANOVA para a formação de rebarbas.....	83
Tabela 4.5 - Correlação entre os parâmetros geométricos e a área das rebarbas por comprimento usinado	84

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_e	Penetração de trabalho
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AlCrN	Nitreto de Cromo e Alumínio
ANOVA	Análise de Variância (<i>Analysis of Variance</i>)
a_p	Profundidade de corte
ASM	<i>American Society for Metals</i>
CNC	Comando numérico computadorizado
CrN	Nitreto de Cromo
Cu	Cobre
D	Diâmetro da haste da microfresa
d	Diâmetro de corte da microfresa (diâmetro da cabeça)
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
FGD	<i>Fine-grained Diamond</i> (Diamante de granulação fina)
f_z	Avanço por dente
h	Espessura de corte
H	Comprimento de corte da microfresa (cabeça da microfresa)
H_1	Hipótese alternativa na análise de variância
h_m	Espessura mínima de corte
H_0	Hipótese nula na análise de variância
L	Comprimento total da microfresa
L_c	Comprimento de corte da microfresa
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQF	Mínima quantidade de fluido (de corte)
NCD	Nanocrystalline Diamond (Diamante nano cristalino)
R_a	Desvio aritmético médio
r_ϵ	Raio de ponta
R_t	Altura total do perfil
r_β	Raio de aresta

TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
v_c	Velocidade de corte
v_f	Velocidade de avanço
γ	Ângulo de saída
γ_e	Ângulo de saída efetivo
β_o	Ângulo da cunha
ϵ_r	Ângulo de ponta
χ_r	Ângulo de posição primário
χ_r'	Ângulo de posição secundário

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	5
1.2. Estruturação do Trabalho	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1. Microusinagem	7
2.2. Microfresamento	8
2.3. Efeito Escala.....	9
2.3.1. Formação do Cavaco	12
2.3.2. Pressão Específica de Corte	14
2.4. Rugosidade.....	16
2.4.1. Influência dos Parâmetros de Corte na Rugosidade	17
2.4.2. Modelos Matemáticos para a Rugosidade	18
2.5. Formação e Classificação das Rebarbas	20
2.5.1. Métodos de Medição de Rebarbas.....	23
2.5.2. Influência dos Parâmetros de Corte na Formação de Rebarbas.....	26
2.6. Microfresa	27
2.6.1. Revestimento das Microfresas	31
2.7. Desgaste da Ferramenta	32
2.8. Aços Ferramenta	36
2.8.1. Aços Ferramenta H13.....	37
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	40
3.1. Caracterização das Amostras.....	40
3.2. Preparação dos Corpos de Prova.....	42
3.3. Equipamentos Utilizados	43
3.3.1. Máquina-ferramenta	44

3.3.2.	Perfilômetro, MEV e EDS	45
3.4.	Microfresas	46
3.4.1.	Medição dos Parâmetros Geométricos	48
3.4.2.	Validação das Medições.....	51
3.4.3.	Caracterização dos Revestimentos	52
3.5.	Fixação das Amostras e Preparação da Superfície	53
3.6.	Referenciamento da Ferramenta	55
3.7.	Ensaio de Usinagem.....	56
3.8.	Variáveis de Saída.....	57
3.8.1.	Rugosidade	58
3.8.2.	Superfície Usinada e Formação de Rebarbas.....	59
3.8.3.	Desgaste das Ferramentas	60
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES		62
4.1.	Análise do Desgaste das Microfresas.....	62
4.2.	Análise da Rugosidade	68
4.3.	Análise da Superfície Usinada.....	75
4.4.	Análise da Formação de Rebarbas	79
4.4.1.	Análise dos Tipos de Rebarbas.....	85
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ...		89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		92

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A usinagem é um termo empregado em todo processo em que é conferido a uma peça acabamento, formas ou dimensões, ou mesmo uma combinação desses três itens, produzindo cavaco, que por sua vez representa a porção de material da peça removida pela ferramenta e que possui forma geométrica irregular (FERRARESI, 1969).

A usinagem começou como uma atividade manual e grosseira, evoluindo para máquinas controladas por comando numérico (CNC), com ultra precisão e que possibilitam atender o mercado automotivo, naval, aeroespacial, mercado de eletrodomésticos, eletrônicos, entre outros.

Contudo, os componentes fabricados têm se tornado cada vez menores, logo a miniaturização se tornou uma medida importante do avanço tecnológico no mundo moderno, conforme pode ser notado na Fig. 1.1. Minimizar o tamanho dos componentes eletrônicos e mecânicos é o requisito crucial para incorporar vários recursos operacionais em um pequeno dispositivo e plataforma funcional. Baixo consumo de energia e material, leve, compacto, alta sensibilidade (menos necessidade de energia para atuação de um microcomponente) e relação custo-desempenho comparativamente baixa estão entre os vários méritos dos produtos miniaturizados que são cada vez mais exigidos nos campos de indústrias médicas, de transporte e de comunicação (SERJE; PACHECO; DIEZ, 2020).

Sob a perspectiva de constante miniaturização dos componentes, os processos de usinagem passaram por grande evolução. Atualmente, para atender estas demandas do mercado, são empregados processos de microusinagem, sendo

o microfresamento um dos mais importantes processos de fabricação englobado nesta categoria.

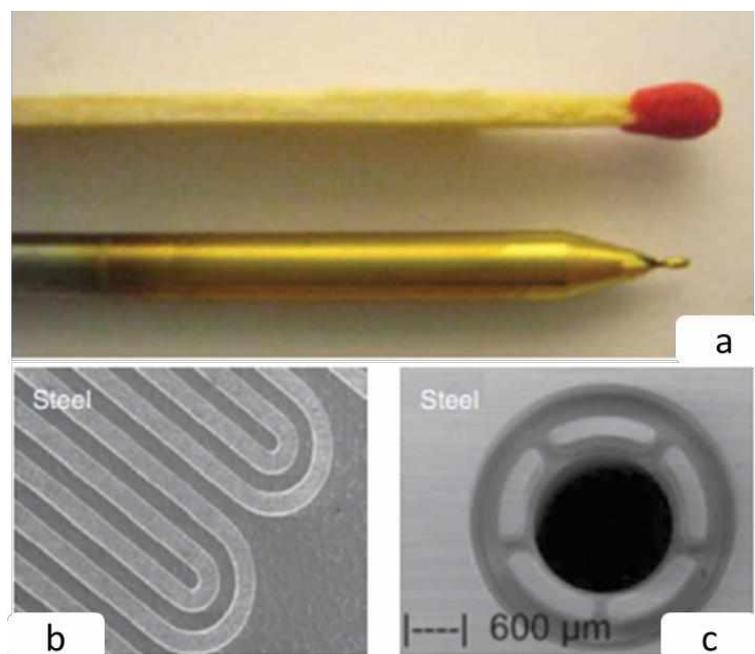


Figura 1.1 - Miniaturização de ferramentas e componentes: (a) microfresa em comparação com palito de fósforo; (b) microreator; (c) micromolde. (adaptado de CHENG e HUO, 2013)

Um dos materiais que mais têm sido utilizados nas últimas décadas é o aço ferramenta (GABARDO, 2008). Este aço é bastante empregado na fabricação de matrizes, moldes e componentes de máquinas, seja para trabalho a quente ou a frio. São, provavelmente, alguns dos que mais exigem cuidados e atenção sob o ponto de vista de fabricação e aplicação, pois necessitam cumprir requisitos importantes para suprir as condições de serviço a que se destinam (CHIAVERINI, 1988).

Diante deste cenário, é possível notar a importância tanto dos processos de microfresamento quanto dos aços ferramenta. Desta forma, pesquisas que apliquem este processo de fabricação a este material são necessárias para atender à crescente demanda da indústria.

Apesar de possuir grande importância no contexto atual dos processos de fabricação, a microusinagem ainda é pouco abordada nas pesquisas e publicações, principalmente se comparada aos processos de macrousinagem. O percentual de trabalhos publicados sobre usinagem em comparação aos trabalhos realizados no campo da microusinagem são mostrados na Fig. 1.2, evidenciando a necessidade de mais pesquisas e projetos nesta área da manufatura. Os resultados contidos no gráfico foram obtidos na plataforma SCOPUS utilizando as palavras chaves “machining” e “micromachining”.

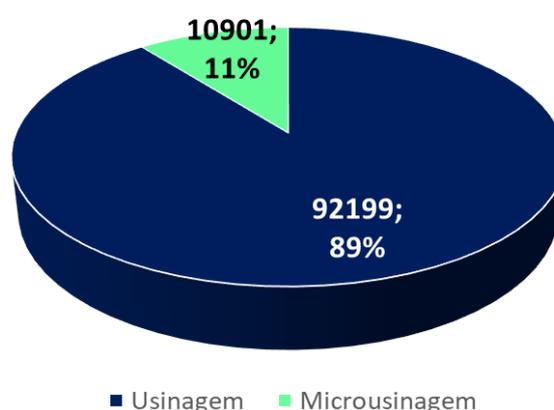


Figura 1.2 - Comparação entre a quantidade de artigos publicados (valores absolutos e percentuais) sobre os temas Usinagem e Microusinagem, em revistas indexadas de elevado impacto no campo da manufatura entre 2010-2020.

Além do fato da microusinagem ainda corresponder a uma pequena parcela das pesquisas na área de usinagem, o microfresamento, que é o tema deste trabalho, corresponde a uma parcela ainda menor deste universo. Na Fig. 1.3 é possível observar a evolução, na última década, tanto da microusinagem quanto do microfresamento. Nota-se um pequeno aumento no volume de trabalhos dedicados a este tema, mas ainda é uma parcela ínfima em relação ao potencial deste processo de fabricação. Assim como no gráfico anterior, os resultados abaixo foram obtidos na plataforma SCOPUS, porém utilizando as palavras chaves “micromachining” e “micromilling”.

A combinação entre microusinagem e aço ferramenta H13 também ainda é pouco explorada no meio científico. Entre 2010 e 2020 houve apenas nove artigos

publicados sobre este tema, conforme levantamento feito na plataforma SCOPUS (<https://www.scopus.com/search/>) em junho de 2021, utilizando as palavras-chave “micromachining” e “H13”.

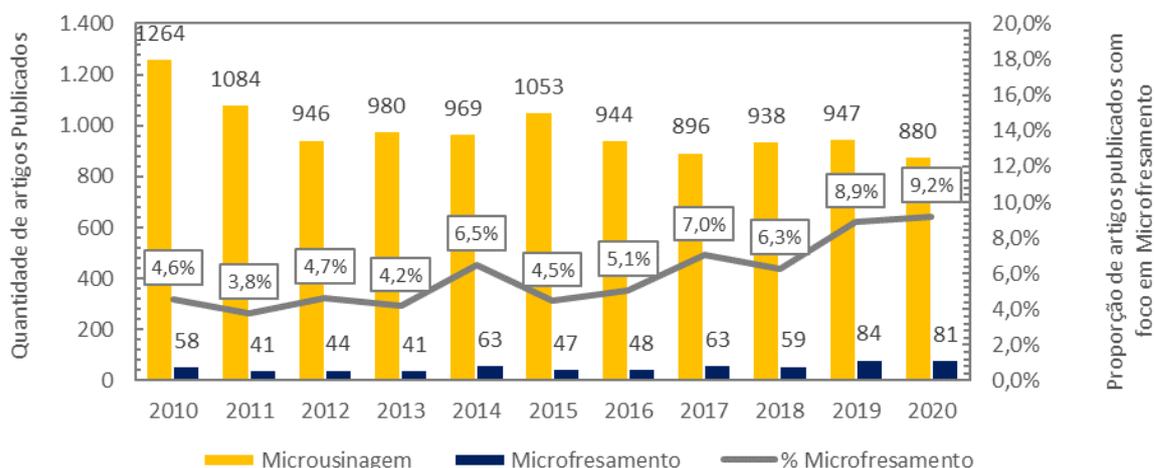


Figura 1.3 - Comparação entre a quantidade de artigos publicados sobre os temas Microusinagem e Microfresamento (absoluto e percentual), em revistas indexadas de elevado impacto no campo da manufatura entre 2010-2020.

Nos processos de microusinagem, as microferramentas são a parte mais flexível do sistema de microcorte e têm a menor rigidez em toda a cadeia do processo de microcorte. Sua geometria e propriedades do material têm um efeito substancial no processo de remoção de material, forças de microusinagem, geração de calor, desgaste da ferramenta, qualidade da superfície e formação de rebarbas. As microferramentas também são consideradas um dos principais desafios dos processos de microusinagem devido ao desgaste e à deflexão, que afeta significativamente a precisão da peça. O monitoramento da condição da ferramenta em escala micro é diferente das ferramentas convencionais, pois é difícil identificar arestas de corte desgastadas ou quebradas (OLIAEI et al., 2018).

Desta forma, é possível perceber que as pesquisas na área de microusinagem, mais especificamente sobre o microfresamento e a influência das microfresas, ainda são escassas visto a demanda crescente da indústria atual. Assim, é possível destacar a importância deste trabalho e sua futura colaboração em um campo ainda pouco explorado no meio científico.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar e comparar o desempenho de diferentes microfresas quanto a influência da geometria e revestimento no microfresamento do aço ferramenta ABNT H13. Espera-se também ampliar a compreensão de como os principais parâmetros geométricos afetam os resultados de um processo de microfresamento.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estabelecer a correlação entre as características da geometria da ferramenta e as variáveis de saída: desgaste da microfresa, rugosidade superficial e formação de rebarbas.
- Encontrar a relação entre os diferentes revestimentos das microfresas com o desgaste, rugosidade e rebarbas formadas após a usinagem.
- Definir dentre as ferramentas analisadas qual apresentou o melhor desempenho, considerando os resultados de desgaste, rugosidade e rebarbas formadas.

1.2. Estruturação do Trabalho

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. O Capítulo II aborda a revisão bibliográfica sobre o tema a ser estudado, com foco principalmente em: microusinagem, microfresamento, efeito escala, rugosidade superficial, formação e classificação das rebarbas, microfresa, desgaste da ferramenta, aços ferramenta.

No Capítulo III é apresentado o procedimento experimental, expondo a caracterização do material da peça, equipamentos utilizados, microferramenta, caracterização da geometria e revestimento da ferramenta, fixação e preparação do corpo de prova, ensaios de microfresamento, análise e medição do desgaste, medição da rebarba e medição da rugosidade do canal.

No Capítulo IV, os resultados encontrados são expostos, analisados e discutidos.

O Capítulo V contém as principais conclusões acerca do trabalho e propostas de trabalhos futuros.

Por fim, no Capítulo VI são citadas as referências bibliográficas consultadas.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Microusinagem

Em um conceito mais abrangente, a microusinagem é definida como um processo de usinagem mecânica de dimensões entre 1 e 999 μm (MASUZAWA; TÖNSHOFF, 1997). Todavia, na literatura não há conceito único que possa ser aplicado para definir este processo de fabricação. Dornfeld et al. (2006) concentram sua definição de microusinagem no tamanho da ferramenta, que deve ter entre 1 e 999 μm . Já Chae et al. (2005) focam o conceito de microusinagem na peça, afirmando que esse é um processo para fabricação de componentes entre algumas dezenas de micrometros à poucos milímetros de dimensão. Por fim, Câmara et al. (2012) entendem que a microusinagem é um processo de fabricação cuja espessura mínima de corte e os grãos do material possuem dimensões comparáveis ao raio da ferramenta.

A microusinagem é normalmente utilizada para usinar componentes em três dimensões com alta precisão, podendo ser aplicada em vários materiais de engenharia. Os processos englobados pela microusinagem são capazes de alcançar resultados de ultra precisão em relação a rugosidade e integridade da superfície usinada (CHENG; HUO, 2013). A Fig. 2.1 relaciona alguns dos processos de fabricação mais utilizados e a precisão que eles conseguem atingir. É possível perceber que a microusinagem se posiciona como uma alternativa viável para trabalhos na escala micrométrica, assegurando a alta precisão.

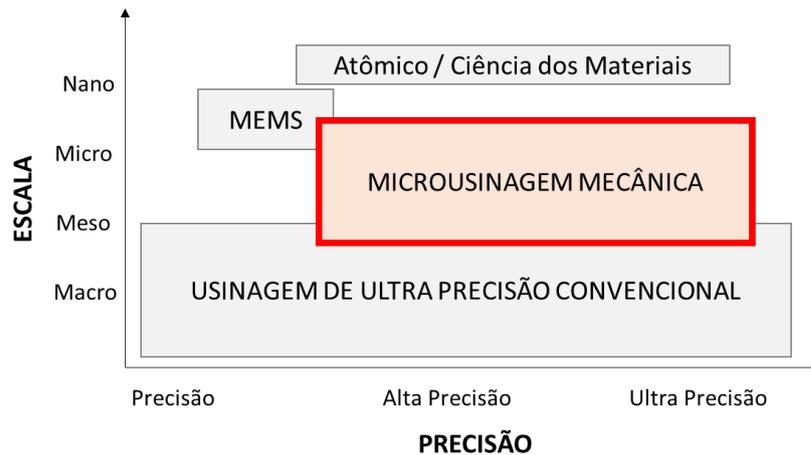


Figura 2.1 - Dimensão e precisão para diferentes processos de usinagem (adaptado de CHENG; HUO, 2013)

Cinematicamente semelhante à macrousinagem, os processos típicos de microusinagem incluem microtorneamento, microfresamento, microfuração e microrretificação. Esses quatro processos variam entre si quanto à geometria da peça, eficiência do processo e precisão alcançável, embora compartilhem muitas características comuns. Enquanto o microtorneamento e a microfuração atingem rugosidade de até 100 nm, a micro retificação e o microfresamento podem proporcionar um acabamento superficial de 10 nm (CHENG; HUO, 2013).

Recentemente, novos processos têm sido desenvolvidos para serem aplicados na microusinagem. Alguns deles são: microusinagem ultrassônica, microusinagem por descarga elétrica, microusinagem à laser e microusinagem eletroquímica. Há ainda também os processos híbridos, que combinam algumas das técnicas citadas anteriormente (SAHAI et al., 2021).

2.2. Microfresamento

O microfresamento é um dos processos de microusinagem mais flexível e versátil. É capaz de gerar uma grande variedade de microcomponentes e microestruturas complexas e em três dimensões. Em termos de tipos de operações

de fresamento, o microfresamento de topo, seja usando fresas de topo planas ou de ponta esférica, domina as principais aplicações (CHENG; HUO, 2013).

Ainda conforme Cheng e Huo (2013), mesmo que o microfresamento possa ser realizado em um centro de usinagem CNC convencional, adaptando uma turbina de alta rotação, idealmente ele deve ser feito em uma fresadora de precisão ou micro máquina especialmente projetada para fins de microfresamento. Como as microfresas são de pequeno diâmetro, elas requerem rotações extremamente altas (geralmente entre 20 000 e 200 000 rpm) para atingir velocidades de corte moderadas. Há também a exigência de um sistema de alta rigidez e baixos erros de movimento para manter elevada precisão na presença de forças de corte. A alta precisão deste processo também requer baixas temperaturas para minimizar a distorção térmica, sendo importante a realização da usinagem em um ambiente controlado.

As máquinas ferramentas exclusivas para a realização do microfresamento são chamadas de microfresadoras e possuem algumas características particulares para atender as demandas do processo. A base destes equipamentos normalmente é feita de granito, que é um material com baixo coeficiente de expansão térmica (6,5 $\mu\text{m/mK}$) e densidade de 2 800 kg/m^3 , propriedades estas que auxiliam a estabilidade térmica e dinâmica. As guias e sistemas de deslocamento geralmente são hidrostáticos ou aerostáticos para reduzir o atrito, possuem precisão menor que 0,1 μm e deslocamento máximo entre 100 mm a 1 000 mm. Para operar todo o sistema, são empregados softwares de controle e amplificação, capazes de ler, processar e comandar o posicionamento dos eixos, velocidade de deslocamento, entre outras variáveis (CHENG; HUO, 2013).

2.3. Efeito Escala

À medida que o tamanho da ferramenta e a taxa de remoção de material são reduzidos, surge o chamado efeito escala. A geometria e as características do processo mudam em comparação com a usinagem em escala convencional, impossibilitando que a micro e a macrousinagem sejam tratadas da mesma forma (BISSACCO et al., 2005). O efeito escala é um fenômeno caracterizado por um

aumento substancial da força específica ou energia específica de corte para processos de usinagem com pequenas espessuras de corte, ou seja, um reflexo do aumento da tensão de cisalhamento da peça devido à diminuição da zona de corte. Este fenômeno afeta significativamente as forças de corte e acabamento superficial de peças de trabalho (OLIVEIRA et al., 2015).

Segundo Chen et al. (2021), é amplamente aceito que o efeito escala contém três aspectos principais:

- i. A espessura de corte é comparável ao tamanho de grão, impossibilitando que o material apresente uma resposta homogênea durante o corte;
- ii. Quando a espessura de corte é comparável ao raio de aresta da ferramenta, o ângulo de saída se torna altamente negativo, resultando na ocorrência do sulcamento e cisalhamento, simultaneamente;
- iii. A formação do cavaco pode não ocorrer se a espessura de corte for menor que a espessura mínima de corte (h_m).

De acordo com o Bissacco et al. (2005), ao reduzir as dimensões da ferramenta, a quantidade de material removido em cada passagem da aresta de corte também é reduzida, enquanto o tamanho do grão do material de trabalho não diminui na mesma proporção. Portanto, enquanto que, no macrofresamento, a formação do cavaco compreende vários grãos, no microfresamento, o cavaco se forma dentro de poucos ou um único grão por vez. Este fato é comum a todos os processos de microusinagem e é mostrado esquematicamente na Fig. 2.2.

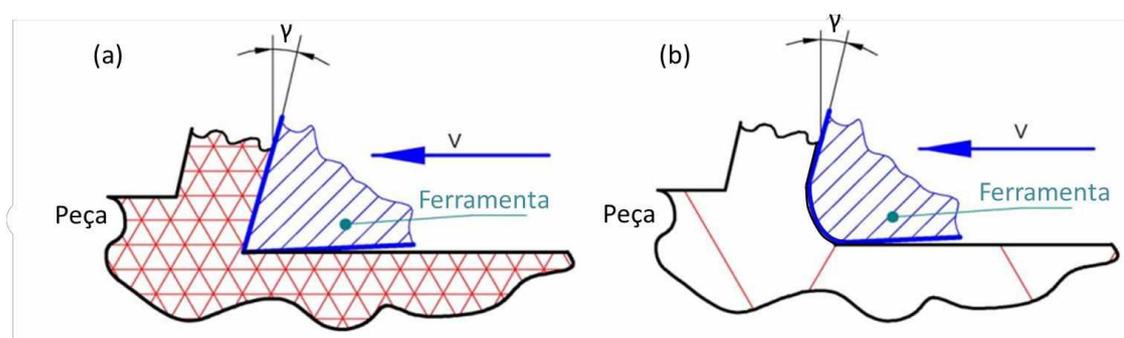


Figura 2.2 - Representação da relação entre o tamanho do grão e espessura de corte: (a) macrofresamento e (b) microfresamento (adaptado de BISSACCO, 2004 *apud* BISSACCO et al., 2005)

Quando o cisalhamento ocorre totalmente dentro de um único grão, as tensões aplicadas à ferramenta dependem da orientação individual do grão, causando flutuações das forças de corte. Caso os grãos sejam grandes o suficiente em comparação com a espessura de corte, os fenômenos de recuperação elástica também se tornam mais importantes. Portanto, a escolha de um material com tamanho de grão o menor possível e com alta homogeneidade é benéfica para o processo de microfresamento (BISSACCO et al., 2005).

Outra face importante do efeito escala é que o raio da aresta de corte é relativamente grande se comparado ao diâmetro da ferramenta e a aresta de corte não pode ser considerada perfeitamente afiada. Isso é comumente chamado de efeito escala da aresta de corte. Como resultado, na microusinagem, a espessura de corte é muitas vezes menor que o raio da aresta de corte e o cavaco se forma no raio da própria aresta, experimentando um ângulo de saída (γ) altamente negativo, conforme é mostrado na Fig. 2.3 (BISSACCO et al., 2005).

Na Fig. 2.3 (a), está representado o corte na macrousinagem, no qual o ângulo efetivo de saída corresponde ao nominal. Já na Fig. 2.3 (b), é esquematizado um processo de microusinagem, onde o ângulo de saída efetivo (γ_o) é altamente negativo, diferindo do ângulo de saída nominal da ferramenta.

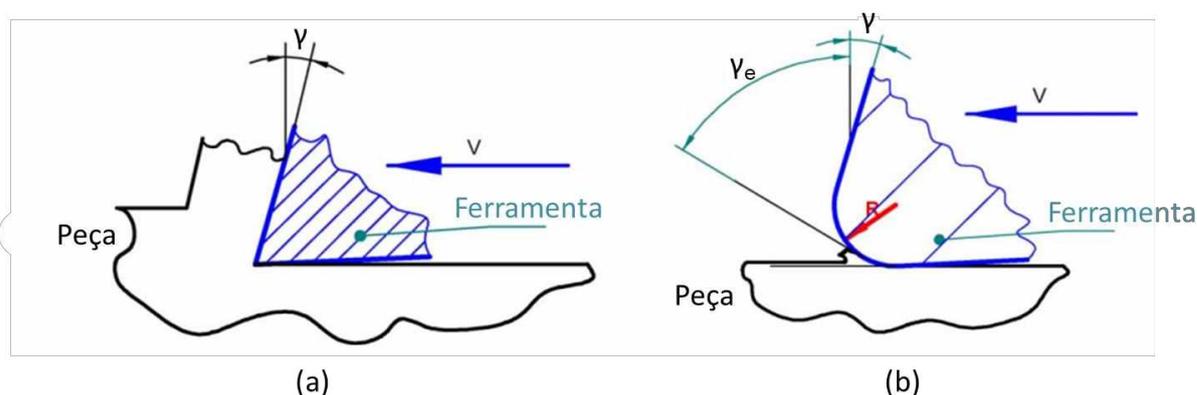


Figura 2.3 – Efeito do raio de aresta: (a) macrousinagem, (b) microusinagem (adaptado de BISSACCO, 2004 *apud* BISSACCO et al., 2005)

Komatsu et al. (2012) investigaram o efeito da microestrutura do aço inoxidável no microfresamento. Os autores avaliaram a força de corte para o mesmo material com duas microestruturas, normal e grãos ultrafinos. Foi utilizado microfresa de topo esférico, fabricada em metal duro, com 0,8 mm de diâmetro e revestida com TiAlN. Os autores concluíram que a força de cisalhamento para o material com microestrutura refinada foi menor, visto que o corte ocorria em mais de um grão. Enquanto, no material com microestrutura normal, havia a tendência de cisalhamento do próprio grão, que elevava as forças envolvidas.

2.3.1. Formação do Cavaco

Em um processo de usinagem, para que ocorra a formação do cavaco, são necessárias algumas etapas. Primeiramente, quando a cunha cortante entra em contato com a peça, uma parte do material é pressionado contra a superfície de saída promovendo o recalque inicial. Em seguida, o material pressionado sofre uma deformação elástica inicial, que acentua progressivamente até que haja ruptura do material. Na próxima etapa, ocorre o deslizamento das lamelas e a saída do cavaco (MACHADO et al., 2009). Para que haja a formação do cavaco, é necessário que a espessura de corte seja próxima o suficiente da espessura mínima necessária para formar cavaco.

Espessura mínima de corte pode ser definida como a espessura de corte ou avanço necessária para que o cavaco se forme (CHAE et al., 2006). Baseado neste conceito, a espessura de corte é o elemento central que diferencia os comportamentos de remoção de material em processos de micro e macrousinagem. Quando a espessura de corte (h) é menor que a mínima para formação do cavaco (h_m), o material da peça, em vez de ser removido na forma de cavaco, sofre atrito e deformação elástica. Para a microusinagem, a espessura de corte geralmente varia entre 0,1 μm e 50 μm , já para a usinagem em escala macro, estes valores são entre 0,1 mm e 1 mm (CHEN et al., 2021).

Por conta disso, Chen et al. (2021) afirmam que a redução da escala macro para a micrométrica faz com que alguns comportamentos desprezíveis na macrousinagem não possam ser ignorados na microusinagem. Isso também resulta

em comportamentos de remoção de material diferentes e ainda mais complicados no processo de microcorte. Com base em diferentes relações $h-h_m$, a Fig. 2.4 representa os possíveis comportamentos que o material pode apresentar na microusinagem.

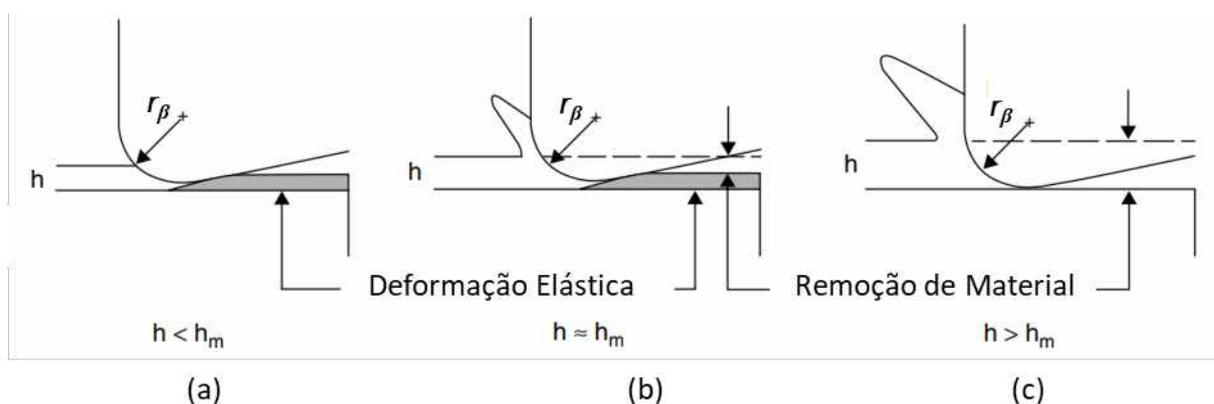


Figura 2.4 - Formação do cavaco em relação a mínima espessura de corte (adaptado de CHAE et al., 2006)

Quando a espessura de corte é menor que uma espessura mínima necessária para formar cavaco, como mostrado na Fig. 2.4 (a), ocorre deformação elástica e a microfresa não remove nenhum material da peça. Quando a espessura de corte se aproxima da espessura mínima, os cavacos são formados por cisalhamento do material, com alguma deformação elástica ainda ocorrendo, como ilustrado na Fig. 2.4 (b). Como resultado, a espessura de material removido é menor que a desejada. No entanto, quando a espessura de corte aumenta além da mínima, o fenômeno de deformação elástica diminui significativamente e toda a profundidade de corte é removida em forma de cavaco, assim como é representado na Fig. 2.4 (c) (CHAE et al., 2006).

De acordo com Chae et al. (2006), o valor da espessura mínima para formação de cavaco depende do raio da aresta de corte e do material da peça de trabalho. Desta forma, apesar de conhecer o raio da aresta da ferramenta, é muito difícil medir diretamente a espessura mínima durante o processo. Contudo, alguns autores têm tentado obter este valor. Oliveira et al. (2015) avaliaram o efeito escala

e a mínima espessura de corte no microfresamento do aço AISI 1045. Eles concluíram que o valor de h_m variou proporcionalmente ao raio de aresta da ferramenta, obtendo resultados entre 25 % e 33% do raio.

Quando o cavaco não é perfeitamente cisalhado, ocorre o fenômeno denominado sulcamento. Este fenômeno é definido como uma deformação plástica do material da peça sem de fato ocorrer a formação do cavaco (WEGENER, 2014). O regime de sulcamento é o mecanismo mais indesejado, pois resulta em acabamento superficial extremamente ruim e desgaste da ferramenta muito alto devido as elevadas forças de corte, alto atrito e alta temperatura durante a usinagem. Ao contrário da macrousinagem, os processos de microusinagem estão sujeitos a regimes consideráveis de sulcamento (O'TOOLE et al., 2020).

2.3.2. Pressão Específica de Corte

Um outro aspecto importante da influência do efeito escala nos processos de microusinagem é o efeito na pressão específica de corte. Em usinagem, a pressão específica de corte é a força necessária para a remoção de uma área de corte equivalente a 1 mm^2 , sendo esta área afetada pela espessura de corte (MACHADO et al., 2009).

Conforme Ferraresi (1970), quanto menor o avanço maior a pressão específica de corte, ou seja, mais energia por volume de material removido é necessária para remoção de cavaco. Além disso, este comportamento não é linear, portanto, reduções no avanço promovem aumentos significativos na energia específica de corte, conforme é mostrado na Fig. 2.5. Sendo assim, em microusinagem, onde os valores de avanço são extremamente baixos, a pressão específica de corte tende a ser bastante elevada, podendo resultar em deflexões excessivas das ferramentas e desgaste prematuros da aresta de corte (CHAE et al., 2006)

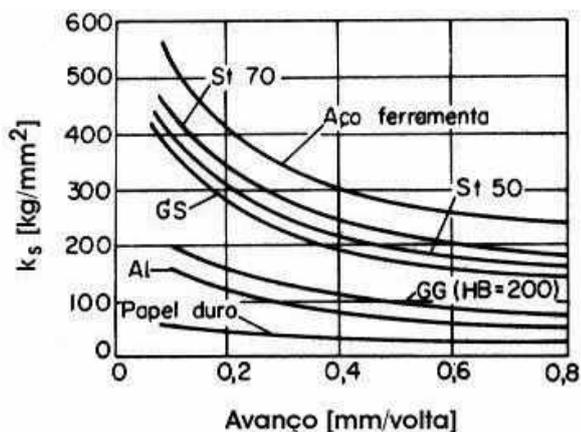


Figura 2.5 - Variação da energia específica de corte com o avanço para diferentes materiais, segundo AWF 158 (FERRARESI,1970).

Sahoo et al. (2020) investigaram o efeito escala no microfresamento de aços para matrizes P-20, levantando a curva da pressão específica de corte em função da espessura de corte e do raio de aresta (r_β) da ferramenta (a razão entre estas grandezas), conforme mostrado na Fig. 2.6. Os autores observaram que para valores muito pequenos de h/r_β há um aumento significativo da pressão específica, pois há predominância do sulcamento. Desta forma, é possível concluir que há um gasto grande de energia, porém não ocorre remoção de material, logo esta energia é redundante para o processo.

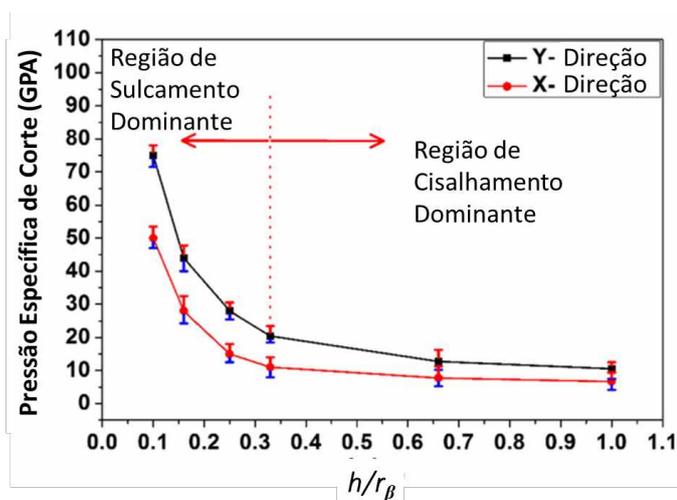


Figura 2.6 - Variação da pressão específica de corte em função da razão h/r_β (adaptado de SAHOO et al. 2020)

2.4. Rugosidade

A rugosidade superficial pode ser definida como finas irregularidades ou erros microgeométricos resultantes da ação inerente do processo de corte, como marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, entre outros (MACHADO et al., 2009).

A rugosidade superficial, dentre outras funções, tem sido utilizada para avaliar a qualidade das superfícies usinadas. Por esta razão, ela tem sido estudada por décadas, tendo sido objeto de diversos trabalhos teóricos e experimentais. Os parâmetros de rugosidade podem ser calculados em duas dimensões (2D) ou em três dimensões (3D) (GADELMAWLA et al., 2002).

Ainda segundo Gadelmawla et al. (2002), um dos parâmetros de rugosidade mais conhecidos e utilizados é o Ra, que corresponde à média aritmética da altura das irregularidades. Ele é definido como a média absoluta dos desvios causados pelas irregularidades superficiais a partir da linha média de todo o comprimento avaliado. É um parâmetro fácil de definir, de medir e confere um bom entendimento sobre a superfície usinada. Por conta disso, é o parâmetro mais utilizado para avaliar rugosidade no controle de processos.

Segundo Aramcharoen e Mativenga (2009), o desempenho dos microcomponentes fabricados depende essencialmente da qualidade das superfícies geradas durante o microfresamento. A rugosidade da superfície é um importante critério de qualidade de peças funcionais, por isso tem sido o alvo de diversas pesquisas.

A relação entre a espessura de corte e o raio da aresta de corte influencia a qualidade da superfície usinada. O valor máximo de tal relação ao longo do corte é frequentemente muito baixo e é próximo de zero no início do fresamento discordante e no fim do fresamento concordante. Nos pontos onde a razão entre espessura de corte e raio de aresta é muito baixa, predomina o efeito sulcamento, prejudicando a qualidade da superfície usinada e elevando a rugosidade. Isso ocorre também no fresamento convencional, porém a diferença básica é a porção do material onde este efeito ocorre, sendo muito maior no microfresamento (BISSACCO et al., 2005).

Para atingir baixos valores de rugosidade na cadeia produtiva, pode ser necessário o uso de operações de acabamento. Assim, etapas adicionais de fabricação, como polimento, geralmente são caras e ainda precisam ser realizadas manualmente. Para projetar uma linha de produção otimizada, os valores de rugosidade resultantes de cada processo devem ser conhecidos. No entanto, há um grande número de fatores capazes de influenciar cada etapa da fabricação e a previsão desses valores é um desafio. Parâmetros de corte, seleção do material, dinâmica do processo e geometria da ferramenta de corte e tipo de revestimento são variáveis decisivas (MEIJER et al., 2019).

A vibração é também um fator importante na qualidade da superfície usinada. Seu efeito está amplamente presente em vários processos de usinagem e impacta não somente a rugosidade superficial, como também a produtividade do processo. Fortes níveis de vibração podem ocorrer durante o contato da ferramenta com a peça, fator que pode elevar a espessura de corte e as forças de corte. Altos níveis de força de corte e instabilidade causada pela vibração são responsáveis por elevar a rugosidade da superfície e aumentar o desgaste da ferramenta (LIU et al., 2017; YUE et al., 2019).

2.4.1. Influência dos Parâmetros de Corte na Rugosidade

Como mencionado anteriormente, os parâmetros de corte desempenham grande papel sobre a rugosidade da superfície usinada, sendo o avanço, a velocidade de corte (ou rotação) e a profundidade de corte os mais influentes e estudados. Chen et al. (2020) avaliaram o comportamento da rugosidade (R_a) ao variar os parâmetros mencionados anteriormente durante o microfresamento de cobre puro (99,9 % Cu). Para tal, os autores utilizaram microfresas de metal duro com 0,5 mm de diâmetro. Os resultados obtidos pelos autores estão sumarizados na Fig. 2.7.

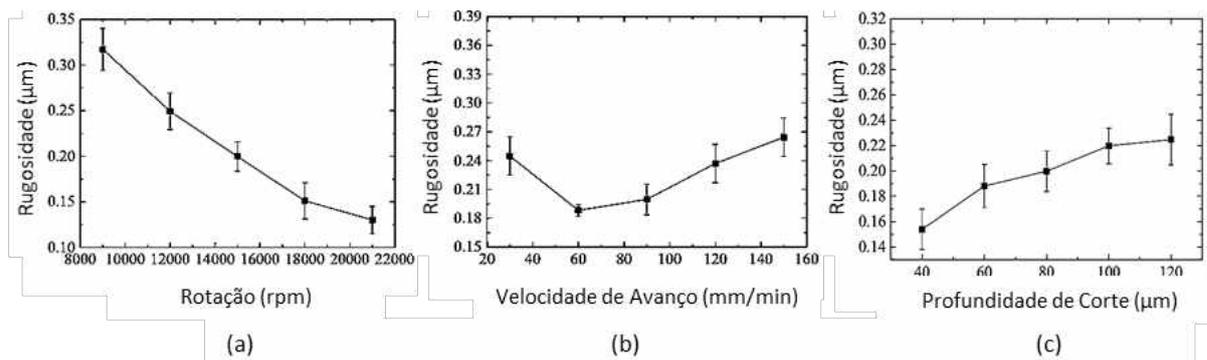


Figura 2.7 - Relação entre rugosidade superficial e parâmetros de corte: (a) rotação, (b) velocidade de avanço, (c) profundidade de corte (adaptado de CHEN et al., 2020)

Ainda sobre o trabalho de Chen et al. (2020), os autores concluíram que a rugosidade superficial no fundo do canal apresentou uma tendência decrescente em relação ao acréscimo na rotação (Fig. 2.7-a) e mostrou uma tendência crescente com o aumento da profundidade de corte (Fig. 2.7-c). Ao aumentar o avanço, também foi notada um comportamento crescente da rugosidade. (Fig. 2.7-b) No entanto, houve primeiro uma queda devido à redução do sulcamento juntamente com a recuperação elástica quando a taxa de avanço era menor que o raio da aresta de corte da ferramenta. Em sequência, após a taxa de avanço exceder o raio da aresta de corte, a curva se inverteu e passou a apresentar comportamento de alta devido ao processo de cisalhamento. Alta rotação, pequena profundidade de corte e avanço moderado próximo ao raio da aresta de corte da ferramenta tendem a ser favoráveis para melhorar a qualidade da superfície dos microcanais.

2.4.2. Modelos Matemáticos para a Rugosidade

Devido a importância da qualidade para o processo de microfresamento, vários autores têm estudado formas de prever os resultados de rugosidade. Para tal, eles utilizam modelos matemáticos e computacionais. De acordo com Meijer et al. (2019), os primeiros modelos desenvolvidos consideravam apenas o avanço por dente e o raio de ponta da ferramenta (r_ϵ). O mais tradicional dos modelos conhecidos foi proposto por Vyas e Show (1997) e está representado na Equação

2.1. Neste modelo, a rugosidade considerada é R_t (altura total do perfil) e foi desenvolvido baseando-se principalmente no torneamento em escala macro.

$$R_t = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (2.1)$$

Embora não sejam considerados a ocorrência de sulcamento, desvio da ferramenta ou propriedades geométricas da aresta de corte, essas equações já fornecem uma aproximação da rugosidade teórica. Para o cálculo da rugosidade teórica em processos de fresamento de topo, as arestas secundárias de corte precisam ser levadas em consideração para uma previsão bem fundamentada da profundidade teórica de rugosidade (MEIJER et al., 2019).

Buscando adaptar e otimizar as equações existentes, Meijer et al. (2019) desenvolveram o modelo da Equação 2.2. Para tal, eles se basearam na seção transversal bidimensional da geometria da microfresa e desenvolveram o modelo para obter a maior profundidade ao longo da direção de avanço, conforme representado na Fig. 2.8. Além do avanço e o raio de ponta, consideraram também o ângulo de posição secundário ($\chi_{r'}$), pois ele desempenha um papel decisivo na topografia da superfície.

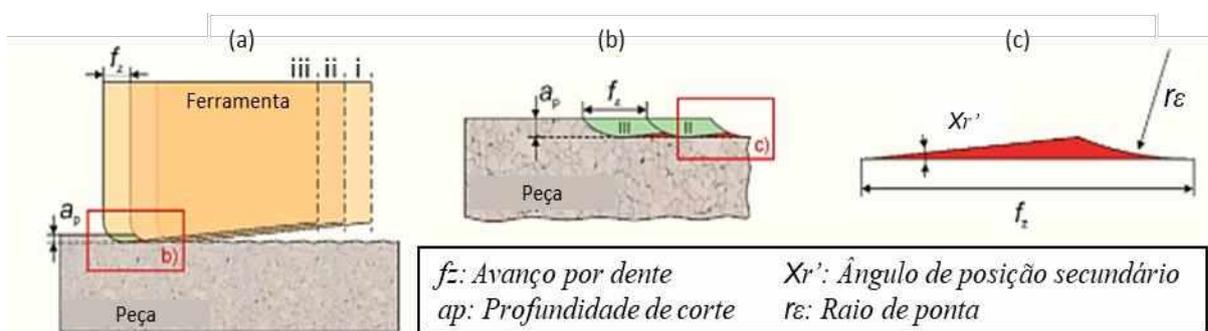


Figura 2.8 - Representação esquemática do microfresamento na direção de avanço: (a) contato ferramenta-peça, (b) dois dentes consecutivos, (c) marca de avanço e parâmetros com maior influência (adaptado de Meijer et al., 2019).

$$R_t = \frac{2 \cdot \left(r_\varepsilon + \frac{f_z}{\tan(\chi_{r'})}\right) \pm \sqrt{\left(-2 \cdot \left(r_\varepsilon + \frac{f_z}{\tan(\chi_{r'})}\right)\right)^2 - 4 \cdot \left(1 + \frac{f_z}{\tan^2(\chi_{r'})}\right) \cdot f_z^2}}{\left(1 + \frac{1}{\tan^2(\chi_{r'})}\right)} \quad (2.2)$$

2.5. Formação e Classificação das Rebarbas

As rebarbas podem ser definidas como uma crista ou borda irregular formada em um material através da ação de máquina ou ferramenta. O material pode ser metal, madeira, plástico ou qualquer outra substância que passe por processos de usinagem. De maneira geral, na usinagem, rebarbas são definidas como materiais plasticamente deformados, sendo geradas nos cantos e arestas da peça como resultado do fluxo plástico das operações de corte e cisalhamento e que requerem atenção e pós-operações para remoção (JIN et al., 2020).

O'Toole et al. (2020) afirmam que as rebarbas afetam significativamente a qualidade da superfície usinada, reduzindo a capacidade da peça de atingir o desempenho desejado e, portanto, a funcionalidade necessária. O efeito é ainda mais significativo em microescala para componentes precisos e de forma livre; no entanto, a redução, caracterização e avaliação de rebarbas continuam sendo tarefas desafiadoras para o processo de microfresamento.

Além disso, a formação de rebarbas não apenas diminui a qualidade da superfície da peça usinada e da montagem, mas também aumenta o custo de produção em até 9 % do custo total de usinagem. Isso se deve a uma segunda operação de usinagem, chamada de rebarbação, que pode ser necessária para remover o material indesejado. Devido à complexidade e o grau de rebarbação que dependem de vários fatores, incluindo tamanho, localização e material, o foco das pesquisas têm sido a redução e a eliminação total das rebarbas durante o processo de microusinagem, seja por meio de melhorias da geometria da ferramenta ou otimização de parâmetros de corte (O'TOOLE et al., 2020)

No microfresamento, as rebarbas podem ser classificadas quanto a sua posição e quanto ao tipo. Quanto à posição das rebarbas, elas são divididas em oito categorias, conforme retratado na Fig. 2.9. Entretanto, cinco delas são consideradas

mais importantes que as demais para o processo de microfresamento: rebarba de entrada lateral concordante, rebarba de topo concordante, rebarba de topo discordante, rebarba de saída e rebarba de saída lateral discordante. As demais, rebarba de entrada lateral discordante, rebarba de entrada e rebarba de saída lateral concordante, são consideradas secundárias nas análises por apresentarem uma quantidade muito pequena após a usinagem (LEE; DORNFELD, 2002).

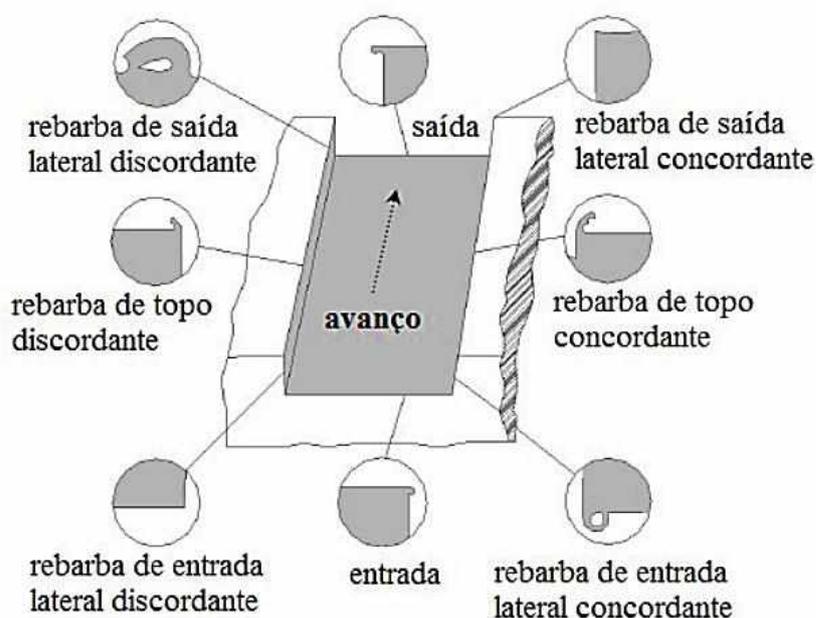


Figura 2.9 - Classificação das rebarbas quanto à posição (adaptado de LEE; DORNFELD, 2002).

Quanto ao tipo da rebarba no microfresamento, a classificação mais comumente adotada foi proposta por Chern et al. (2006) e engloba quatro tipos. É apresentado na Fig. 2.10 as nomenclaturas utilizadas pelos autores, sendo elas: rebarba primária (Fig. 2.10-a), rebarba do tipo agulha (Fig. 2.10-b), rebarba do tipo pena (Fig. 2.10-c) e rebarba menor (Fig. 2.10-d).

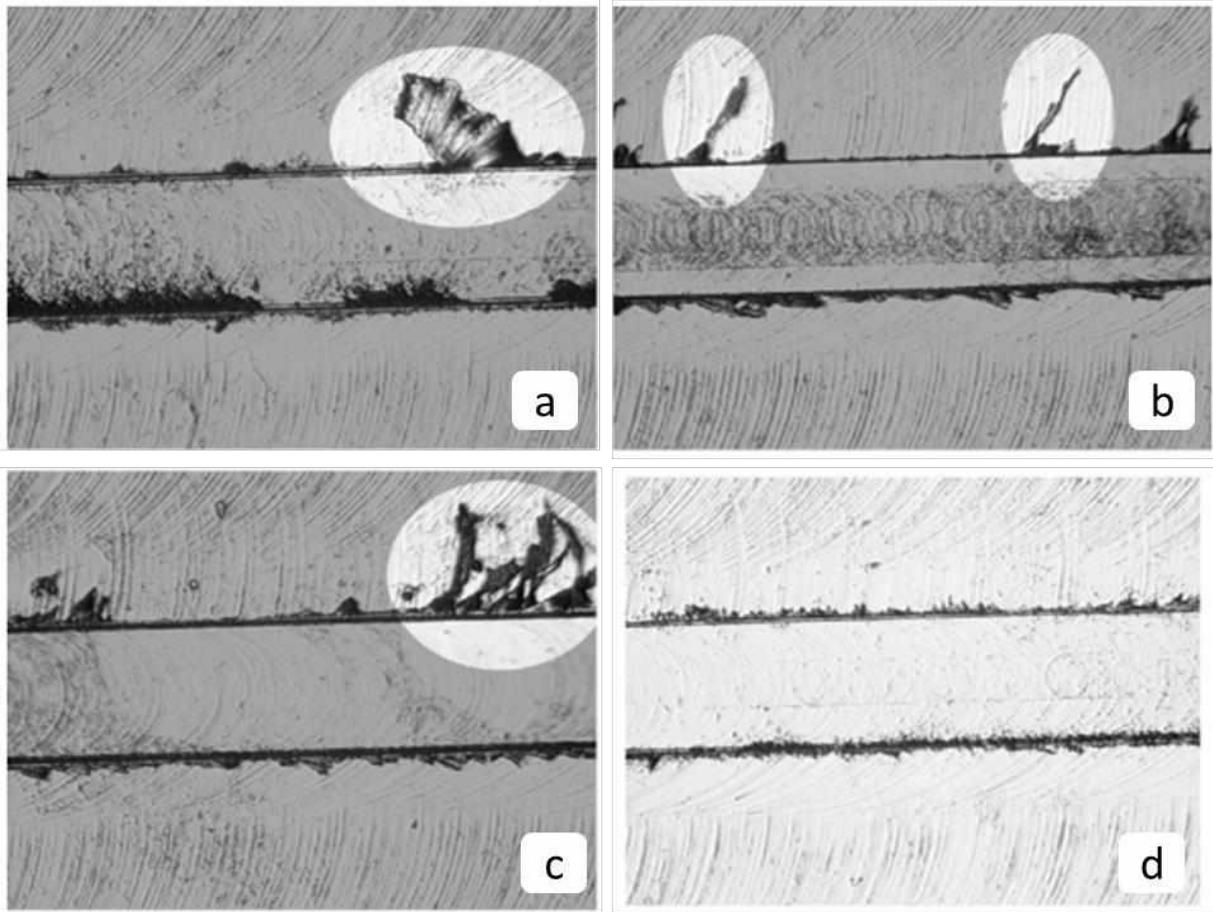


Figura 2.10 - Classificação das rebarbas quanto ao tipo: (a) primária, (b) agulha, (c) pena e (d) menor (CHERN et al. 2006)

Chern et al. (2006) também descreveram as etapas de formação de rebarbas, sendo o processo para formação de rebarbas primárias apresentado na Fig. 2.11. Quando a microfresa não produz um cavaco, o atrito torna-se predominante. O material à frente do caminho da ferramenta é comprimido e deformado plasticamente (Fig. 2.11-a) e, em seguida, é fraturado próximo ao meio (Fig. 2.11-b). A rebarba primária é virada (Fig. 2.11-c) e formada com uma largura de aproximadamente metade do diâmetro da ferramenta (Fig. 2.11-d). Se ocorrer fratura na rebarba primária durante o processo de microusinagem, forma-se rebarba em forma de pena ou rebarba em forma de agulha. A rebarba menor é criada quando a penetração de trabalho e a taxa de avanço são muito pequenos.

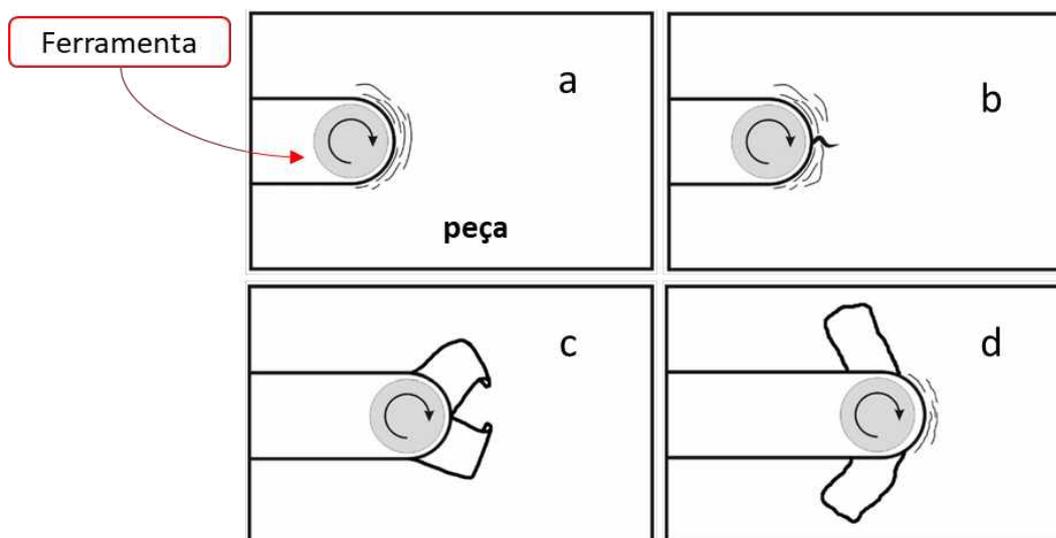


Figura 2.11 - Representação do processo de formação de rebarbas primárias (adaptado de CHERN et al. 2006)

2.5.1. Métodos de Medição de Rebarbas

Não existe na literatura ou normas técnicas um consenso para medição das rebarbas formadas em microssinagem. Métodos não destrutivos, incluindo sistemas mecânicos e óticos podem ser muito úteis para medição de rebarba (MEDEOSSI et al., 2018).

Silva e Da Silva (2019) avaliaram a formação de rebarbas no microfresamento do aço inoxidável duplex UNS S32205. Utilizaram um sistema mecânico ao mensurar as rebarbas, que foi o perfilômetro de contato, para avaliar a altura das rebarbas de topo, conforme apresentado na Fig. 2.12. Contudo, MedeoSSI et al. (2018) afirmam que os métodos de medição com sistemas mecânicos possuem aplicação limitada, visto que as rebarbas podem ser destruídas ou dobradas devido ao contato. Além disso, este tipo de medição permite obter apenas a altura das rebarbas e, devido a forma do apalpador, o perfil delas pode ser distorcido. Outra desvantagem é que os sistemas mecânicos exigem diversas medições para elevar a acuracidade, tornando o método muito demorado.

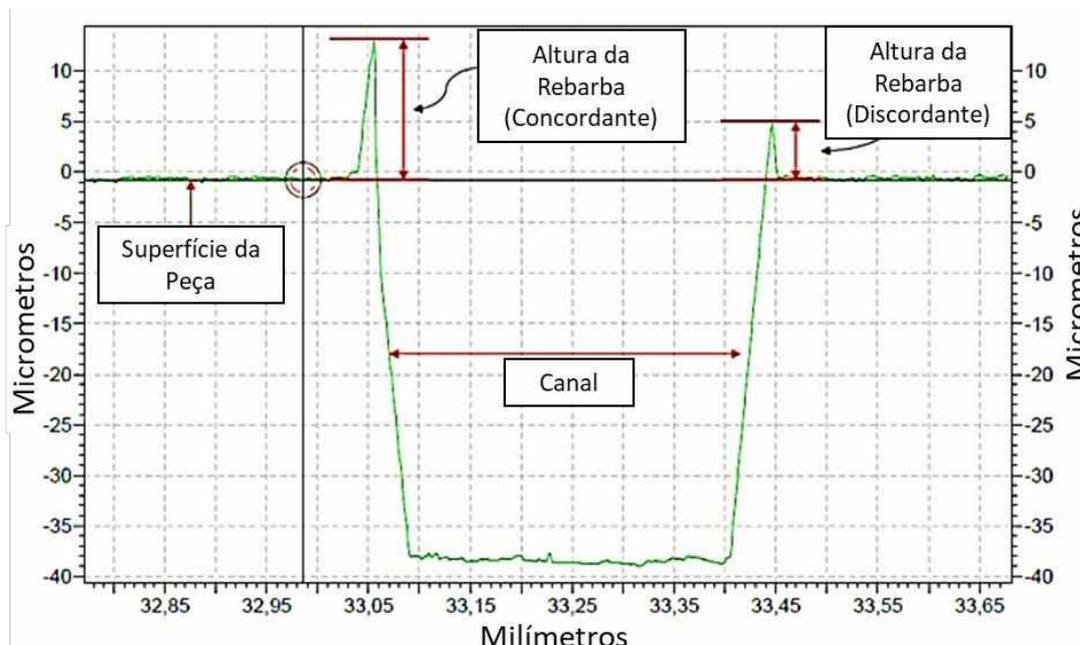


Figura 2.12 - Quantificação da rebarba utilizando perfilômetro de contato (adaptado de SILVA; DA SILVA, 2019)

Vários sistemas ópticos para detectar ou medir rebarbas estão disponíveis, os quais não modificam as rebarbas durante as operações de medição. Os sistemas ópticos mais utilizados são os sistemas de câmeras, microscopia eletrônica de varredura, triangulação a laser e microscopia confocal (MEDEOSSI et al., 2018).

Muhammad et al. (2021), em trabalho experimental com o microfresamento da liga de níquel Inconel 718 utilizando microfresa de metal duro de 0,5 mm, mediram a largura das rebarbas para quantificá-las e avaliar o efeito dos parâmetros de corte e revestimento da ferramenta. Os autores utilizaram o microscópio eletrônico de varredura em diferentes ampliações de acordo com a largura da rebarba no ponto desejado. A largura máxima foi medida para cada canal, conforme mostrado na Fig. 2.13

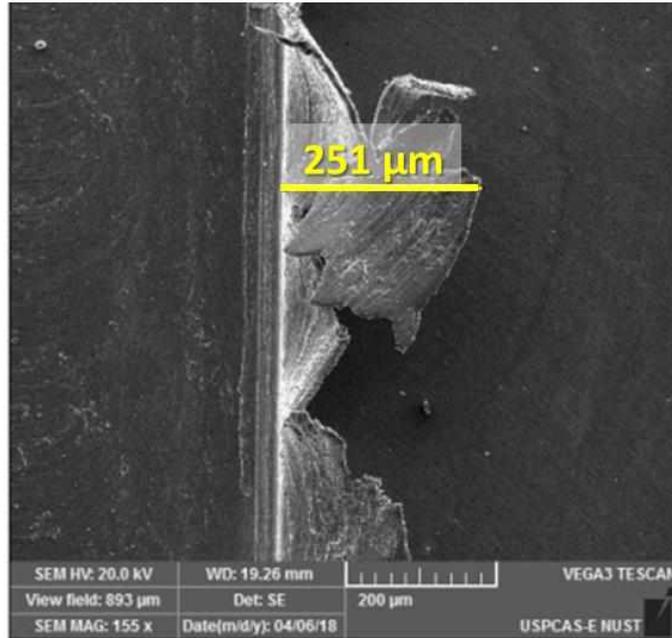


Figura 2.13 - Método de medição da largura da rebarba (adaptado de MUHAMMAD et al., 2021)

Outro método ótico de medição de rebarbas e que também utiliza a análise de imagens foi usado por Dos Santos (2020). O método consiste em utilizar uma foto das rebarbas no MEV e trabalhá-la em um software de edição de imagens. Nesta etapa, as rebarbas, tanto concordante quanto discordante, são isoladas do restante da imagem e são binarizadas na sequência. Em seguida, a área é calculada baseada na escala da foto. As etapas descritas são mostradas na Fig. 2.14, para um canal microfresado.



Figura 2.14 - Quantificação das rebarbas por medição de área: (a) imagem obtida no MEV; (b) isolamento da rebarba; (c) binarização e medição (Dos Santos, 2020)

2.5.2. Influência dos Parâmetros de Corte na Formação de Rebarbas

Assim como a rugosidade, as rebarbas também são fortemente influenciadas pelos parâmetros de corte. Chen et al. (2020) avaliaram o comportamento das rebarbas de topo no microfresamento ao variar a velocidade de corte (14 m/min a 33 m/min), avanço por dente (1 $\mu\text{m}/\text{dente}$ a 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$) e profundidade de corte (40 μm a 80 μm). Os autores utilizaram ferramenta de metal duro com 0,5 mm de diâmetro para usinar cobre puro. Os resultados que eles obtiveram estão resumidos nos gráficos da Fig. 2.15, sendo a largura o parâmetro para avaliação das rebarbas.

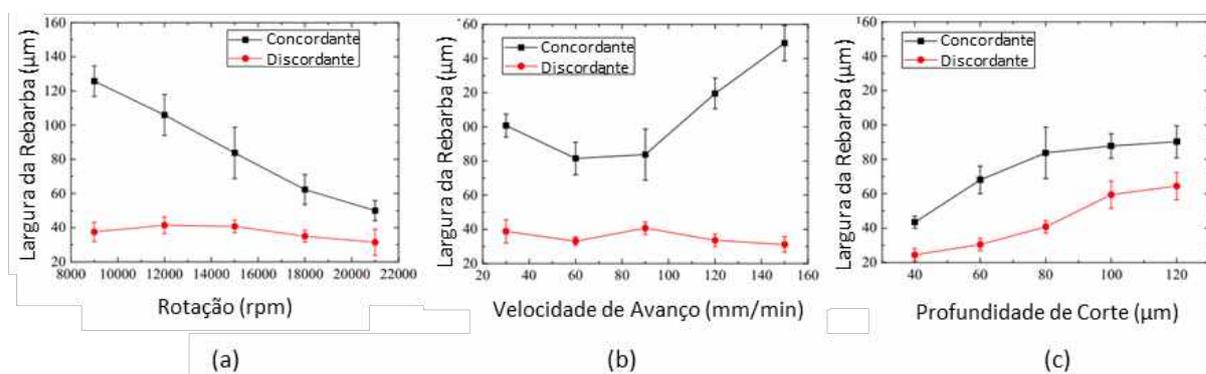


Figura 2.15 - Relação entre largura da rebarba e parâmetros de corte: (a) rotação, (b) avanço, (c) profundidade de corte (adaptado de CHEN et al., 2020)

Ao aumentar a rotação, há um tempo menor para deformação do material, o atrito entre a peça e a ferramenta reduz, modificando também as forças envolvidas. O processo se torna mais estável, reduzindo a quantidade de material deformado plasticamente e promovendo um decréscimo das rebarbas. Para pequenos valores de profundidade de corte, o volume de rebarbas formadas é baixo. Contudo, ao aumentar o a_p , tanto a rebarba discordante quanto a concordante sofrem aumento devido ao aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça, que, por sua vez, aumenta o volume de material deformado. Já para o avanço, valores muito baixos (menores que o raio de aresta), há o predomínio do sulcamento, enquanto valores muito altos facilitam a formação de cavaco maiores e mais espessos. Em ambos os casos, há aumento das rebarbas de topo (CHEN et al., 2020).

A otimização dos valores dos parâmetros de corte é a melhor maneira de minimizar as dimensões das rebarbas. A formação de rebarbas de topo pode ser reduzida adotando-se uma pequena razão entre a profundidade axial de corte e o raio de aresta. Alterações na geometria da microfresa, uso de fluidos de corte, resfriamento criogênico, entre outras técnicas, também auxiliam no controle de rebarbas (KUMAR et al., 2017).

2.6. Microfresa

As fresas são um dos tipos de ferramentas rotativas empregadas na usinagem de materiais. Sua constituição se dá por uma série de dentes e arestas, geralmente dispostos simetricamente em torno de um único eixo. Os dentes e arestas removem o material de modo alternado, transformando-a numa peça acabada, com a forma e dimensões desejadas (CIMM, 2011). Nos processos de microfresamento são utilizadas variações em escala micrométrica das fresas, que são chamadas microfresas, com diâmetro na ordem de micrometros, conforme representado na Fig. 2.16.

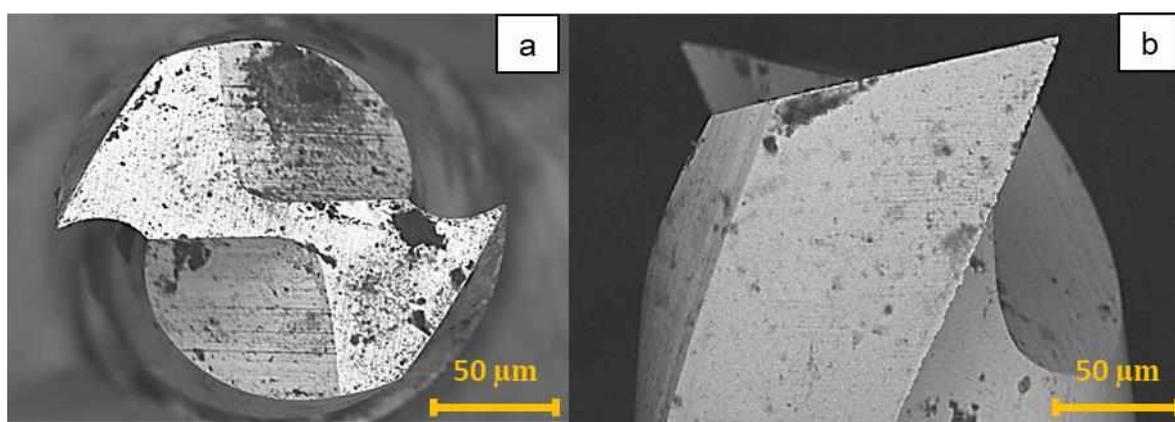


Figura 2.16 - Microfresa de metal duro sem revestimento com 254 µm (0,01”) de diâmetro: (a) superfície secundária de folga e (b) superfície principal de folga. (Ampliação de 800x)

A microfresa é determinante para o microfresamento, pois influencia o tamanho das peças e afeta também a rugosidade da superfície. Na maioria dos

casos, o microfresamento é realizado com fresas de topo plano (para produzir componentes bidimensionais) ou fresas de topo esférico (para peças tridimensionais), geralmente com duas ou quatro arestas. As ferramentas de microfresamento comercialmente disponíveis têm o diâmetro variando de 25 a 1 000 μm . Em geral, a literatura relata raios de aresta de ferramenta variando de 1 a 3 μm , mas é possível encontrar microfresas com raio muito pequeno, 0,5 μm , ou muito maiores, 10 μm (CÂMARA et al., 2012; CHENG; HUO, 2013).

Segundo Câmara et al. (2012), as microfresas são produzidas por usinagem de descarga elétrica a fio com posterior retificação. No que diz respeito ao material da ferramenta, o diamante monocristalino é indicado para ligas não ferrosas, enquanto o carboneto de tungstênio de granulação fina é recomendado para aços. As ferramentas de metal duro, seja com ou sem revestimento, são as mais utilizadas, conforme representado na Fig. 2.17, onde são mostrados os principais materiais utilizados em microfresas.

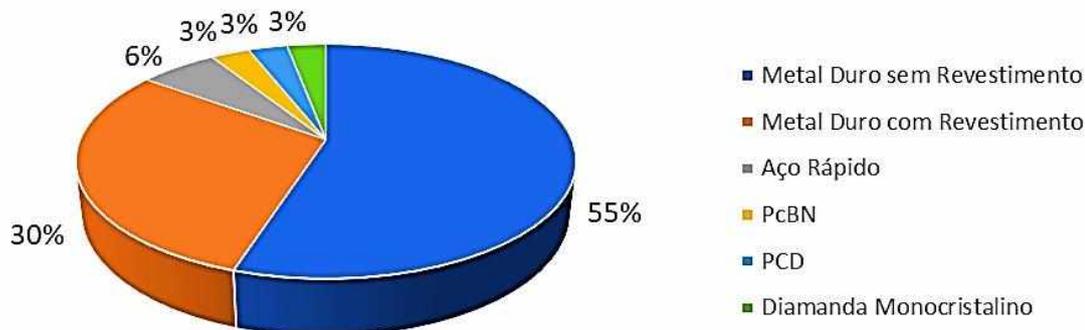


Figura 2.17 - Principais materiais utilizados em microfresas (adaptado de CÂMARA et al., 2012)

De acordo Machado et al. (2009), as ferramentas de corte têm sua geometria definida por sete ângulos principais (ângulo de posição primário, ângulo de posição secundário, ângulo de ponta, ângulo de cunha, ângulo de saída, ângulo de folga e ângulo de inclinação) e dois raios (raio de aresta e raio de ponta). As variações nos parâmetros geométricos de uma ferramenta de corte podem influenciar na formação do cavaco, saída do cavaco, formação de rebarbas, forças de corte, desgaste da ferramenta e qualidade final da peça usinada.

A cabeça da microfresa, destacada na Fig. 2.18, é a porção da ferramenta que de fato realiza o corte. Nela estão contidas as arestas de corte (principal e secundária), superfícies de saída e de folga. Esta parte da ferramenta exige tolerância dimensional do diâmetro muito estreita, pois qualquer falta de precisão na ferramenta pode resultar no corte imperfeito do material e erros dimensionais na peça fabricada (CHEN et al., 2021)

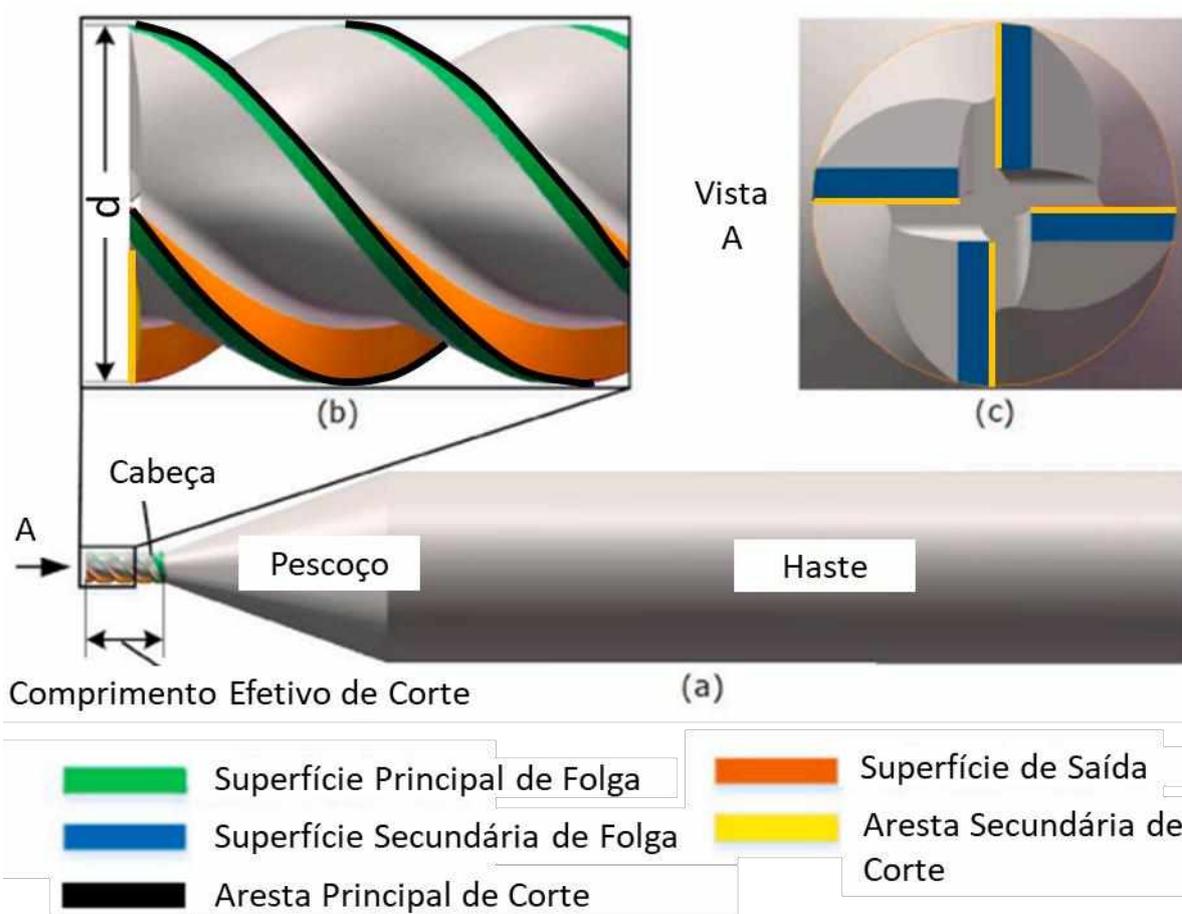


Figura 2.18 – Geometria genérica de uma microfresa de 4 arestas: (a) ferramenta inteira, (b) vista lateral e (c) vista de topo (adaptado de CHEN et al., 2021)

Conhecer a geometria da ferramenta é importante, pois ela determina a qualidade final do microfresamento. Uma das características mais influentes no processo de microfresamento é o raio de aresta. Aramcharoen e Mativenga (2009) estudaram o comportamento da geometria da ferramenta ao realizar o

microfresamento do aço H13 com ferramenta de metal duro de 0,9 mm de diâmetro. Foi avaliado o comportamento da rugosidade em relação à razão entre a espessura de corte e o raio de aresta e levantaram a curva contida na Fig. 2.19. É possível notar que altos valores do raio de aresta (lado esquerdo do gráfico) elevam os valores de Ra devido ao aumento do sulcamento. Os autores concluíram também que existe uma relação entre o h e r_β que proporciona a menor rugosidade. Neste caso, o ponto de rugosidade ótima foi $h/r_\beta = 1$.

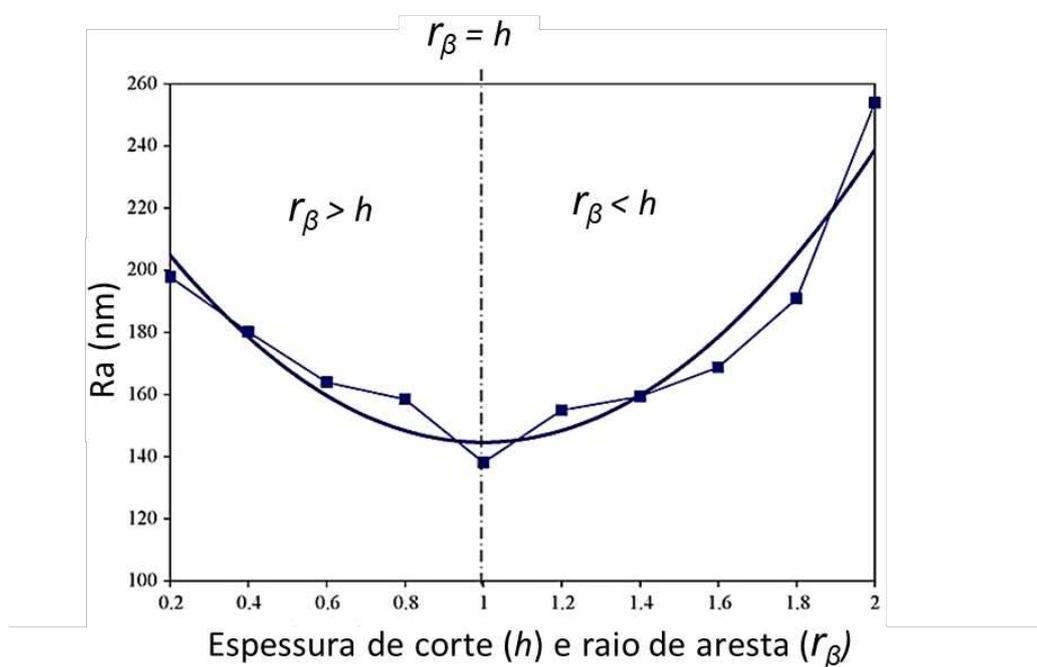


Figura 2.19 - Rugosidade superficial (R_a) em razão da razão entre espessura de corte (h) e raio de aresta (r_β) (adaptado de ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009)

Sahoo et al. (2020) também analisaram a relação da espessura de corte em relação ao raio de aresta da ferramenta. Eles investigaram o microfresamento do aço para matrizes P-20, utilizando microfresas de metal duro, com diâmetro de 0,6 mm, revestidas com TiAlN e com raio de aresta igual a 3 μm . Diferentemente do comportamento mostrado na Fig. 2.19, os autores obtiveram h/r_β igual a 0,33 como sendo o ponto de rugosidade superficial ótima. Estes resultados indicam que a seleção correta da ferramenta, principalmente em relação ao raio de aresta, pode ter grande efeito na rugosidade da superfície.

2.6.1. Revestimento das Microfresas

O revestimento de ferramentas de corte consiste na aplicação de uma ou mais camadas de material sobre a superfície da ferramenta, garantindo características tenazes no núcleo e duras, resistentes ao desgaste e quimicamente inertes na superfície. O revestimento de ferramentas de metal duro ganhou importância muito grande, pois ele pode garantir uma performance bem superior à ferramenta sem revestimento na usinagem de metais (MACHADO et al., 2009).

Revestimentos têm sido comumente aplicados em microfresas com o intuito de reduzir o desgaste da ferramenta e melhorar a performance do processo. Os revestimentos aplicados nas microferramentas podem ser classificados em revestimentos de diamante ou cerâmicos. Sobre os revestimentos cerâmicos, os mais utilizados são TiN, AlCrN, CrN, AlTiN e TiAlN, já diamante de grão refinado (Fine-grained diamond – FGD) e diamante nanocristalino (nanocrystalline diamond – NCD) são os revestimentos de diamante mais populares (CHEN et al., 2021).

Aslantas et al. (2016) realizaram uma análise experimental do efeito do revestimento sobre a força de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e formação de rebarbas no microfresamento. Para tal, os autores realizaram o microfresamento na liga de titânio Ti-6Al-4V com ferramenta de metal duro de 508 μm de diâmetro. As ferramentas eram sem revestimento e revestidas com AlCrN, TiN e NCD.

Os resultados sobre desgaste da ferramenta e formação de rebarbas obtidos por Aslantas et al. (2016) estão contidos nos gráficos da Fig. 2.20. Os menores valores de formação de rebarba foram nos canais usinados com as ferramentas revestidas com TiN. Isso se deve ao menor coeficiente de atrito do material, que reduz a quantidade de calor gerado no processo e diminui a deformação plástica do material. Já o desgaste, está relacionado à dureza do revestimento, sendo este o motivo da microfresa revestida com AlCrN apresentar o melhor resultado, já que o NCD, mesmo sendo o material mais duro avaliado, perde suas propriedades na temperatura de trabalho do processo.

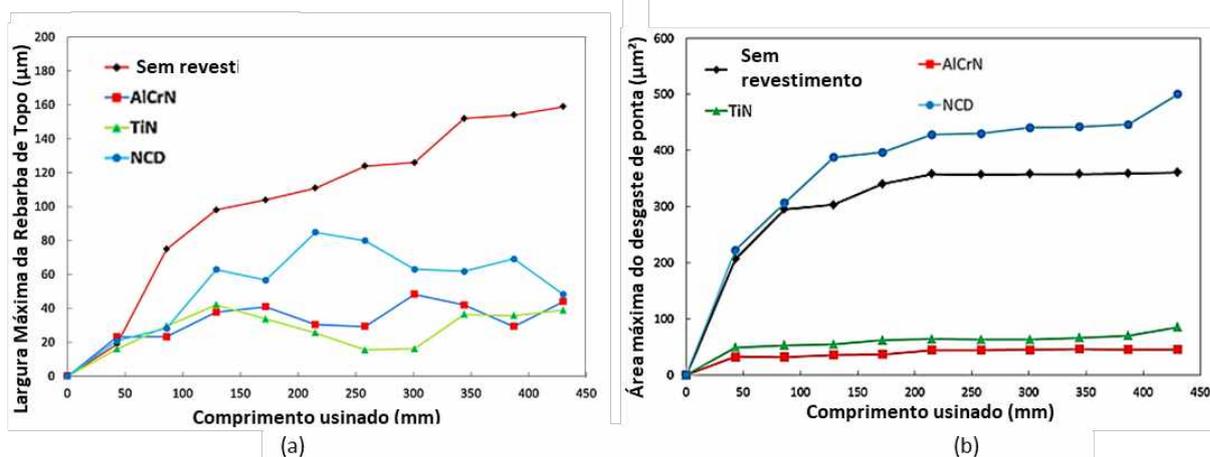


Figura 2.20 - Comparação do desempenho de diferentes revestimentos: (a) formação de rebarbas, (b) desgaste da ferramenta (adaptado de Aslantas et al., 2016)

2.7. Desgaste da Ferramenta

O desgaste em usinagem pode ser definido como perda de massa da ferramenta capaz de alterar sua geometria. Este processo é contínuo e progressivo, ocorrendo em pequenas quantidades, seja a nível atômico ou granular. O desgaste possui vários mecanismos e é fortemente influenciado pela temperatura do processo (MACHADO et al., 2009). O desgaste é o principal limitante da vida de uma ferramenta de corte, sendo bastante estudado por afetar o custo e a qualidade dos processos de usinagem (UHLMANN et al., 2013).

Ainda segundo Machado et al. (2009), o desgaste progressivo pode ser identificado tanto nas superfícies de folga de uma ferramenta quanto na superfície de saída e arestas. As três principais formas de desgaste estão exemplificadas na Fig. 2.21 e são:

- i. Desgaste de cratera (região A da Fig. 2.21);
- ii. Desgaste de flanco (região B da Fig. 2.21);
- iii. Desgaste de entalhe (regiões C e D da Fig. 2.21);

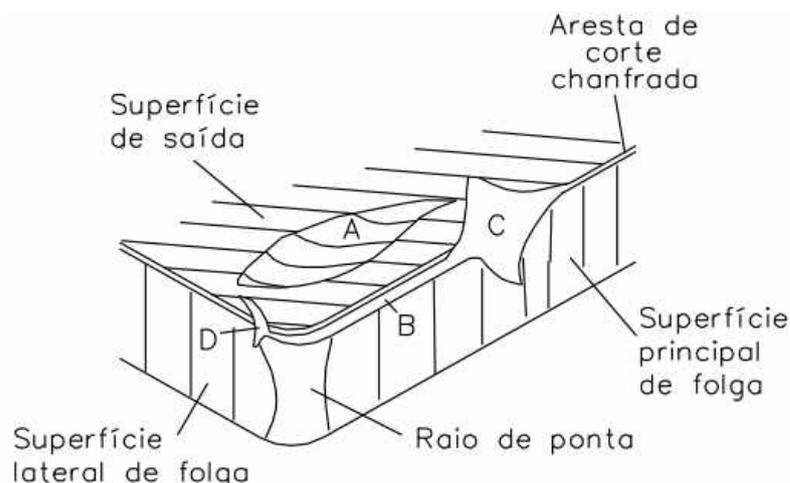


Figura 2.21 - Formas de desgaste da ferramenta (DEARNLEY; TRENT, 1982 apud MACHADO et al., 2009).

Além da forma, o desgaste pode ser identificado também pelo mecanismo físico, que depende do material envolvido e das condições de corte, especialmente aqueles que afetam a temperatura. Os mecanismos mais comuns são: adesão, abrasão, difusão, oxidação e corrosão (UHLMANN et al., 2013).

Nos processos de microusinagem, em condições normais, a baixa rigidez ocasiona um rápido desgaste da ferramenta, causando fortes vibrações e deterioração da superfície usinada. O desgaste da microfresa está intimamente ligado aos parâmetros geométricos, material da ferramenta, revestimento, material da peça, uso de fluido de corte, entre outros (CHENG e HUO, 2013; CHEN et al., 2021).

Devido ao grande impacto no microfresamento, o desgaste da ferramenta tem sido constantemente estudado. Entretanto, diferente do macrofresamento, não há uma norma ou padronização para quantificação do desgaste da microfresa e diversos autores têm usado diferentes métodos (GOMES, 2019).

Ziberov et al. (2020) investigaram o microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando microfresas de metal duro revestidas com TiAlN e DLC, com duas arestas e diâmetro de 152,4 μm . Os pesquisadores mensuraram o desgaste na superfície principal de folga através de fotos da ferramenta feitas no MEV. Conforme a Fig. 2.22, foi medida a diferença entre a ponta da ferramenta nova e da ferramenta

usada em duas posições diferentes (Desgaste 1 e Desgaste 2) para obter o valor do desgaste de flanco.

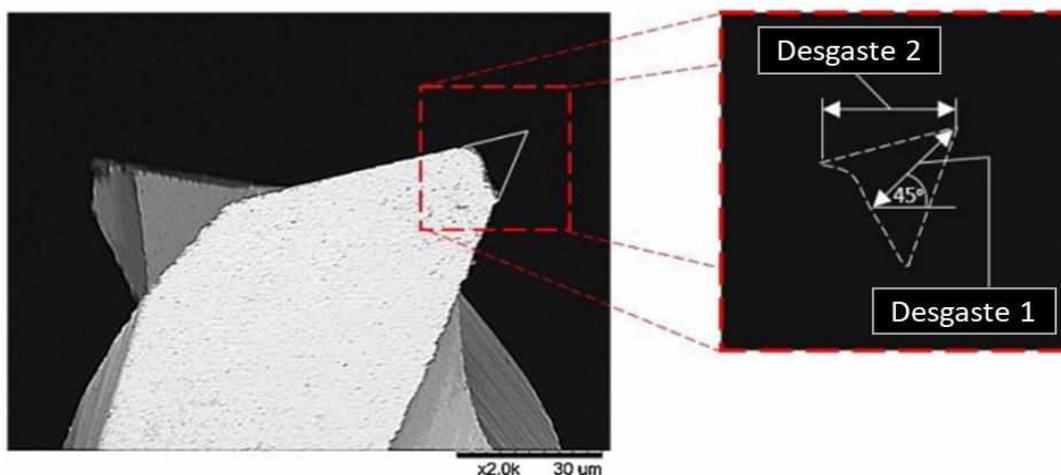


Figura 2.22 - Desgaste medido da superfície principal de folga (adaptado de ZIBEROV et al., 2020)

Silva e Da Silva (2019) realizaram a medição do desgaste na superfície secundária de folga, assim como está exemplificado na Fig. 2.23. Em seu trabalho, experimental de microfresamento com aço inoxidável duplex, utilizaram ferramentas de metal duro revestidas com AlCrN e diâmetros de 0,2 e 0,4 mm. A medição consistiu na comparação da ferramenta nova e desgastada através de fotos feitas no MEV, sendo o desgaste medido também em duas posições diferentes (Desgaste 1 e Desgaste 2).

Filiz et al. (2007) também realizaram medições de desgaste na superfície secundária de folga, contudo utilizou um método diferente. Ao investigarem o microfresamento do cobre puro comercial 101 utilizando microfresas de metal duro com diâmetro de 254 µm, o desgaste foi quantificado pela diferença entre o diâmetro da ferramenta nova e desgastada. A metodologia usada, está esquematizada na Fig. 2.24.

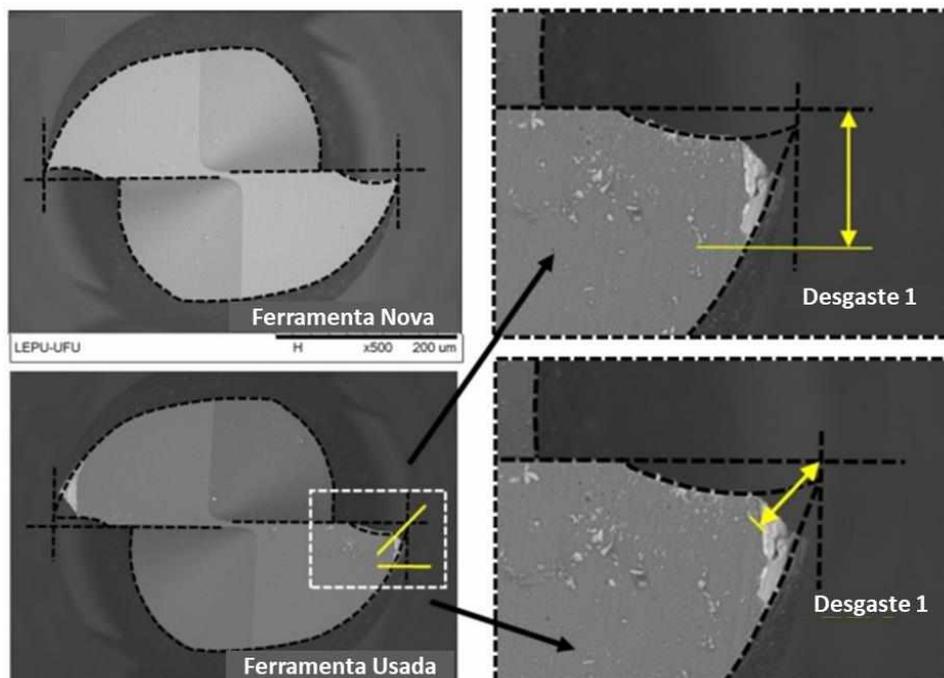


Figura 2.23 - Medição do desgaste na superfície secundária de folga através da aresta de corte (adaptado de SILVA; DA SILVA, 2019)

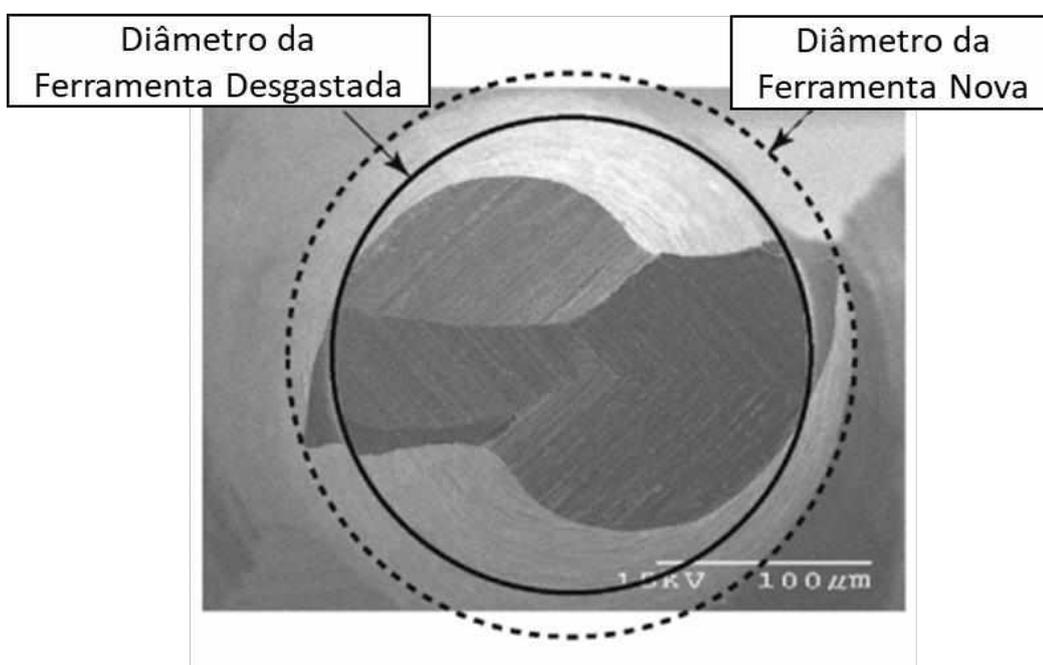


Figura 2.24 - Medição do desgaste na superfície secundária de folga através da diferença de diâmetro (adaptado de FILIZ et al., 2007)

2.8. Aços Ferramenta

Os aços ferramenta são um importante ramo da indústria siderúrgica, ainda mais quando se trata de aços especiais. Estes aços são usados principalmente para manufatura de ferramentas e matrizes para forjamento, conforme está exemplificado na Fig. 2.25. De maneira geral, estas ligas são caracterizadas por dureza elevada, resistência ao desgaste, temperabilidade, boa tenacidade, sendo que a resistência mecânica se mantém elevada quando é utilizado em trabalhos a quente. Altos teores de carbono e adição de elementos de liga como tungstênio, molibdênio, vanádio, manganês e cromo são os que garantem as características desejadas aos aços ferramenta. A fim de garantir as propriedades destas ligas, sua produção exige um elevado padrão de qualidade nas operações que envolvem a alterações no formato do material, como por exemplo, corte, afiação e forjamento (CHIAVERINI,1988; GABARDO, 2008).



Figura 2.25 - Matriz em aço ferramenta H13 para extrusão de alumínio (KRAFT, 2015).

Ainda segundo Gabardo (2008), os processos de fabricação mais comuns para obtenção de aços ferramenta são: forjamento, fundição de precisão ou metalurgia do pó, sendo produzidos em menores escalas no intuito de assegurar um rigoroso controle da composição química e homogeneidade microestrutural (GABARDO, 2008).

A classificação destes aços se dá pelas suas principais características metalúrgicas e/ou de acordo com a aplicação. Embora existam uma vasta gama de tipos de aços ferramenta normalizados internacionalmente e desenvolvidos com a finalidade de suprir as mais diversas aplicações e solicitações, a indústria metal mecânica se limita a utilizar um pequeno número de aços consolidados ao longo do tempo devido às suas propriedades de desempenho, como por exemplo, AISI H13, AISI D2 e AISI M2. A simbologia e classificação dos aços ferramenta conforme a AISI (*American Iron and Steel Institute*) é mostrada na Tab. 2.1.

Tabela 2.1 - Nomenclatura dos aços ferramenta conforme a AISI (SERIACOPI, 2013)

Símbolo	Descrição
W	Aços ferramenta temperados em água
S	Aços ferramenta resistentes ao choque
O	Aços ferramenta, para trabalho a frio, temperados em óleo
A	Aços ferramenta, para trabalho a frio (média liga de carbono), temperados ao ar
D	Aços ferramenta, para trabalho a frio (alta liga de carbono), com alta porcentagem de cromo
	Aços ferramenta, para trabalho a quente, com as seguintes subdivisões:
H	- H1 a H19: a base de cromo; - H20 a H39: a base de tungstênio; - H40 a H59: a base de molibdênio.
T	Aços ferramenta, rápido, a base de tungstênio
M	Aços ferramenta, rápido, a base de molibdênio
	Aços ferramenta, moldes, com as seguintes subdivisões:
P	- P1 a P19: baixo carbono; - P20 a P39: demais tipos.

2.8.1. Aços Ferramenta H13

O aço ferramenta ABNT H13 é um dos aços ferramenta da série H, que são aços de média liga, com baixo teor de carbono, comumente utilizados para trabalho a quente. Os tipos mais usuais dessa série são H11, H12 e H13, tendo sua

aplicação mais difundida para fabricação de molde para fundição, matrizes de forjamento, ferramentas para extrusão a quente, entre outras (GABARDO, 2008).

Mais especificamente, sobre o H13, sua dureza é em torno de 44 a 50 HRC e sua composição química nominal é retrata na Tab. 2.2. Suas principais características são: elevada temperabilidade, elevada resistência ao amolecimento pelo calor, boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, excelente tenacidade, usinabilidade razoável (melhor que outros aços ferramenta, porém pior que aços carbono), excelente resistência a choques térmicos devidos aos aquecimentos e resfriamentos contínuos, reduzindo o surgimento de trincas térmicas (EISENHÜTTENLEUTE, 1993 *apud* GABARDO, 2008).

Tabela 2.2 - Composição química nominal, em massa, do aço ABNT H13 (ASM International, 2005)

%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%V
0,32 – 0,45	0,20 – 0,50	0,80 – 1,20	4,75 – 5,50	0,30 máx.	1,10 – 1,75	0,80 – 1,20

Sobre as aplicações do aço ABNT H13, é possível destacar algumas, como: fabricação de moldes de fundição por gravidade de ligas leves (principalmente alumínio), matrizes de forjamento e extrusão, facas para corte a quente, mandris e pinos de ejetoras. Pode ser utilizado também em elementos estruturais e componentes, por exemplo, eixos, cremalheiras e barras torcionadas (ROBERTS et al., 1998)

Em muitas aplicações, o aço ferramenta ANBT H13 passa por um processo de recozimento. Segundo Chiaverini (1988), o recozimento é um tratamento térmico realizado a fim de alcançar um ou vários dos seguintes objetivos: remoção de tensões residuais; diminuição da dureza, aumentando a usinabilidade; modificar as propriedades mecânicas, como tenacidade, ductilidade, resistência, etc.; ajustar o tamanho de grão e eliminar defeitos impostos por tratamentos térmicos e mecânicos anteriores.

Uma das formas de recozimento é o “recozimento subcrítico”, que consiste no aquecimento do aço abaixo da zona crítica, durante o tempo necessário e suficiente

para aliviar as tensões impostas por outros processos de transformação mecânica. O aço deve ser aquecido à uma temperatura logo abaixo da zona crítica e deve ser mantido nessa faixa por um longo tempo. Como resultado, obtém-se uma microestrutura ferrítica com carbonetos em forma esferoidal ou globular. Um exemplo de microestrutura do aço ferramenta H13 recozido está representado na Fig. 2.26.

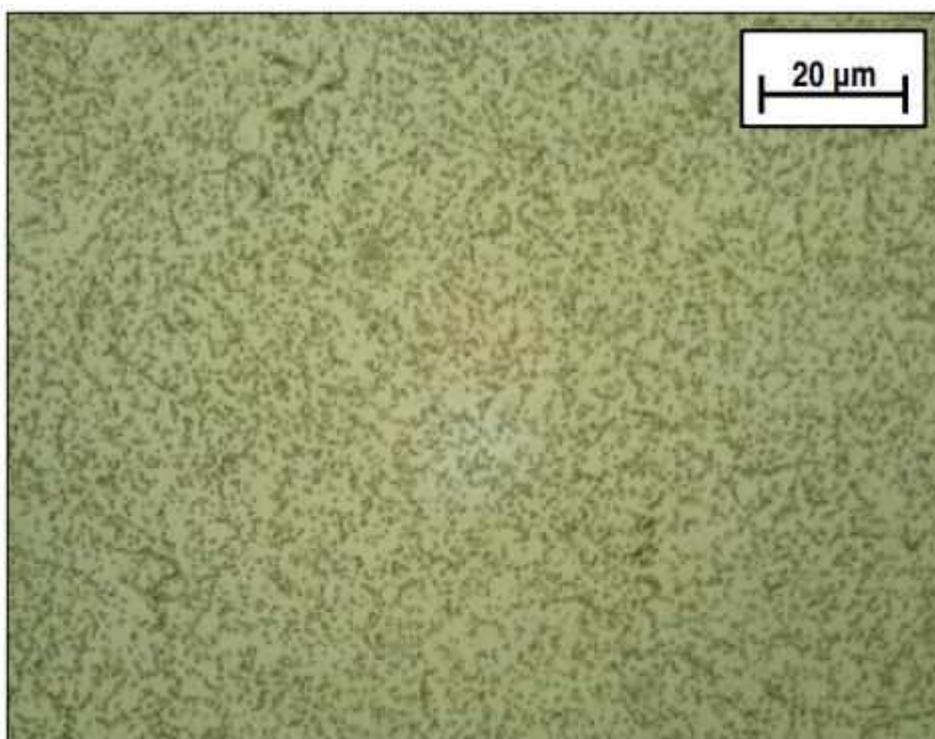


Figura 2.26 - Microestrutura do aço ferramenta ABNT H13 (GABARDO, 2008)

A Fig. 2.26 exemplifica uma microestrutura padrão do aço ferramenta H13 recozido. É possível perceber uma matriz ferrítica (região mais clara) com uma grande quantidade de carbonetos esferoidizados, que são partículas escuras espalhadas por todo o material (GABARDO, 2008).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas informações sobre toda a metodologia utilizada neste trabalho, desde a preparação dos corpos de prova até a coleta e análise dos resultados. As informações detalhadas são: o material da peça, a preparação e caracterização das amostras, máquina-ferramenta, microfresa e detalhamento da sua geometria, fixação dos corpos de prova, os ensaios de usinagem com fluido de corte em regime de MQF, bem como os parâmetros de corte e as variáveis de saída do trabalho com os instrumentos usados para sua obtenção e suas respectivas metodologias de medição.

3.1. Caracterização das Amostras

Para realização deste trabalho, foi utilizado o aço ferramenta ABNT H13, por possuir diversas aplicações na indústria metalmeccânica, como moldes e matrizes, e possuir boas propriedades para trabalho a quente. A amostra do material utilizado possuía formato de barra e foi obtida pelo processo de laminação. Em seguida, o material foi tratado termicamente pelo processo de recozimento com a finalidade de homogeneizá-lo. O procedimento foi feito pela empresa Combustol Minas (Contagem/MG) e consistiu no aquecimento uniforme até a temperatura de 690 °C e mantendo neste patamar por um período de 3,5 horas em forno com atmosfera controlada, para que a descarbonetação fosse evitada. Em seguida, o material foi submetido a resfriamento lento até 480 °C, seguindo resfriamento no forno até temperatura ambiente (SILVEIRA, 2021).

A fim de avaliar a composição química do material, foi realizado uma análise através do método de Espectroscopia de Emissão Ótica, utilizando o equipamento do fabricante SPECTROMAXx e seguindo a norma ASTM E 415:2017, cujos resultados encontram-se na Tab. 1. Além da caracterização da microestrutura e composição do aço H13, foi feito também a medição de dureza do material pelo SENAI, e o valor obtido foi de 193,7 HB.

Tabela 3.1 - Composição química do ABNT H13 obtida por espectroscopia de emissão ótica

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Cu	Ni	V
% em peso	0,38	0,91	0,3	0,01	0,005	5,09	1,27	0,01	0,08	0,31	0,85

Para análise da microestrutura, foi realizado a análise metalográfica. A superfície foi lixada com diferentes lixas na seguinte ordem: #80, #120, #220, #320, #400, #600 e #1200 *mesh*, seguido do polimento em alumina. O reagente utilizado foi o Nital (concentração de 10 %), sendo o tempo de ataque da superfície de 15 segundos, que permitiu estabelecer contraste e identificar os contornos de grão e diferentes fases da microestrutura. A imagem, representada na Fig. 3.1. foi feita no microscópio ótico Olympus BX51M com aumento de 1.000 vezes e fotografada com sistema digital de captura de imagens DMC 1.0.

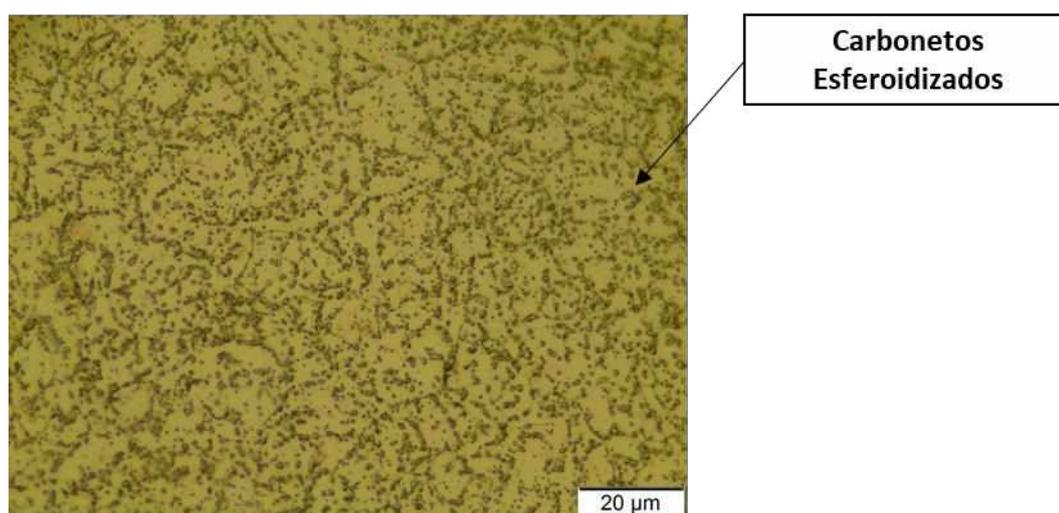


Figura 3.1 - Análise metalográfica do material usinado

Como o material passou pelo tratamento térmico de recozimento, sua matriz é ferrítica, com a presença de carbonetos esferoidizados. A matriz ferrítica e forma dos carbonetos desta natureza tendem a reduzir a dureza do material.

3.2. Preparação dos Corpos de Prova

Com uma barra do material disponível, foi possível retirar um corpo de prova para realização dos ensaios de microfresamento. Foi cortado uma amostra com as seguintes dimensões: 57 mm de comprimento, 30 mm de altura e 11,6 mm de largura, conforme mostrado na Fig. 3.2. O corte foi feito através do processo de serramento e, em seguida, as superfícies laterais (representadas por “1”), superior e inferior (representadas por “2”) foram faceadas no torno, a fim de garantir paralelismo da amostra com morsa de fixação.

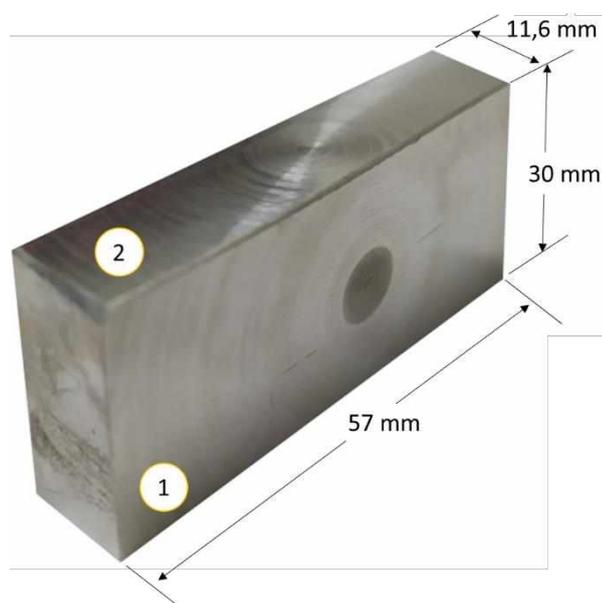


Figura 3.2 - Corpo de prova utilizado com as respectivas dimensões. Faces 1 e 2 representam as superfícies faceadas

Em seguida, após a etapa de caracterização e preparação, o corpo de prova foi fixado em uma morsa de precisão, conforme mostrado na Fig.3.2. Esta etapa é

de grande importância, pois garante que a amostra esteja presa o suficiente para não se deslocar durante o fresamento, já que qualquer movimentação, por menor que seja, pode exercer grande influência nos resultados. Além disso, a fixação correta garante que as superfícies laterais estejam alinhadas e paralelas aos batentes da morsa.

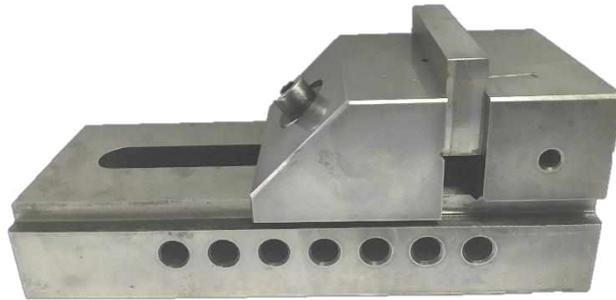


Figura 3.3 - Fixação da amostra na morsa de precisão

Posterior a fixação, a morsa juntamente com a peça, era levada até a fresadora de topo Natal NS-65 para que a face a ser usinada fosse previamente preparada. Mesmo que a superfície superior já houvesse sido faceada no torno, após a fixação na morsa é possível que haja desvios de paralelismo entre a base da morsa e a face a ser usinada, por isso essa fase dos experimentos é essencial, visto que garante uma redução nos desvios mencionados anteriormente e reduz o tempo de preparação na microfresadora que será apresentado a seguir. Neste fresamento, foi utilizada uma fresa de aço rápido de 15 mm de diâmetro, com quatro arestas e os parâmetros de corte utilizados foram, profundidade de corte (a_p) de 0,1 mm e penetração de trabalho (a_e) de 11,6 mm. Foi realizado apenas um passe durante este procedimento.

3.3. Equipamentos Utilizados

Os testes de usinagem deste trabalho bem como as coletas de dados e análises foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU). Para tal, os principais equipamentos utilizados foram: microfresadora de

comando numérico computadorizado (CNC), microscópio eletrônico de varredura (MEV), equipamento de espectroscopia de energia dispersiva (do inglês *energy-dispersive spectroscopy* “EDS”) e perfilômetro de contato.

3.3.1. Máquina-ferramenta

Para os ensaios, utilizou-se uma microfresadora CNC modelo Mini-mill/GX do fabricante Minitech Machinery® e com 3 eixos. O equipamento é apresentado na Fig. 3.4. Os eixos X, Y e Z possuem deslocamento máximos de 300 mm, 228 mm e 228 mm, respectivamente. A resolução dos eixos é de 0,1 μm e a velocidade de avanço máxima é de 1 000 mm/min. A máquina possui uma mesa de alumínio com furações para fixação das peças, cujas dimensões são 152,4 mm x 444,5 mm, ela também possui mecanismo de deslocamento com rolamento linear da marca THK. A operação do equipamento é feita através do software Mach3Mill. Por fim, todo o conjunto está apoiado sobre uma mesa inercial, projetada especialmente para ele com o intuito de reduzir vibrações externas que possam prejudicar a qualidade da microssinagem.

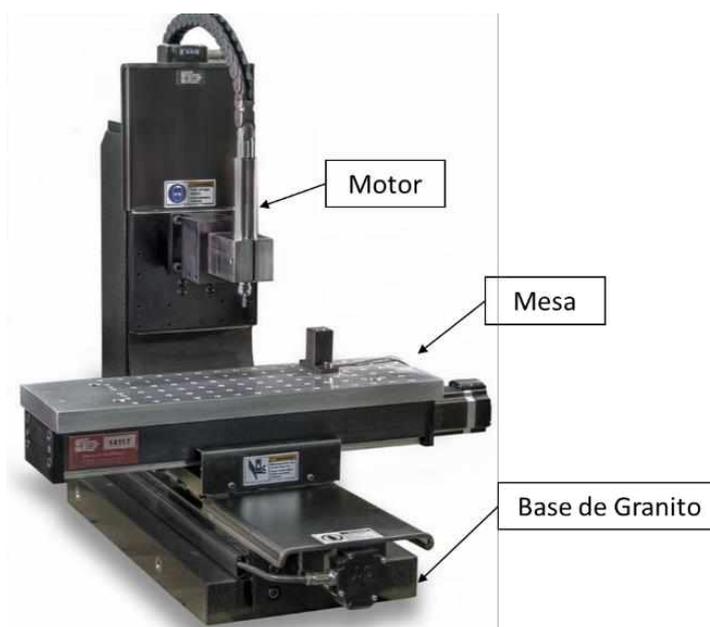


Figura 3.4 - Modelo de microfresadora utilizada nos ensaios (adaptado de MINITECH MACHINERY, 2022)

Para que as velocidades de corte sejam mais altas é necessário que o eixo árvore possua alta rotação. Por este motivo, a fresadora é equipada com um motor *Nakanishi* modelo EM-3060, cuja rotação máxima é de 60 000 rpm e com incremento de 1 000 rpm.

3.3.2. Perfilômetro, MEV e EDS

Com o intuito capturar imagens das ferramentas antes e após o fresamento e também dos canais usinados, foi utilizado o MEV modelo HITACHI TM3000, como é mostrado na Fig. 3.5. Este equipamento permite aumentos de 15x a 30 000x e tensão de aceleração dos elétrons de 5 kV, 15 kV e Analy. O microscópio possui autofoco, brilho e contraste automático e as imagens podem ser registradas em quatro modos diferentes, sendo eles COMPO, SHADOW 1, SHADOW 2 e TOPO. Já os eixos permitem movimentações de $\pm 17,5$ mm tanto em X quanto em Y (HITACHI HIGH-TECHNOLOGIES CORPORATION, 2013).

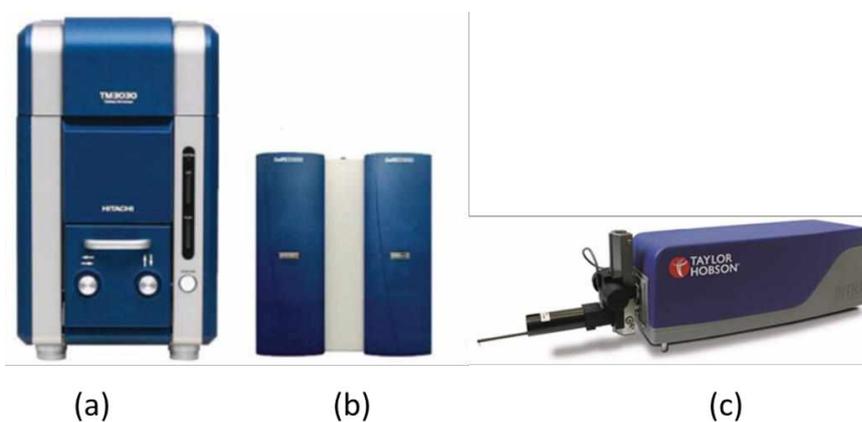


Figura 3.5 - Equipamentos: (a) MEV; (b) EDS e (c) Perfilômetro (adaptado de TAYLOR HOBSON, 2012; HITACHI HIGH-TECHNOLOGIES CORPORATION, 2013)

Para análises de composição química foi utilizado o EDS modelo HITACHI SwiftED 3000, também representado na Fig. 3.5. Este equipamento é capaz de detectar múltiplos elementos (Boro ao Urânio) em pontos específicos do

componente. Ademais, ele é capaz de fazer o mapeamento dos elementos presentes na área selecionada assim como escanear em linha, destacando o perfil de intensidade dos elementos (HITACHI HIGH-TECHNOLOGIES CORPORATION, 2013).

A Figura 3.5 exemplifica também o perfilômetro usado para avaliar a rugosidade do canal. Este equipamento é o perfilômetro 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). O raio de ponta do apalpador é de 2 μm (TAYLOR HOBSON, 2012).

3.4. Microfresas

Avaliar o desempenho das microfresas e entender o efeito dos parâmetros geométricos são alguns dos objetivos principais deste trabalho. Dessa maneira, foram selecionadas cinco modelos diferentes de ferramentas para serem estudadas. Como foram feitos um teste e uma réplica para cada modelo, foram usadas 10 microfresas de topo reto. Os modelos se diferem entre si quanto à geometria e revestimento e foram nomeadas de A, B1, B2, C e D. As microfresas foram fornecidas por quatro fabricantes diferentes, portanto duas delas são do mesmo fornecedor (B1 e B2), porém possuem diferentes características geométricas.

Todas as ferramentas utilizadas são de metal duro (matriz de cobalto com carboneto de tungstênio), possuem 400 μm de diâmetro (d) e dois dentes. Algumas outras características dimensionais das ferramentas são fornecidas pelos fabricantes, como: comprimento de corte da microfresa (H), comprimento total da ferramenta (L) e diâmetro da haste (D). Todas essas dimensões estão destacadas na Fig. 3.6. e os valores para cada ferramenta utilizada estão registrados na Tab. 3.2. Apenas ressaltando que todas as informações foram retiradas dos catálogos dos fabricantes.

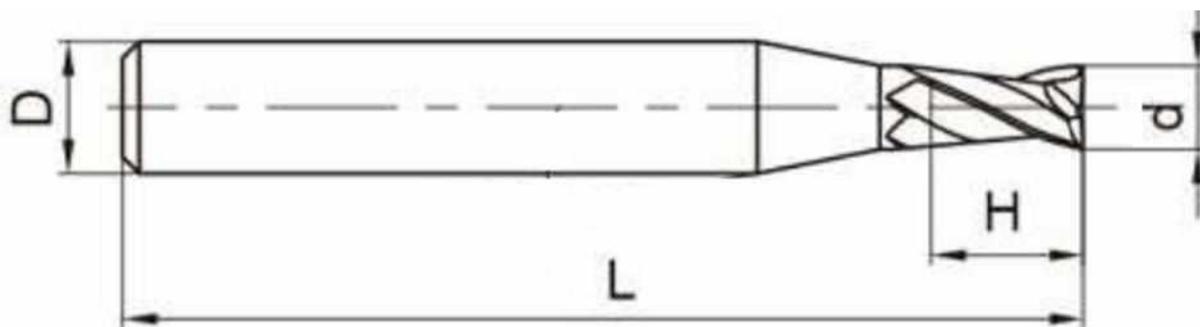


Figura 3.6 - Representação Esquemática da Microfresa com as dimensões evidenciadas (adaptado de REWIID, 2021)

Tabela 3.2 - Dimensões das microfresas utilizadas

	A	B1	B2	C	D
H (mm)	1	0,8	1	0,8	0,8
L (mm)	38	40	45	45	50
D (mm)	3	4	4	4	4

Desvios na produção das microfresas ou até mesmo avarias de transporte e manuseio podem danificar as arestas de corte antes mesmo da usinagem. Dessa forma, é necessário levá-las ao MEV e registrar imagens das ferramentas. Além de assegurar a integridade delas, as fotos também servem para caracterização da geometria e para posteriores medições de desgaste. A Fig. 3.7 contém imagens das microfresas utilizadas em duas vistas: superior (superfície secundária de folga) e lateral (superfície de saída).

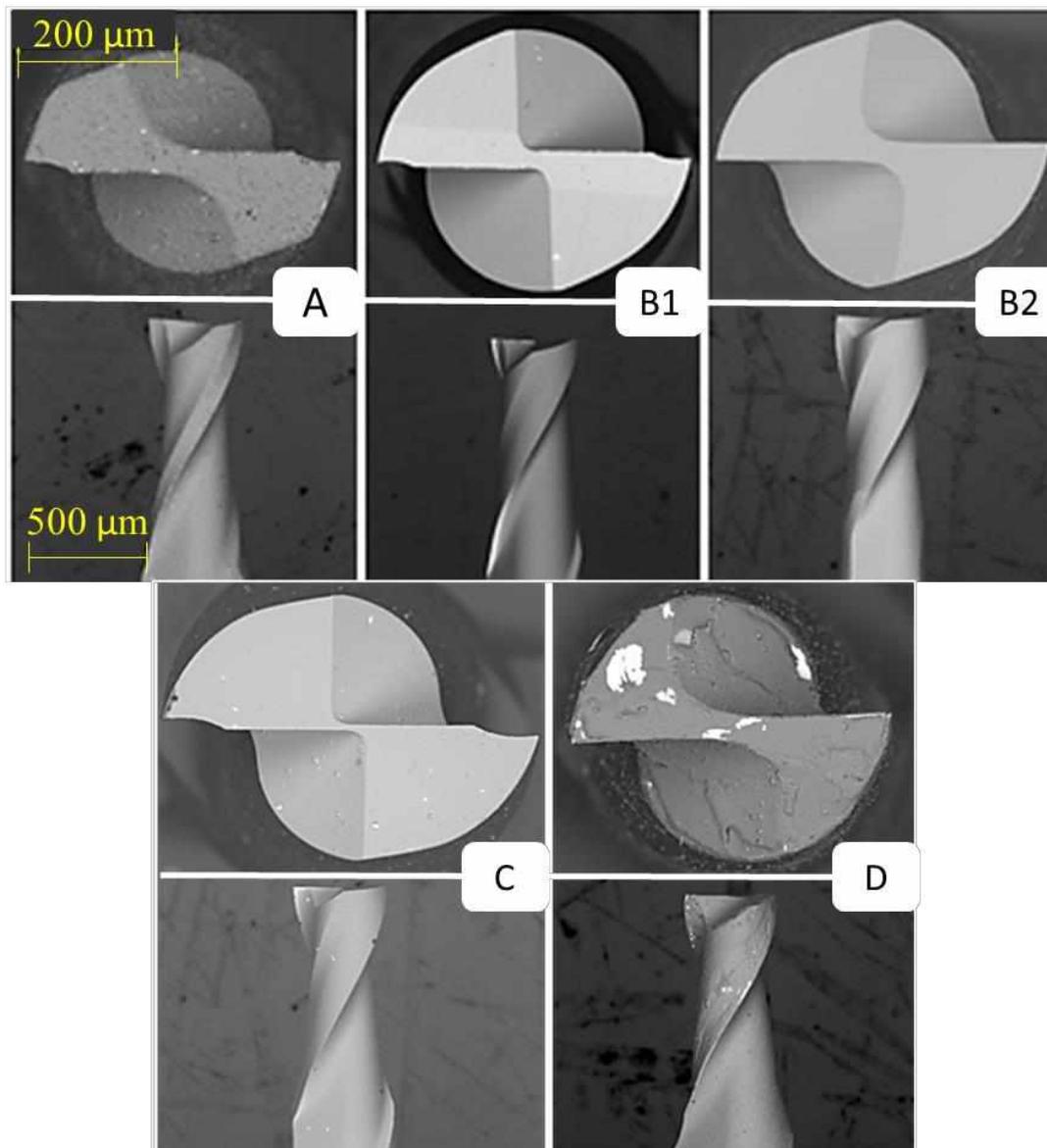


Figura 3.7 - Fotos das microfresas obtidas no MEV

3.4.1. Medição dos Parâmetros Geométricos

Ainda que os fabricantes forneçam algumas características geométricas das ferramentas, os principais ângulos e raios das ferramentas não são encontrados nos catálogos e por isso foram medidos. A Fig. 3.8 evidencia o ângulo de posição primário (χ_r), ângulo de ponta (ϵ_r), ângulo de posição secundário (χ_r'), ângulo da cunha (β_o), raio de aresta (r_β) e raio de ponta (r_ϵ), que são os parâmetros de maior influência nos resultados do microfresamento.

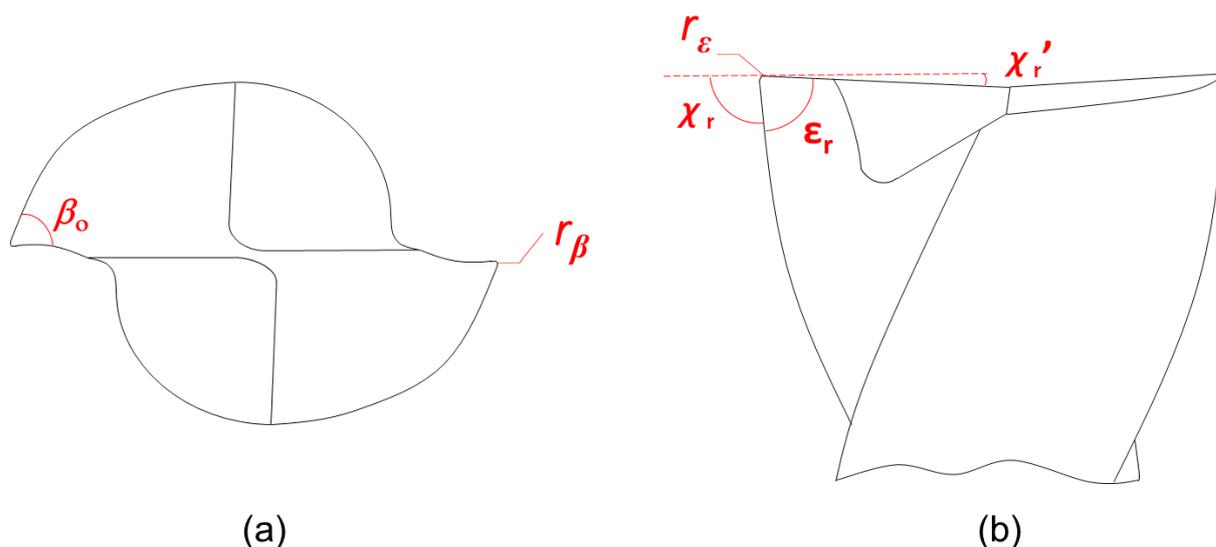


Figura 3.8 - Representação esquemática da ferramenta com os ângulos e raios medidos. (a) vista superior; (b) vista lateral

Para realizar a medição dos ângulos e raios da ferramenta, foram utilizadas as imagens feitas no MEV. Como as fotos possuem uma escala fornecida pelo equipamento, é possível transferi-las para um software de análise de imagens, calibrar o sistema de medição do software baseando-se na escala e então realizar as medições necessárias.

O software utilizado para as medições foi o *Image J*. A Fig. 3.9 exemplifica uma medição para cada parâmetro geométrico utilizando o software mencionado. Como foram utilizadas duas microfresas de cada modelo, cada ângulo e raio foram medidos quatro vezes, visto que haviam quatro arestas de corte de cada modelo disponíveis para análises.

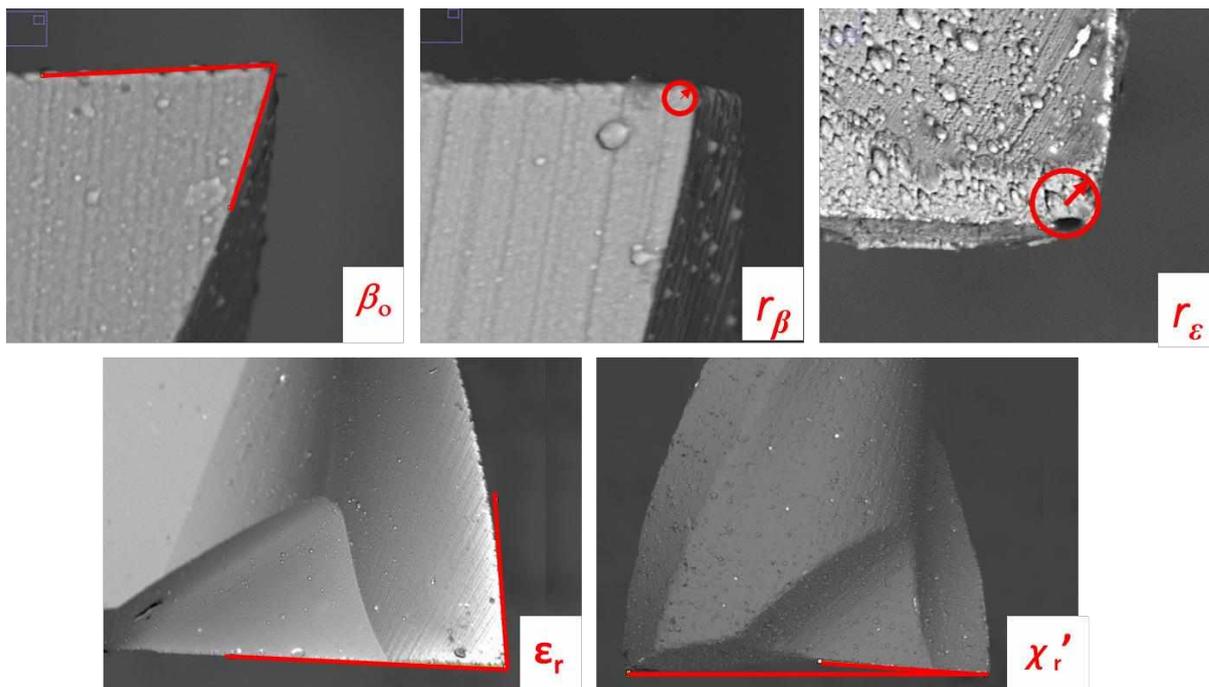


Figura 3.9 - Medições nos ângulos e raios utilizando o software Image J

O ângulo de posição primário é o único ângulo que não foi possível medir diretamente. Porém, o ângulo de posição primário, ângulo de posição secundário e ângulo de ponta são suplementares. Portanto, para cada aresta de corte foi calculado o valor do ângulo de posição primário utilizando a Equação 3.1.

$$\chi_r = 180^\circ - \epsilon_r - \chi_r' \quad (3.1)$$

Após finalizar as medições, foram calculadas as médias dos valores obtidos e os resultados para os ângulos e raios através da metodologia citada estão contidas na Tab. 3.3. Era esperado que os valores do ângulo de posição primário fossem todos muito próximos de 90° , visto que estas ferramentas são microfresas de topo reto. Entretanto, algumas delas apresentaram variações, possivelmente devido à variabilidade do processo de fabricação das microferramentas. Além do mais, o método de medição também pode ter pequena influência nos valores dos ângulos obtidos.

Tabela 3.3 - Ângulos e raios das ferramentas utilizadas

Ferramenta	X_r (°)	X_r' (°)	ϵ_r (°)	β_o (°)	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

3.4.2. Validação das Medições

Com a finalidade de validar a caracterização geométrica das microfresas feita utilizando o MEV e o software *Image J*, realizou-se uma conferência das medições. Para tal, foi utilizado o Zegage Pro HR do fabricante ZYGO, que é um perfilômetro óptico capaz de caracterizar superfícies em duas e três dimensões. Este equipamento possui resolução de 0,15 nm e ampliação máxima de 50x (ZYGO, 2018). O aparato experimental utilizado nesta etapa é representado na Fig. 3.10.

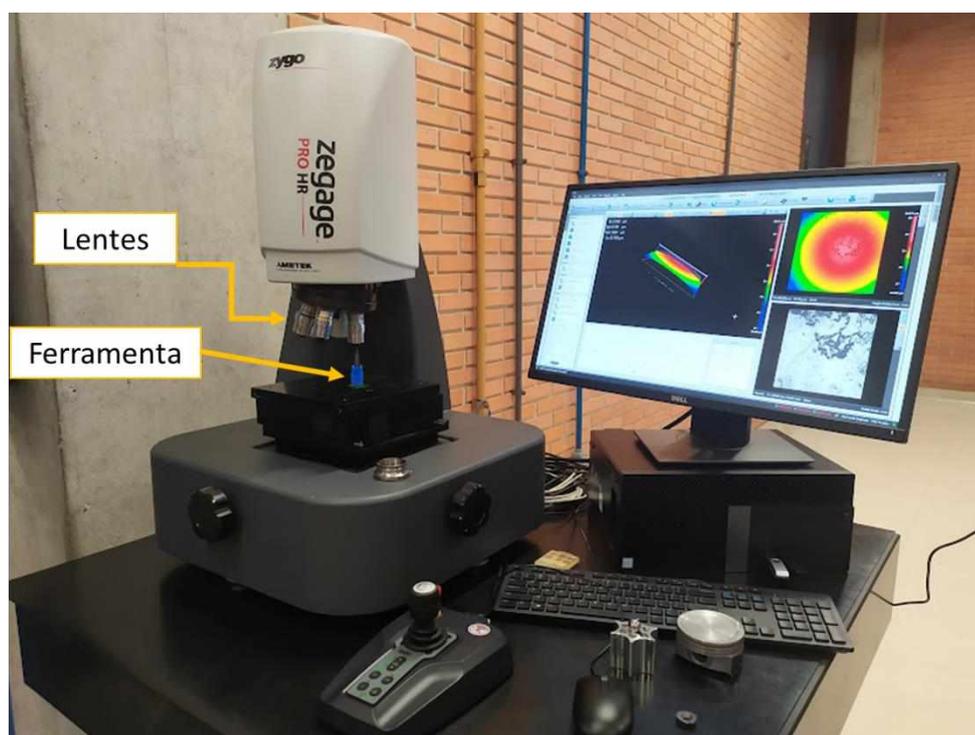


Figura 3.10 - Caracterização geométrica da ferramenta utilizando o Zegage Pro HR

Todavia, não foram medidos todos os ângulos e raios novamente, escolheu-se apenas um ângulo de uma ferramenta para atestar a confiabilidade das medições. Logo, foi medido o ângulo de posição secundário da ferramenta B1. Os dados extraídos do Zedge Pro HR© foram transferidos para o software TalyMap Gold©, onde foi possível escolher um plano de medição, alinhar virtualmente as arestas e medir o ângulo desejado. A Fig. 3.11 retrata as etapas de medição, sendo possível perceber que há dois valores mostrados, sendo um para cada aresta.

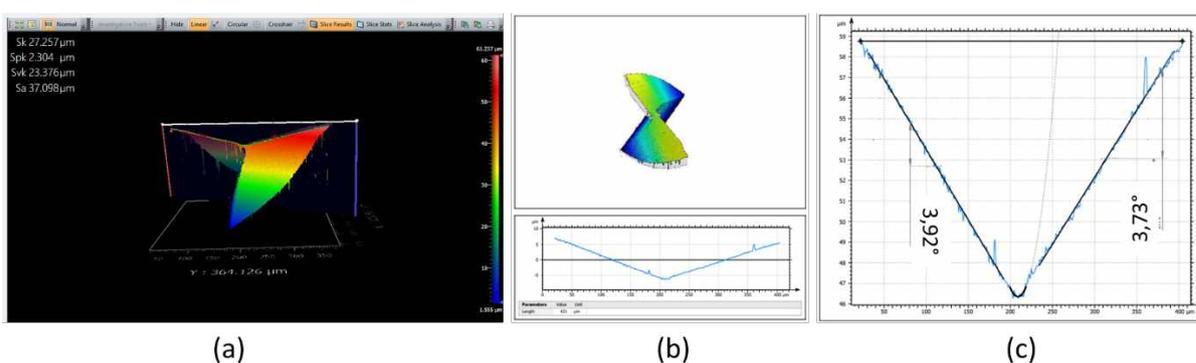


Figura 3.11 - Etapas de medição do ângulo de posição secundário: (a) escaneamento da superfície; (b) leitura dos dados no TalyMap Gold e (c) Alinhamento das arestas, ampliação e medição dos ângulos

O resultado médio obtida através desse processo foi de $3,825^\circ$. Este valor atesta a metodologia e resultados obtidos através das análises no software *Image J*, pois a diferença percentual entre a medição realizada pelos dois métodos foi de apenas 1,93 %.

3.4.3. Caracterização dos Revestimentos

A última etapa de caracterização das ferramentas foi a análise dos revestimentos. O tipo de revestimento é fornecido pelos fabricantes, contudo a composição química não é uma informação pública. Desta forma, utilizando o EDS, foram quantificados os elementos presentes nos revestimentos, bem como seus percentuais. Foram feitas três medições em diferentes pontos da microfresa, sendo

seis medições por modelo de ferramenta, já que foram utilizadas duas de cada. Em seguida a média do percentual (em peso) de cada elemento foi feita e os resultados estão resumidos na Tab. 3.4.

Tabela 3.4 – Composição (% em peso) dos revestimentos das microfresas

Elementos	A	B1	B2	C	D
Alumínio	-	20,682	24,549	34,417	7,659
Carbono	11,035	-	-	-	-
Cromo	-	-	-	44,030	-
Nitrogênio	18,472	31,064	27,486	21,554	27,342
Titânio	70,494	48,254	47,966	-	64,999

Assim, os tipos de revestimentos informados pelos fabricantes foram confirmados através da análise no EDS, sendo as ferramentas B1, B2 e D revestidas com TiAlN, a ferramenta A revestida com TiCN e a C, com AlCrN.

Além do tipo, outra característica marcante do revestimento que foi analisada é qualidade da aplicação. Pelas fotos das ferramentas na Fig. 3.7, é possível perceber, por exemplo que as ferramentas A e D possuem alguns detalhes no revestimento, como bolhas, falhas e lascamentos.

3.5. Fixação das Amostras e Preparação da Superfície

Com a superfície a ser usinada previamente preparada, a morsa então era fixada na base da mesa da microfresadora, utilizando parafusos. Um importante detalhe desta fixação é a confirmação de que as laterais da morsa/peça estivessem o mais paralelo possível da aresta da mesa, de acordo com a representação na Fig. 3.12. Este ajuste na fixação é feito com o auxílio de uma régua e assegura que a trajetória da microfresa sobre a amostra seja o mais linear possível, reduzindo possíveis distorções nos canais usinados.

Uma cuba de acrílico era colocada entre a morsa e a mesa com a finalidade de receber todo o fluido de corte utilizado durante a usinagem. Outro cuidado importante para assegurar a integridade do equipamento, é o revestimento da máquina com capa de plástico para evitar contaminação e corrosão devido ao fluido de corte.

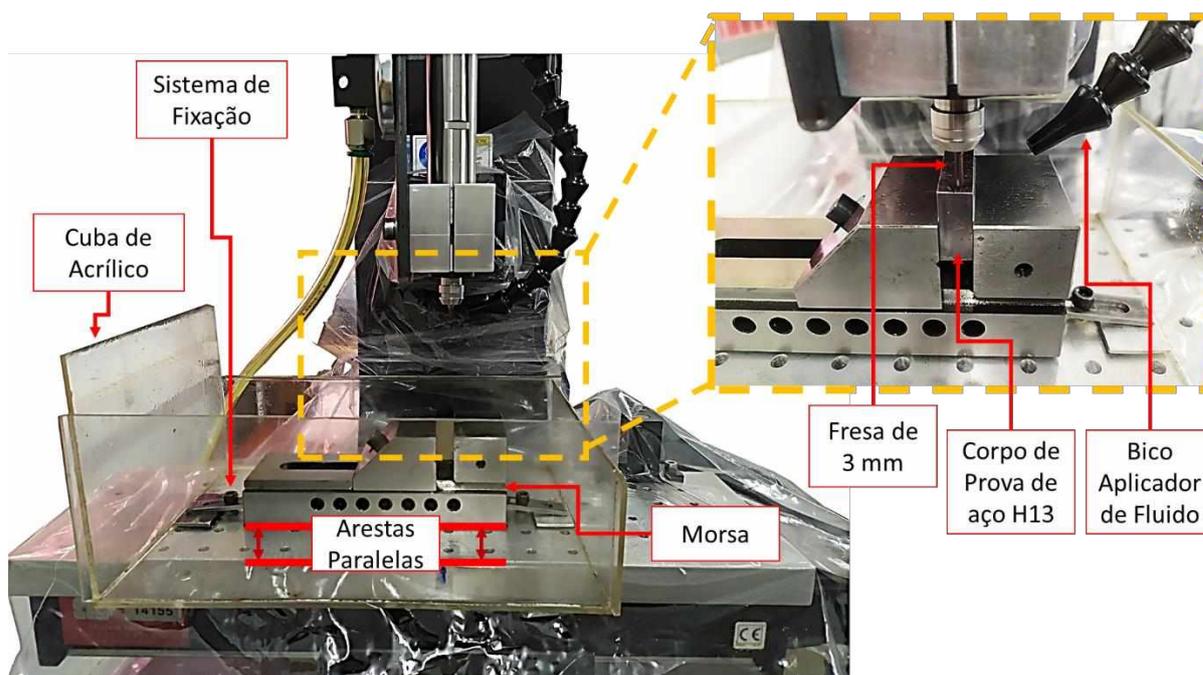


Figura 3.12 - Montagem da amostra na microfresadora através de uma morsa de precisão

A próxima etapa do procedimento experimental foi preparar a superfície para o microfresamento. Essa fase tem por finalidade garantir uma boa qualidade da face a ser usinada e assegurar que ela esteja paralela ao plano XY da mesa. Para preparar a superfície, foi feito o fresamento de topo com uma fresa de metal duro de 3 mm de diâmetro e revestida com TiN, velocidade de corte de 94,25 m/min, avanço por dente de 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$ e profundidade de corte de 5 μm .

Para auxiliar na usinagem, foi utilizado o fluido de corte Vascomill MMS FA 2, fabricado pela Blaser em regime de MQF, com vazão de 100 ml/h e pressão de 6 bar. O bico aplicador de fluido encontrava-se a uma distância aproximada de 15 mm da ferramenta e inclinação de 45°, congruente a Fig. 3.12.

Como a amostra já havia passado pelo processo de fresamento com a ferramenta de 15 mm, foram necessários apenas quatro passes para que a superfície estivesse pronta para o microfresamento. E, por fim, era utilizada uma lixa de granulometria #2000 *mesh* para remoção de quaisquer rebarbas que permanecessem na lateral do corpo de prova.

3.6. Referenciamento da Ferramenta

Posterior à preparação da superfície, a fresa de 3 mm foi trocada por uma microfresa e iniciou-se o processo de referenciamento da ferramenta em relação à superfície a ser usinada. Esta é uma das etapas mais críticas do microfresamento, devido ao fato de que ele é feito manualmente e exige alta precisão. A metodologia adotada é bastante simples, mas garante uma precisão na ordem de 0,1 μm .

Este método consiste em duas etapas e necessita de uma câmera USB com ampliação máxima de 500 vezes para visualizar o movimento da microfresa. Na primeira etapa, a ferramenta, ainda sem rotacionar, é aproximada o máximo possível da peça até uma distância segura conforme a imagem transmitida pela câmera, assim como é retratado na Fig. 3.13.



Figura 3.13 – Aproximação da ferramenta utilizando o microscópio USB

A segunda etapa é feita de maneira automática utilizando um programa no comando numérico que incrementa o a_p em 0,1 μm e promove um retorno rápido da ferramenta para a posição inicial. Não se utiliza fluido no zeramento e os parâmetros

utilizados são: v_c de 12,57 m/min, f_z de 1 $\mu\text{m}/\text{dente}$, a_e de 0,4 mm, a_p de 0,1 μm e comprimento de corte de 1,5 mm para evitar desgaste da fresa. Assim que toca a peça, é deixada uma marca, sendo possível de visualizar através da imagem gerada pela câmera. Este ponto é referenciado como sendo a posição $Z = 0$.

3.7. Ensaios de Usinagem

Finalizando todas as etapas de preparação, análise e referenciamento das ferramentas, iniciou-se a etapa de microfresamento. O corte foi realizado em regime de MQF, sendo que o fluido utilizado foi o Vascomill MMS FA2 da Braser®, vazão de 100 ml/h e 6 bar de pressão. O bocal de aplicação encontrava-se a uma distância de 10 mm, inclinação de 30° e se movimentava junto com a peça. Para realizar a operação de corte, foram selecionados os seguintes parâmetros: v_c de 50,2 m/min, f_z de 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$, a_p de 40 μm , a_e de 400 μm e comprimento de corte (l_c) igual a 116 mm, o que corresponde a 10 canais. Foi tomado o cuidado para que o sentido de avanço da microfresa fosse em direção ao batente fixo da morsa, conforme mostrado na Fig. 3.14, que garante maior rigidez no processo.

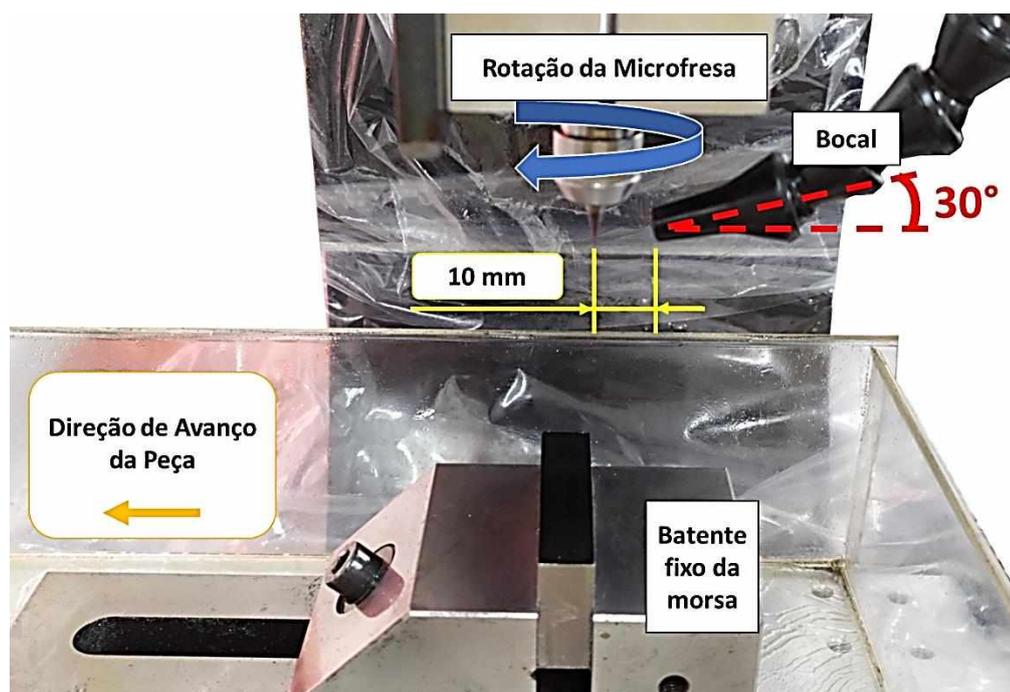


Figura 3.14 - Posicionamento e movimentação da ferramenta, peça e bocal

Para cada superfície preparada foram fabricados 10 microcanais e, em seguida, feito uma réplica com outra ferramenta do mesmo modelo, fabricando mais 10 canais. A cada canal usinado, a microfresa saía da peça, retornava para a posição inicial em X e avançava 2 mm na direção Y. O movimento da mesa no eixo Y era oposto para a réplica em relação ao ensaio inicial. A Fig. 3.15 contém uma representação da distribuição dos canais e percurso da ferramenta.

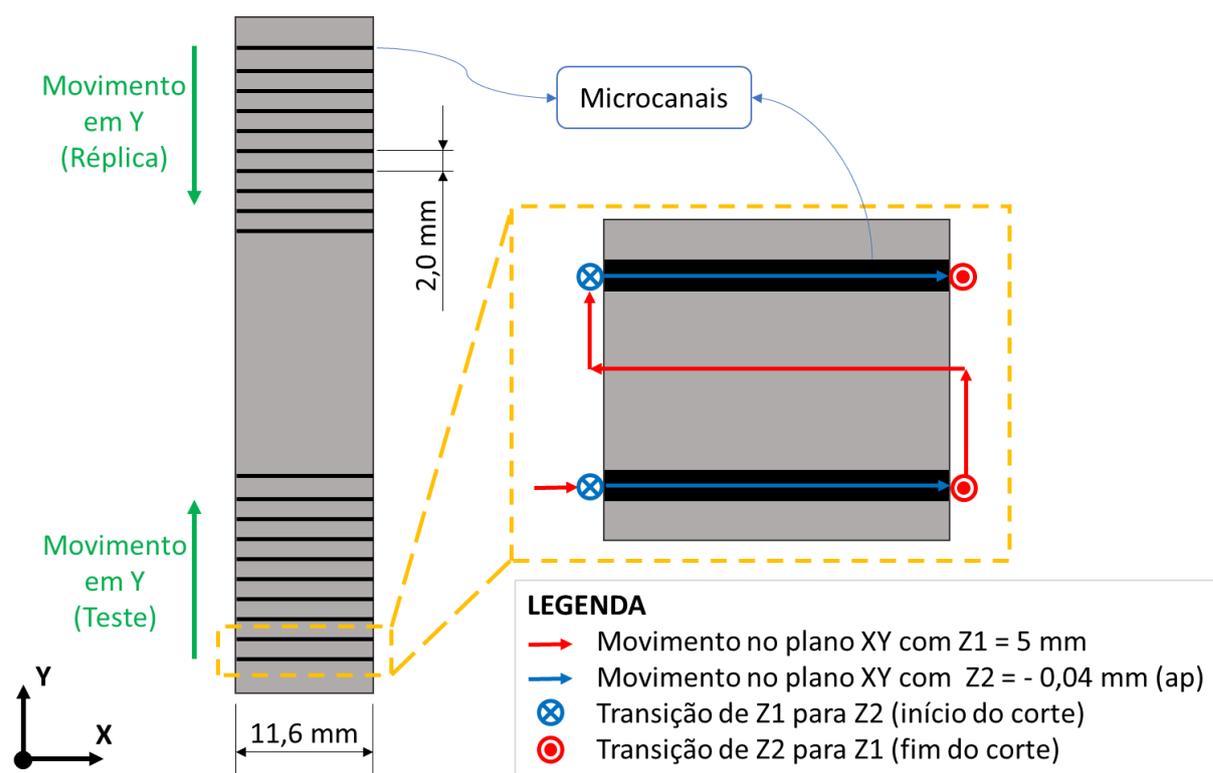


Figura 3.15 - Representação esquemática da movimentação da ferramenta sobre a peça (Visão no plano XY)

3.8. Variáveis de Saída

Assim que se encerravam os ensaios com as duas ferramentas do mesmo modelo, as microfresas eram lavadas em banho ultrassônico com álcool isopropílico e levadas novamente ao MEV para fotografar novamente a superfície secundária de folga e em seguida media-se o desgaste. O corpo de prova era retirado da morsa, limpo em banho ultrassônico com acetona e também levado ao MEV. Nesta etapa, eram registradas fotos de todos os canais usinados e, em seguida, era medida a

rugosidade dos microcanais. Todos os procedimentos mencionados estão descritos com mais detalhes nas seções 3.8.1 a 3.8.3.

3.8.1. Rugosidade

A rugosidade dos canais é um dos parâmetros de saída avaliados neste trabalho. Desta forma, após a peça estar usinada e limpa, era utilizado o perfilômetro *Form Taly Surf Intra*® para medir a rugosidade no fundo de cada canal usinado. O apalpador era posicionado no interior do canal e a medição era feita no mesmo sentido do avanço da ferramenta, assim como está retratado na Fig. 3.16. Em cada canal foram feitas três medições: início, meio e fim do comprimento usinado.

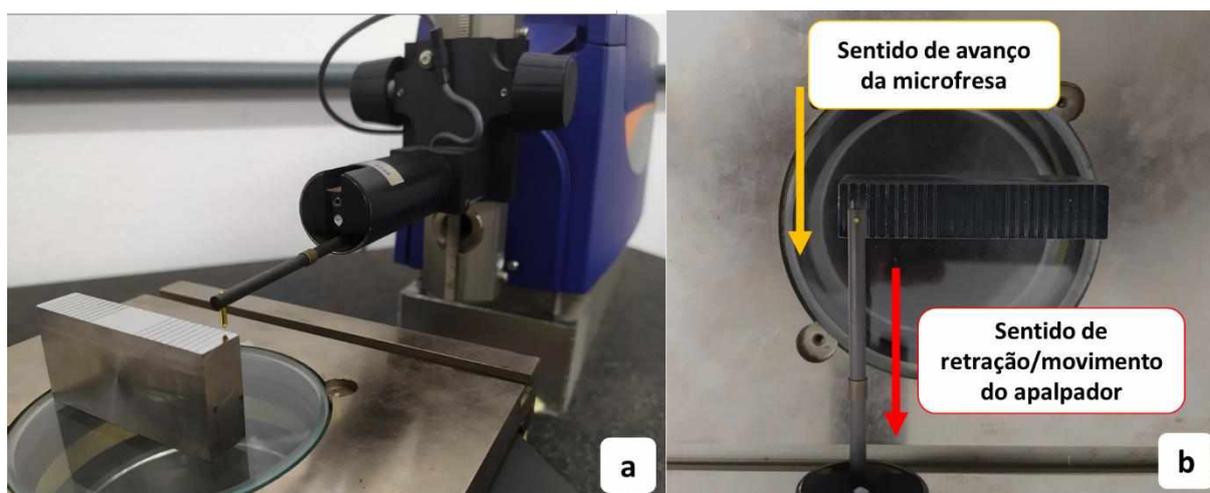


Figura 3.16 - Medição da rugosidade do canal: (a) posicionamento do apalpador e (b) sentido de retração

Como as rugosidades mensuradas tiveram grandes variações para as diferentes ferramentas utilizadas, era necessária uma medição prévia para verificar o R_a aproximado e então determinar o *cut-off* e o comprimento de amostragem. Os comprimentos de medição utilizados foram 1,25 mm e 4 mm e os valores de *cut-off* foram 0,25 mm e 0,8 mm, respectivamente.

3.8.2. Superfície Usinada e Formação de Rebarbas

Para estudo da superfície usinada e das rebarbas formadas utilizou-se as imagens geradas no MEV. Foram avaliadas, de maneira qualitativa, as marcas no fundo do canal para complementar a análise feita através da medição de rugosidade, os tipos de rebarbas formadas e local de predominância, possíveis defeitos da usinagem, entre outros.

O foco maior desta etapa foi na quantificação das rebarbas formadas através das suas respectivas áreas, sendo adotado o modelo proposto por Dos Santos (2020), no qual é medido a área das rebarbas em uma vista superior dos canais. O processo de medição está detalhado na Fig. 3.17 e a descrição das etapas se encontra logo abaixo da imagem.

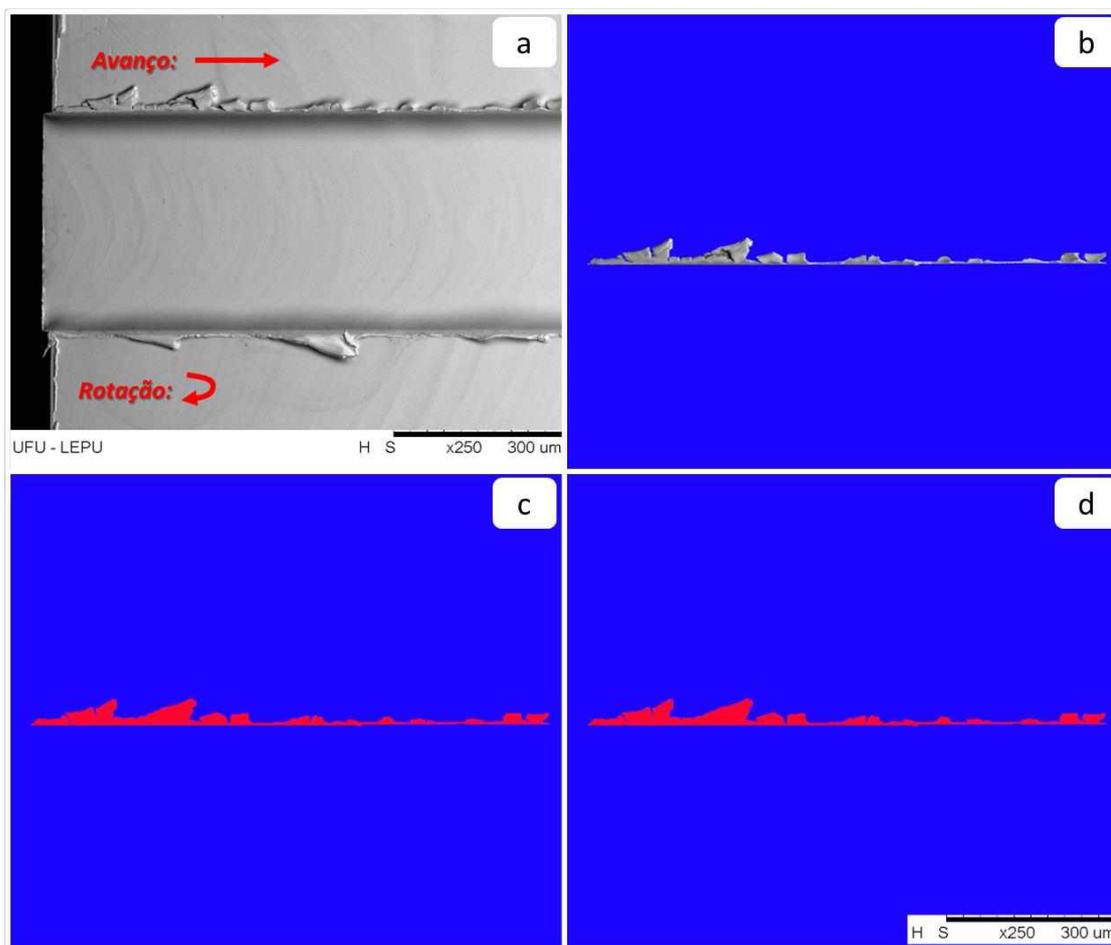


Figura 3.17 - Metodologia para medição da área da rebarba: (a) imagem original, (b) separação da rebarba, (c) binarização, (d) inserção da escala

Neste método, é utilizado o software GIMP para edição de imagem, a fim de isolar apenas as rebarbas (etapa b) e binarizar a figura (etapa c), assegurando o contraste entre a rebarba e o fundo do canal. A escala da imagem original é mantida (etapa d). Em seguida, é calculada a área de rebarba com o auxílio do software Image J, uma vez que a escala está presente na imagem e permite a calibração do programa. Importante ressaltar que as rebarbas formadas no lado discordante e concordante foram separadas, pois foram analisadas de maneira individual.

3.8.3. Desgaste das Ferramentas

Para avaliar o desgaste foram comparadas as imagens de topo (superfície secundária de folga) feitas no MEV antes e depois dos ensaios. Através do software *Image J* é possível medir o diâmetro inicial e, posteriormente, o diâmetro final, assim a perda de diâmetro da microfresa é conhecida e foi utilizada para quantificar o desgaste. A Fig. 3.18 demonstra o procedimento a ser adotado.

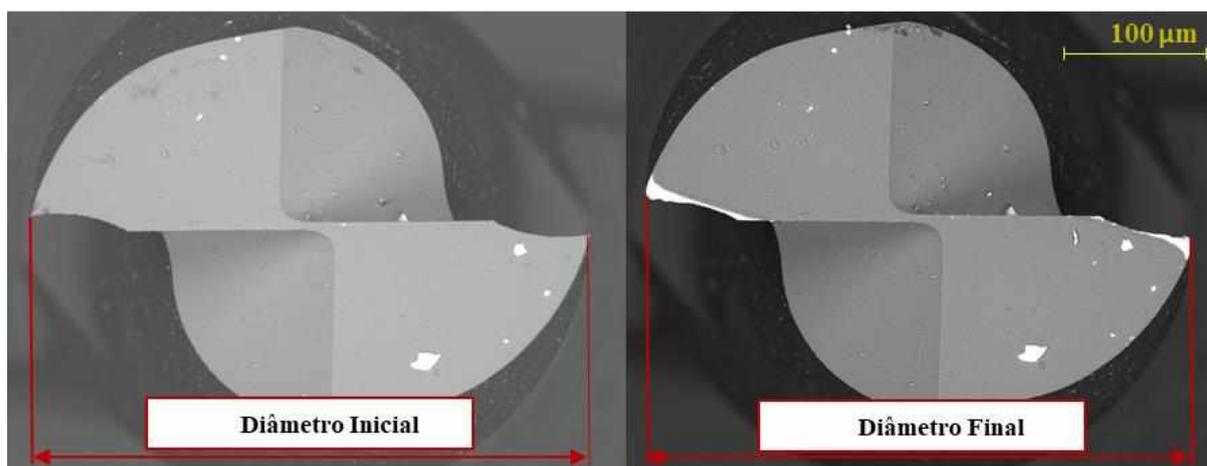


Figura 3.18 - Representação da metodologia para medição do desgaste da ferramenta através da comparação do diâmetro inicial e final

Para ser possível comparar as fresas de diferentes fabricantes, o resultado de desgaste deve ser expresso como percentual de perda de diâmetro, conforme mostrado na Equação 3.2. Esse método foi empregado pois os diâmetros das

ferramentas podem ter variações devido ao processo de fabricação, sendo essas variações da mesma ordem de grandeza que o desgaste ocasionado após a usinagem.

$$\% \text{Desgaste} = \frac{\text{Diâmetro Inicial} - \text{Diâmetro Final}}{\text{Diâmetro Inicial}} \times 100 \% \quad (3.2)$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no microfresamento do aço ferramenta ABNT H13 com cinco modelos de microfresas de metal duro revestidas com TiAlN, TiCN ou AlCrN, sendo os parâmetros de corte mantidos constantes. Os resultados foram divididos em quatro itens que serão analisados e discutidos na seguinte sequência: análise do desgaste das microfresas, análise da rugosidade, análise da superfície usinada e análise das rebarbas formadas nos microcanais.

4.1. Análise do Desgaste das Microfresas

Nesta seção serão apresentados os desgastes das ferramentas utilizadas após 116 mm usinados, visto que a medição foi feita somente após a finalização dos 10 canais. Conforme mencionado anteriormente, a medição foi feita através da variação do diâmetro da microfresa. Serão apresentadas também as análises estatísticas para atestar se a variação da ferramenta é significativa para o valor de desgaste bem como correlacionar os principais parâmetros geométricos com os resultados obtidos nos ensaios.

A Figura 4.1 contém imagens obtidas através do MEV de todas as ferramentas utilizadas, tanto nos testes quanto nas réplicas, totalizando 10 microfresas. As imagens são da superfície secundária de folga antes e depois da usinagem. Cada quadrante (cinco no total) delimitados pelo retângulo em preto contém as imagens das fresas do mesmo fabricante. Para facilitar as análises e

discussões, as ferramentas foram numeradas, sendo que a ferramenta 1 de cada modelo foi aquela utilizada no primeiro ensaio, enquanto a ferramenta 2 foi utilizada na réplica. As imagens superiores de cada quadrante correspondem as ferramentas novas, as inferiores são das ferramentas usadas.

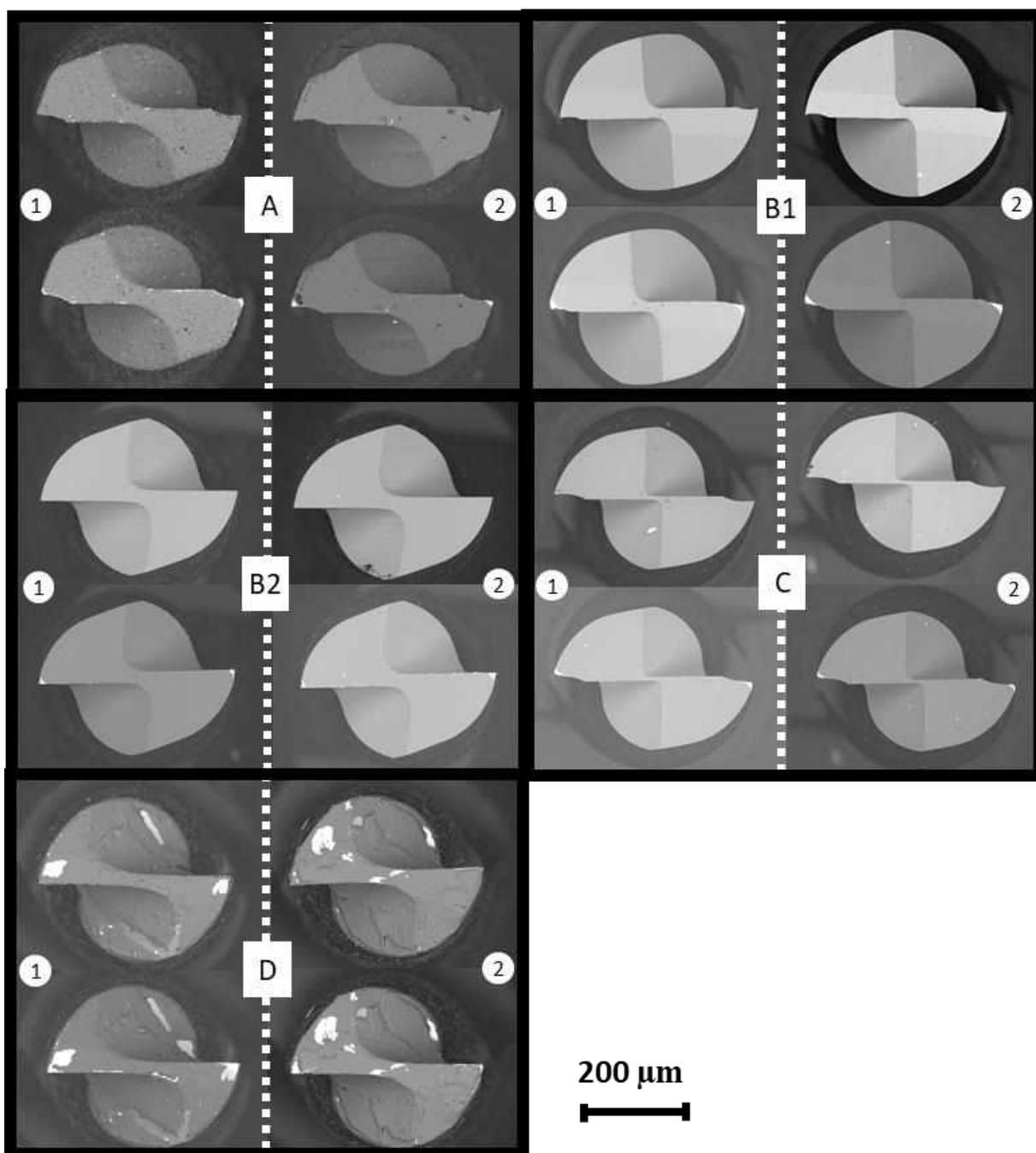


Figura 4.1 - Imagens das ferramentas antes e após a usinagem de 116 mm

Visualmente, nota-se que o volume desgastado é pequeno para as condições de corte utilizadas, afirmação que pode ser atestada pelos valores de desgaste apresentados na Fig. 4.2, que contém os resultados numéricos da perda de diâmetro para ferramenta dos diferentes fabricantes. As ferramentas do tipo B2 e D, por exemplo, tiveram um desgaste muito baixo, com pouca alteração na geometria da aresta de corte, havendo um efeito maior apenas sobre o revestimento. Já as ferramentas do tipo A e B1, o desgaste foi mais severo, havendo arredondamento e deformação da aresta de corte.

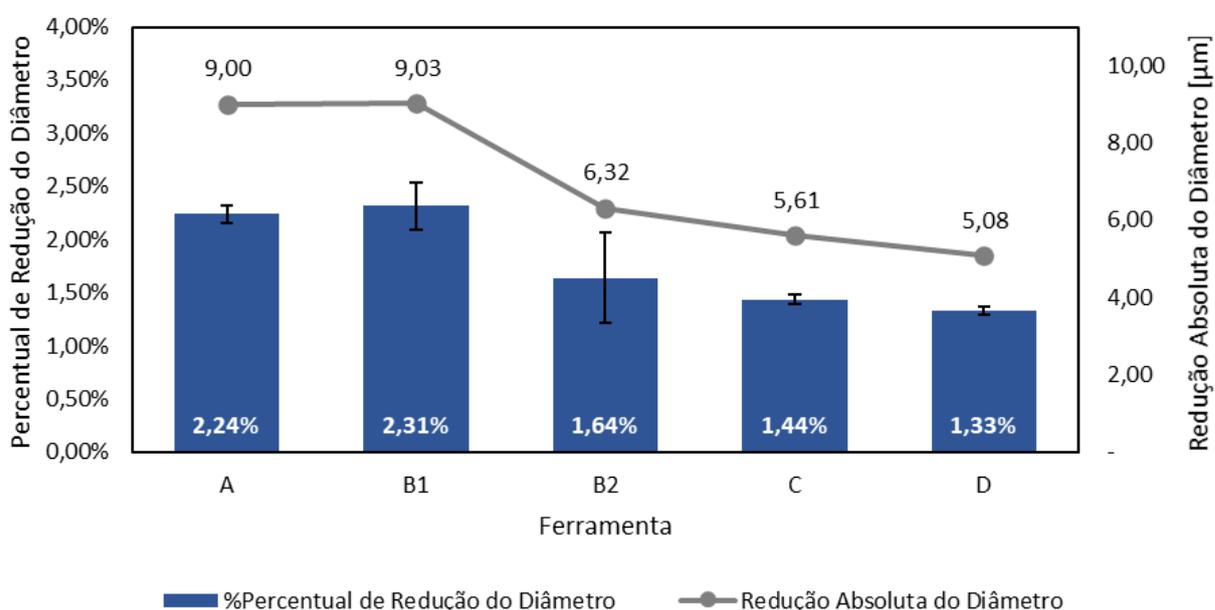


Figura 4.2 - Resultado de desgaste médio para as diferentes ferramentas

Quantitativamente, os maiores desgastes foram nos ensaios com as ferramentas do tipo B1, atingindo a média de 2,31 % de redução de diâmetro. As ferramentas do fabricante A alcançaram resultado semelhante, com perda de 2,24 % no valor do diâmetro em relação à medição inicial, apenas 3,0 % a menos que as ferramentas B1. Por outro lado, o melhor resultado de desgaste foi encontrado nas ferramentas fornecidas pelo fabricante D, 1,33 % de redução de diâmetro, ou seja, 42,4 % a menos que B1. Por fim, as microfresas dos modelos B2 e C também atingiram resultados satisfatórios, 1,64 % e 1,44 %, respectivamente. Ao compará-

las com os valores obtidos com as fresas B1, é possível notar que os seus desempenhos foram superiores em 29,0 % e 37,7 %, respectivamente.

Dos Santos (2020), em seu trabalho experimental, fez o levantamento da curva de desgaste da ferramenta ao usinar liga de titânio (Ti-6Al-4V) com ferramenta de metal duro, revestida com AlCrN e 400 μm de diâmetro. Ela utilizou diferentes parâmetros de corte e, mesmo após a ferramenta perder mais de 4 % do diâmetro inicial, ainda foi possível continuar fresando o material sem perdas expressivas na qualidade dos canais usinados. Gomes (2019), ao avaliar a rugosidade superficial no microfresamento do aço inoxidável AISI 316L, com ferramenta de metal duro revestida com TiAlN e 400 μm de diâmetro, definiu que o critério de fim de vida das microfresas utilizadas deveria ser 18,2 μm de redução no diâmetro. Ao analisar as imagens das microfresas, os valores de desgastes que elas sofreram e comparar com os demais trabalhos apresentados, é possível afirmar que, dadas as condições de corte e o valor do comprimento usinado, o desgaste das ferramentas utilizadas foi muito pequeno, permitindo que elas fossem utilizadas no microfresamento de mais canais.

A fim de confirmar se as variações nas características (geometria e revestimento) das ferramentas são significativas nos resultados de desgaste, foi feita a análise de variância (ANOVA) com um único fator (ferramenta) e cinco níveis (modelo da ferramenta). O intervalo de confiança adotado foi de 95 %. A hipótese nula (H_0), neste caso, é de que as variações nas ferramentas não têm relação com os resultados de desgaste encontrados. Já a hipótese alternativa (H_1), é que as diferenças nas características das ferramentas são significativas para o desgaste.

O resultado do R^2 para o modelo traçado foi de 99,13 %, revelando elevada qualidade do ajuste para o modelo, pois quanto mais próximo de 100 %, melhor o modelo explica a variância dos dados coletados. Com esta análise, obteve-se que o F-valor foi de 142,48 e o p-valor foi de 0,000. Como o intervalo é de 95 %, qualquer resultado de p-valor abaixo de 5 % indica que as variações nas ferramentas são significativas para os resultados de desgaste encontrados. Como nessa análise, o p-valor foi de 0,000, confirmou-se que as alterações nas ferramentas são significativas na variável resposta, que é o desgaste.

Sabendo que as variações nas ferramentas têm influência significativa no desgaste, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson para cada parâmetro geométrico e o percentual de perda de diâmetro. O coeficiente de Pearson é uma métrica estatística que apura a força e a direção de uma relação linear entre duas variáveis. Os resultados são expressos entre -1 e 1 e, quanto mais próximo destes valores mais forte é a correlação entre as variáveis. Caso o coeficiente seja negativo, indica que as variáveis têm comportamentos opostos, ou seja, enquanto uma aumenta a outra tende a reduzir, contudo, se o coeficiente for positivo, significa que a relação entre elas é uma proporção direta, quando uma aumenta a outra também aumentará (BENESTY et al., 2008). Os resultados para cada coeficiente de correlação calculado estão contidos na Tab. 4.1

Tabela 4.1 - Correlação entre os parâmetros geométricos e desgaste da ferramenta

	Ângulo de Posição Primário	Ângulo de Posição Secundário	Ângulo de Ponta	Ângulo de Cunha	Raio de Ponta	Raio de Aresta
Coefficiente de Correlação	0,84	0,85	-0,88	0,01	-0,14	-0,10

Baseando-se nos coeficientes de correlações obtidos, é possível afirmar que apenas três parâmetros da geometria de uma microfresa tiveram influência nos resultados de desgaste obtidos ao usinar o aço ferramenta H13, sendo eles: ângulo de posição primário, ângulo de posição secundário e ângulo de ponta. Como os coeficientes entre o desgaste e os ângulos citados ficaram muito próximos de |1|, a correlação entre as variáveis é forte. Para o ângulo de cunha, raio de ponta e raio de aresta, a correlação obtida é fraca ou nula, pois os valores dos coeficientes foram próximos de zero.

Outra conclusão importante acerca dos coeficientes é a direção da correlação. Os ângulos de posição primário e secundário mostram uma correlação forte positiva, o que indica que eles possuem uma relação direta com o desgaste da microfresa. Quando se aumenta os valores destes ângulos o desgaste também tende a aumentar. Para o ângulo de ponta, a correlação obtida foi forte, porém no

sentido negativo, indicando proporção inversa entre as variáveis, ou seja, ao aumentar o ângulo de ponta, o desgaste da microfresa irá diminuir.

A Figura 4.3 contém três gráficos correlacionando os principais parâmetros geométricos que afetam o desgaste da microfresa com o percentual de redução do diâmetro. É possível perceber que os dados se adequam bem a uma reta traçada entre eles, uma vez que possuem forte correlação. A inclinação das retas também está relacionada com o coeficiente de correlação de Person. Enquanto os gráficos A e B contém retas com inclinação positiva, pois o coeficiente é positivo, o gráfico C tem reta com inclinação negativa, visto que o coeficiente se aproxima de -1.

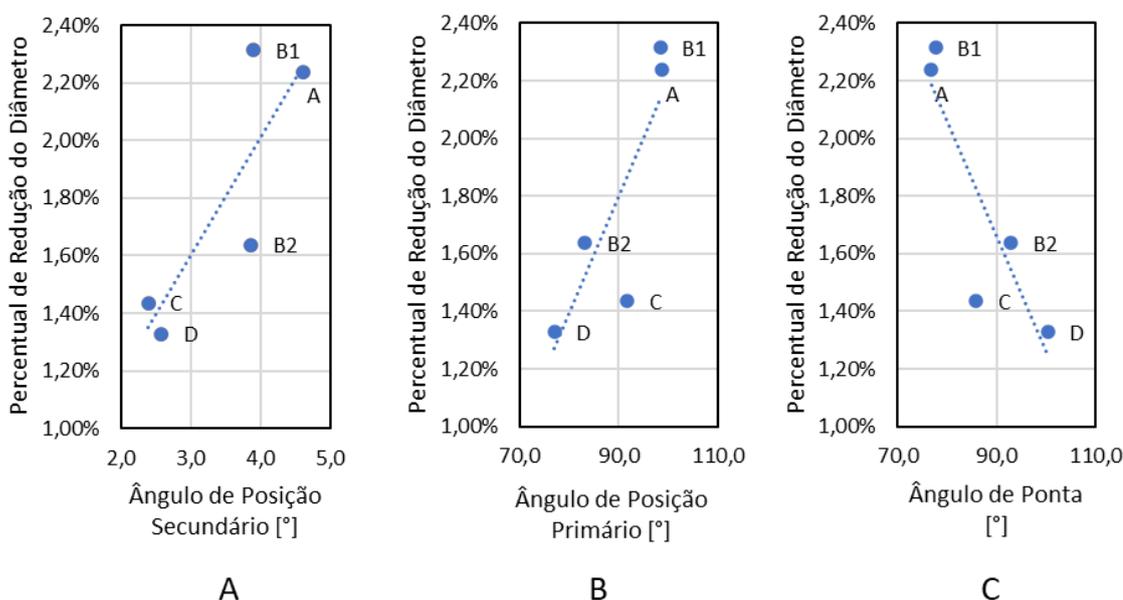


Figura 4.3 - Gráficos que relacionam os Parâmetros Geométricos com o Desgaste: A) Ângulo de Posição Secundário x Desgaste; B) Ângulo de Posição Primário x Desgaste; C) Ângulo de Ponta x Desgaste

Através também da Fig. 4.3 (B) e Fig. 4.3 (C) é possível perceber que a ferramenta C se distancia levemente da reta traçada. Apesar do ângulo de ponta menor que o da ferramenta B2 e/ou um ângulo de posição primário maior do que o ângulo da microfresa B2, o seu desgaste foi menor. Biermanna et al. (2013), ao avaliarem revestimentos de microfresas, afirmaram que o AlCrN possui dureza de 3500 HV, que é superior à dureza dos demais, sendo 2500 HV, 3300 HV e 2200 HV

para os revestimentos TiN, TiAlN e TiCN, respectivamente. Já Aslantas et al. (2016), em seu trabalho experimental, avaliaram diferentes revestimentos ao microfresar a liga de titânio Ti-6Al-4V, concluindo que a dureza do revestimento é um dos principais fatores que afetam o desgaste da ferramenta. Assim, é possível afirmar que a ferramenta C, apesar de não ter uma geometria tão favorável, apresentou baixo desgaste por ser a única revestida com AlCrN, que é o mais duro dentre os avaliados.

O ângulo de posição primário afeta significativamente o processo de corte porque, para um determinado avanço e profundidade de corte, ele define a espessura de corte, a largura de corte e, portanto, a vida útil da ferramenta. O contexto físico deste fenômeno pode ser explicado da seguinte forma: quando se diminui este ângulo, a largura do cavaco aumenta de forma correspondente porque a parte ativa da aresta de corte aumenta. Isso resulta em melhor remoção de calor da ferramenta e, portanto, redução do desgaste. Esta é a razão para que o ângulo de posição primário e o desgaste apresentem forte correlação positiva. No entanto, ao reduzir o ângulo mencionado há também desvantagens. Uma delas é o aumento da componente radial da força de corte, que reduz a precisão e a estabilidade da usinagem, principalmente quando a máquina, porta-ferramentas e fixação da peça não são suficientemente rígidos (ASTAKHOV; DAVIM, 2008).

A forte correlação negativa entre o ângulo de ponta e o desgaste da microfresa pode ser explicada pelo aumento na resistência da ferramenta e na área de contato ferramenta-cavaco, bem como uma redução no ângulo de posição primário, resultando em maior vida útil da ferramenta (EZUGWU et al., 1999).

4.2. Análise da Rugosidade

Nesta seção serão apresentados os resultados de rugosidade por canal usinado (11,6 mm), bem como a média geral por cada uma das ferramentas utilizadas. Assim como mencionado anteriormente, foram feitas três medições por canal usinado. O parâmetro utilizado para fazer todas as análises neste trabalho foi o Ra. Serão apresentadas também as análises estatísticas para atestar se a variação da ferramenta é significativa para rugosidade da superfície usinada bem

como correlacionar os principais parâmetros geométricos com os resultados obtidos nos ensaios.

Os resultados de rugosidade média por ferramenta são mostrados na Fig. 4.4. Os valores representados são a média dos 20 canais usinados, sendo 10 deles fresados com a ferramenta 1 de cada fabricante e os outros 10 obtidos com a ferramenta 2.

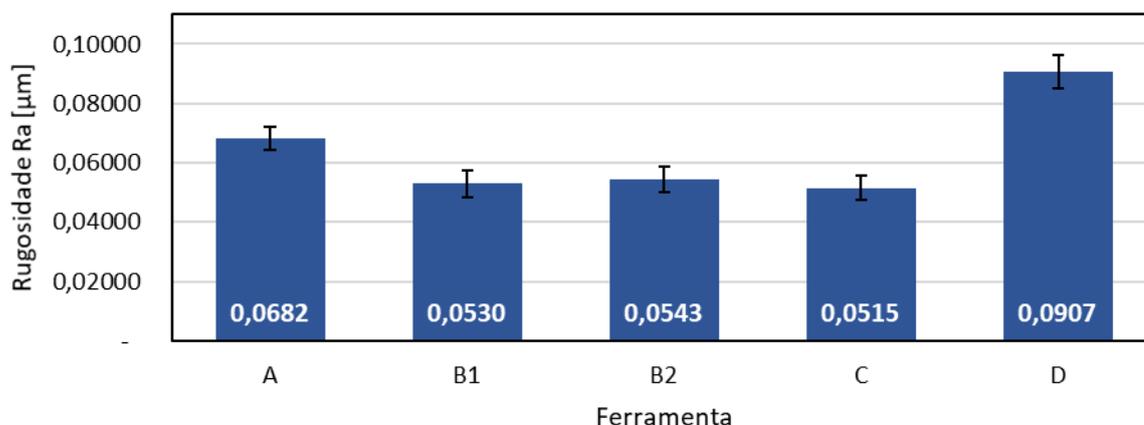


Figura 4.4 - Rugosidade média por modelo de ferramenta

A ferramenta C foi a que apresentou os melhores resultados de rugosidade, 0,0515 μm . As ferramentas B1 e B2 também apresentaram bons resultados, enquanto a rugosidade dos canais usinados com B1 foram, em média, 0,0530 μm , B2 proporcionou uma rugosidade superficial de 0,0543 μm , porém foram 2,9 % e 5,44 % maiores que os resultados obtidos pela ferramenta C, respectivamente. Por outro lado, os piores valores de rugosidade foram atingidos com as ferramentas A e D. A rugosidade dos canais fabricados com a microfresa A foi na média de 0,0682 μm , destoando da ferramenta C em 32,4 %. Por fim, a microfresa fornecida pelo fabricante D apresentou Ra médio de 0,0907 μm , que representa cerca de 76,1 % a mais que os valores apresentados por C.

Além da rugosidade média por ferramenta, coletou-se também a rugosidade média por comprimento usinado, cujos valores estão contidos nos gráficos da Fig. 4.5. Para cada comprimento usinado foi feito uma média dos resultados obtidos no teste e na réplica com cada um dos modelos de microfresas. Importante ressaltar

que todos os gráficos possuem a mesma escala, permitindo a comparação entre eles.

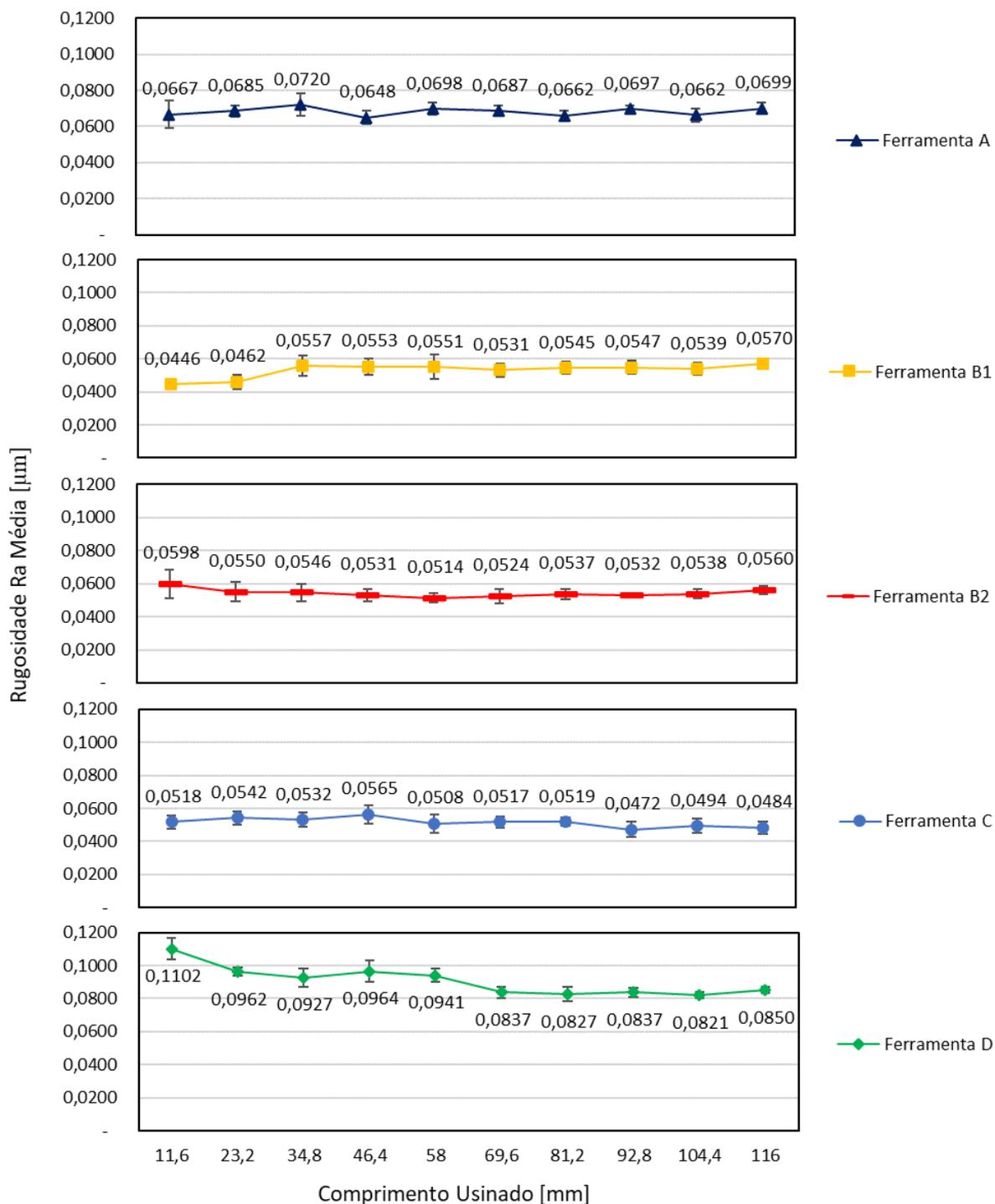


Figura 4.5 - Gráficos da rugosidade superficial por comprimento usinado para cada uma das ferramentas utilizadas

Analisando o comportamento da rugosidade ao longo do comprimento usinado, é possível perceber que, dadas as condições de corte e o material usinado, não há grandes variações ao longo da vida das microfresas. A única exceção é para a ferramenta do tipo D, para qual há uma queda nos resultados e cuja diferença entre a rugosidade do primeiro e do último canal é de aproximadamente 22,87 %.

Assim como foi feito para o desgaste das ferramentas, foi feita também a análise de variância (ANOVA), com o intuito de confirmar se as variações nas características de cada microfresa são significativas também na rugosidade Ra. Neste caso a ANOVA teve dois fatores (ferramenta e comprimento usinado), sendo cinco níveis para o fator ferramenta e 10 níveis para o fator comprimento usinado. O intervalo de confiança adotado foi de 95 %. A hipótese nula (H_0), neste caso, é que tanto as variações nas ferramentas quanto o comprimento usinado não têm relação com os resultados de rugosidade superficial. Já a hipótese alternativa (H_1), é que as diferenças nas características das ferramentas e o comprimento usinado são significativos para a rugosidade do canal.

O resultado do R^2 para o modelo traçado foi de 85,55 %, revelando elevada qualidade do ajuste para o modelo, pois quanto mais próximo de 100 %, melhor o modelo explica a variância dos dados coletados. Com esta análise, obteve-se os resultados de f-valor e p-valor mostrados na Tab. 4.2.

Tabela 4.2 - Resultados da ANOVA para a rugosidade superficial

Fator	f-valor	p-valor
Ferramenta	67,61	0,000
Comprimento Usinado	0,44	0,904
Ferramenta e Comprimento Usinado	0,60	0,944

Como o intervalo é de 95 %, qualquer resultado de p-valor abaixo de 5 % indica que o fator investigado ou a combinação deles é significativo no resultado de Ra. Nessa análise, apenas a ferramenta (e suas características) são significativas, pois o p-valor foi de 0,000, confirmando que, as alterações nas ferramentas impactam diretamente na rugosidade do canal.

Para compreender quais parâmetros geométricos tiveram maior influência sobre a rugosidade, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson, assim como havia sido feito para o desgaste. Os resultados encontrados estão representados na Tab. 4.3.

Tabela 4.3 - Correlação entre os parâmetros geométricos e a rugosidade da superfície do canal

	Ângulo de Posição Primário	Ângulo de Posição Secundário	Ângulo de Ponta	Ângulo de Cunha	Raio de Ponta	Raio de Aresta
Coefficiente de Correlação	-0,57	-0,22	0,56	-0,25	0,94	0,93

Baseado nos resultados do coeficiente de correlação, é possível afirmar que apenas os raios de ponta e de aresta apresentaram forte correlação com a rugosidade dos canais. Além do mais, a correlação é positiva, indicando que, ao aumentar os raios das ferramentas, ocorre também aumento do Ra, conforme é retratado na Fig. 4.6.

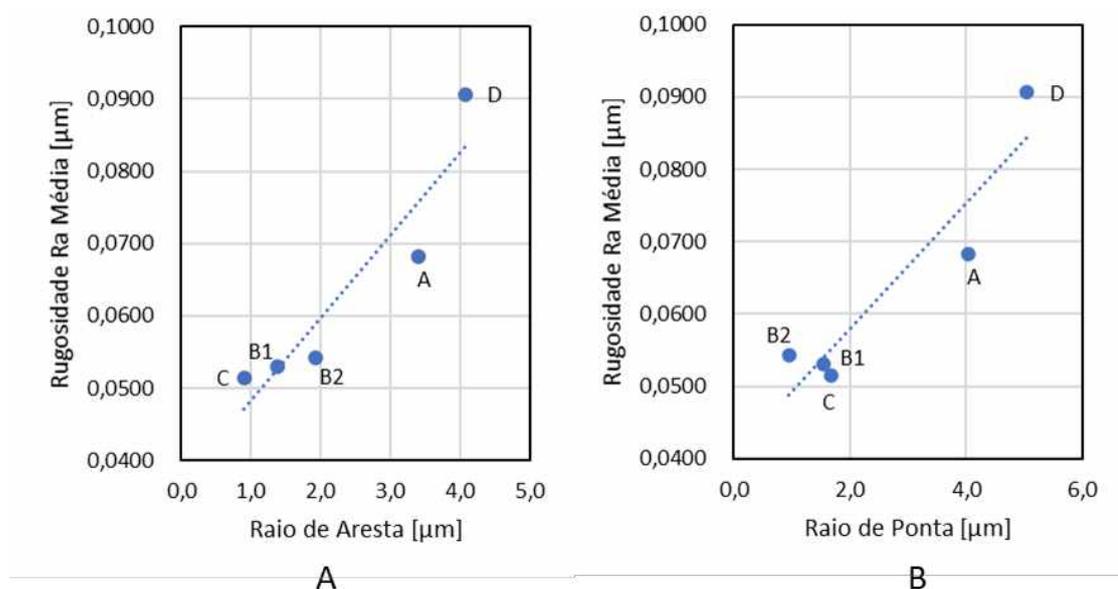


Figura 4.6 - Gráficos que relacionam os Parâmetros Geométricos com a Rugosidade: A) Raio de Aresta x Ra; B) Raio de Ponta x Ra

A relação entre raio da aresta de corte e rugosidade obtida nos experimentos segue o mesmo padrão apresentado por Aramcharoen e Mativenga (2009). Os autores também microfresaram o aço ferramenta ABNT H13 e observaram que o aumento do raio de aresta em relação ao avanço aumenta também a rugosidade superficial. De acordo com Chae et al. (2006), o raio da aresta é relativamente grande em relação à espessura de corte, promovendo a deformação plástica do material. Além disso, na microusinagem, o cavaco passa um ângulo de saída muito negativo e que aumenta o efeito sulcamento. Assim, quanto maior o raio da aresta, maior a quantidade de material deformado plasticamente ao invés de ser removido, aumentando a rugosidade da superfície.

De acordo com o modelo teórico apresentado por Meijer et al. (2019) e explanado no capítulo 2 deste trabalho, era esperado que a rugosidade apresentasse uma correlação negativa com o raio de ponta, bem como uma correlação positiva com o ângulo de posição secundário. Todavia, a influência do raio de aresta prevaleceu sobre os demais parâmetros geométricos. O fato de haver uma forte correlação positiva entre o raio de ponta e a rugosidade ocorre pois os raios de aresta e de ponta estão fortemente correlacionados, consonante é mostrado na Fig. 4.7. A correlação entre ambos os raios para os modelos de microfresas utilizadas é de 0,91, o que significa que, ao aumentar o raio de ponta, ocorre também um aumento do raio de aresta, provocando piora na qualidade da superfície usinada.

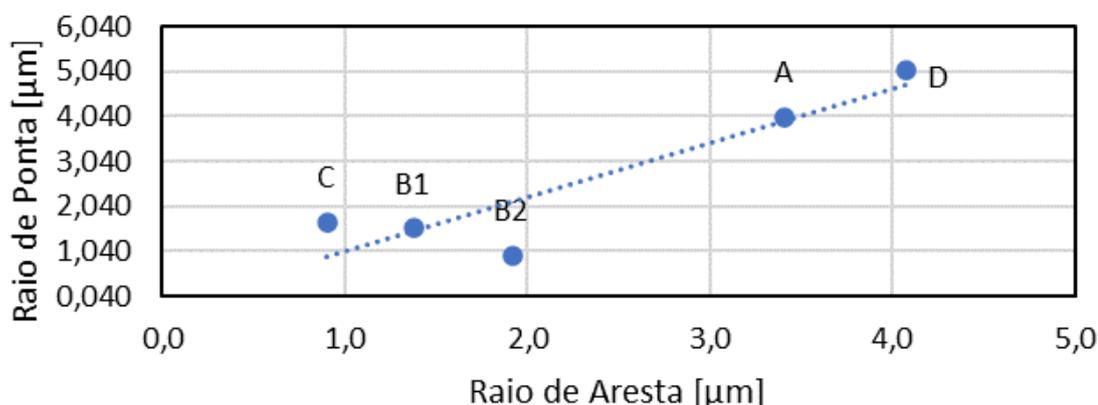


Figura 4.7 - Relação entre Raio de Aresta e Raio de Ponta

Sabendo que o raio de aresta é a característica geométrica mais influente na rugosidade do canal, é possível explicar também a diminuição da rugosidade ao longo do comprimento usinado ao utilizar a ferramenta D mostrado na Fig. 4.5. Por essa ferramenta apresentar uma tendência anormal de Ra ao longo dos canais, foi medido novamente o raio de aresta após os 10 canais usinados e feito uma média dos valores obtidos para as duas ferramentas utilizadas. O raio da ferramenta D após a usinagem era de 2,050 μm , mostrando uma redução de 49,7 % em relação ao raio inicial (4,071 μm). A Fig. 4.8 evidencia a variação no raio de aresta mencionada.

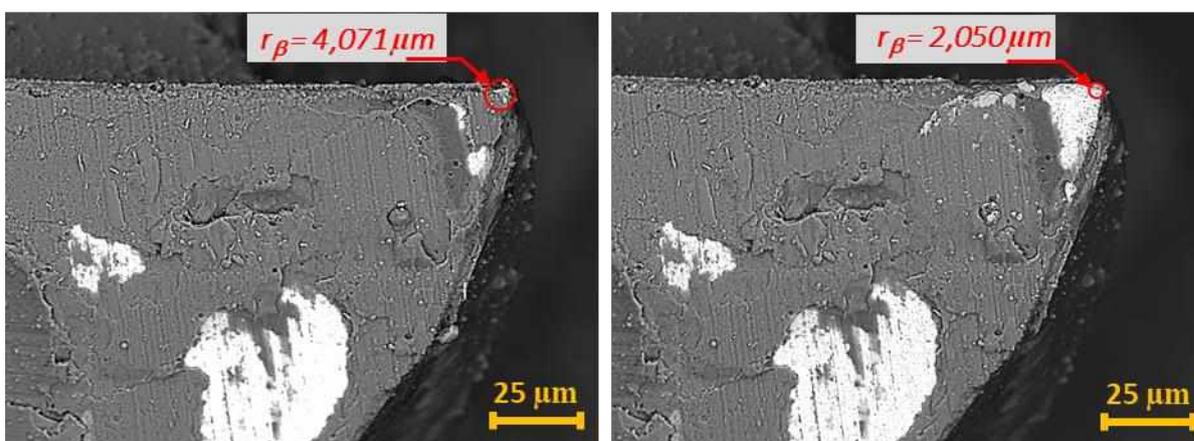


Figura 4.8 - Redução no raio de aresta da ferramenta D

A variação do raio da ferramenta D pode ser explicada pela perda do revestimento. Conforme Aslantas et al. (2016), o revestimento de uma microfresa tem influência direta no raio de aresta, que aumenta devido à espessura da camada de material aplicado. Assim, à medida que a ferramenta D usinava a peça, ela perdia também o seu revestimento, que já possuía baixa qualidade inicialmente, com sinais de falhas e com a aplicação, visivelmente, de baixa qualidade, como é possível observar na Fig. 4.9. Ao perder o revestimento, o raio de aresta diminuiu, melhorando a rugosidade da superfície. Entretanto, caso o microfresamento com estas ferramentas continuassem, ocorreria um desgaste de ponta mais acentuado, promovendo arredondamento da aresta e elevando novamente o valor de Ra.

Segundo Aramcharoen et al. (2008), a qualidade do revestimento tem influência direta sobre a rugosidade da superfície usinada, sendo um fator a ser levado em consideração durante a seleção das microfresas. O efeito da qualidade do revestimento também foi observado neste trabalho.

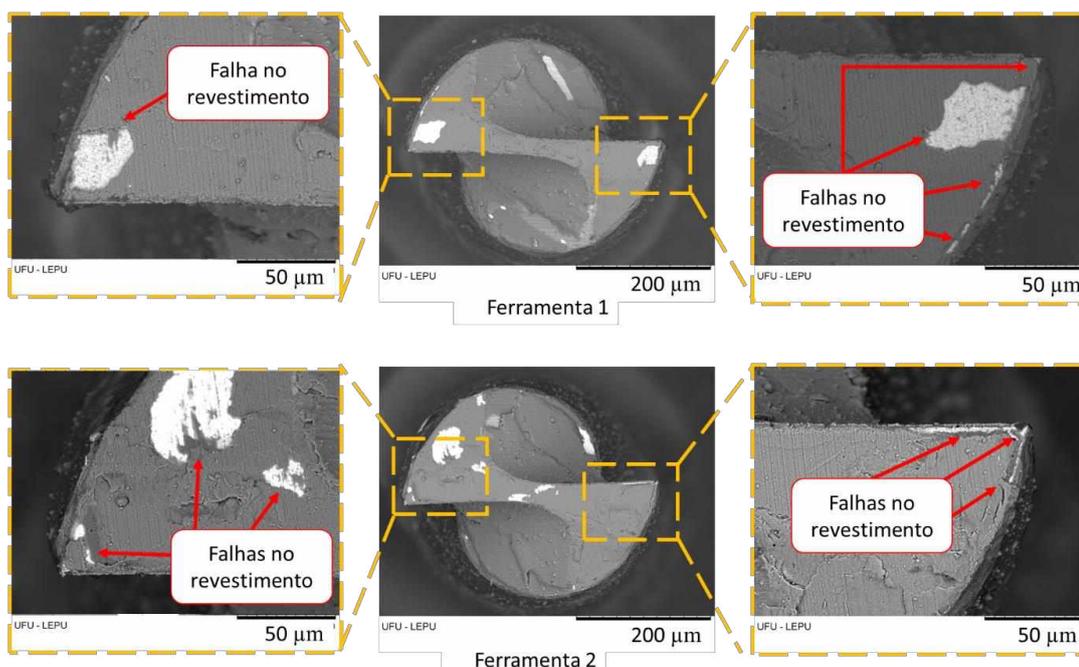


Figura 4.9 - Detalhes do revestimento da ferramenta D

4.3. Análise da Superfície Usinada

Esta seção contém a análise qualitativa da superfície usinada. Para corroborar com o estudo da rugosidade dos microcanais, foi feita também uma análise dos canais através das fotos tiradas no MEV. Foram analisadas principalmente as marcas de avanço no fundo dos canais.

A Figuras 4.10 e 4.11 contém as fotos dos canais 1, 5 e 10 feitos com cada ferramenta, considerando os testes e as réplicas. Elas correspondem à posição intermediária dos canais (aproximadamente 5,8 mm da borda da amostra utilizada). As letras correspondem aos modelos das microfresas e os números se referem à ordem em que elas foram utilizadas, sendo 1 para os primeiros testes e 2 para as réplicas realizadas.

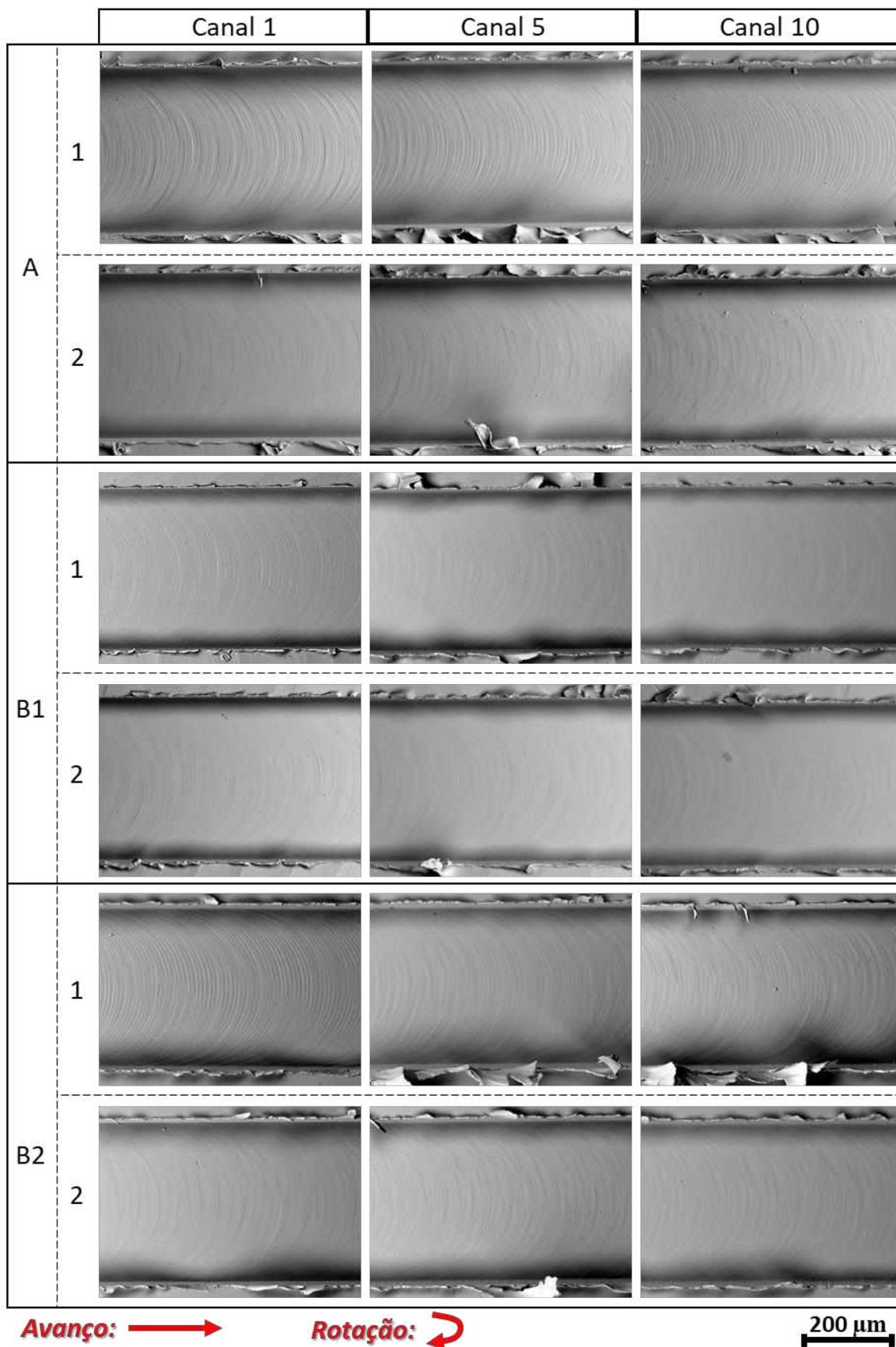


Figura 4.10 - Fotos dos fundos dos canais usinados com as ferramentas A, B1 e B2 (Aumento de 400x)

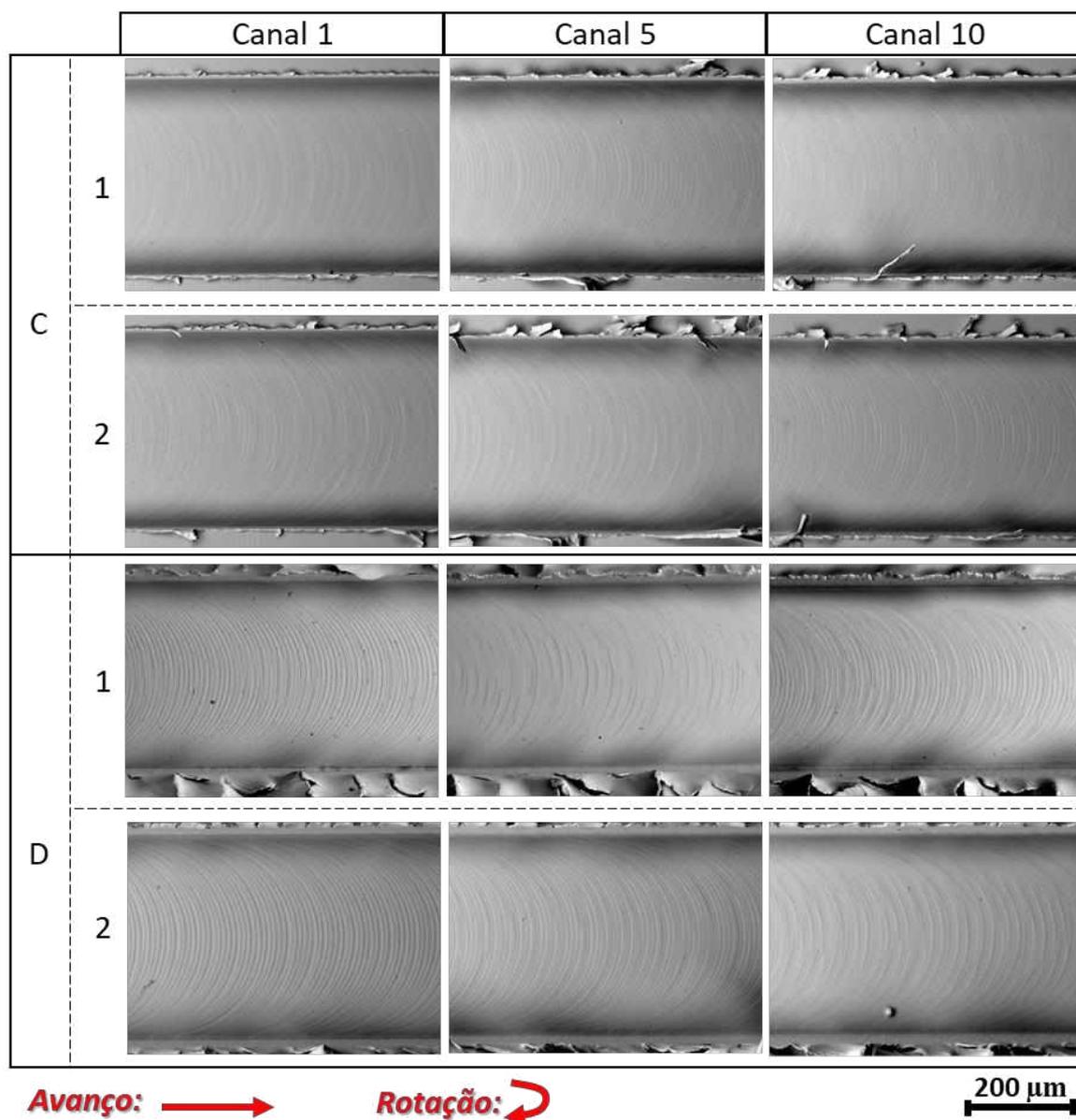


Figura 4.11 - Fotos dos fundos dos canais usinados com as ferramentas C e D (Aumento de 400x)

Analisando as superfícies usinadas, é possível perceber que, para as ferramentas que apresentaram maior rugosidade, A e D, as marcas no fundo do canal são mais evidentes. Por possuírem raios de arestas maiores que as demais, as superfícies usinadas com estas ferramentas tendem a apresentar maior deformação plástica, fazendo com que o corte não seja perfeito e marcas sejam deixadas nos canais. Este é o mesmo efeito discutido na seção anterior (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

Para valores de rugosidade superficial muito baixos, como os apresentados pelas ferramentas B1, B2 e C, as marcas na superfície são muito suaves, sendo bastante difícil de identificar em alguns canais com a ampliação utilizada.

Algumas ferramentas, principalmente as microfresas dos modelos A e D, apresentaram marcas de avanço incomuns no fundo do canal, pois possuem sentido diagonal (45°) e apresentam padrão de repetição em sua ocorrência, conforme é retratado na Fig. 4.12.

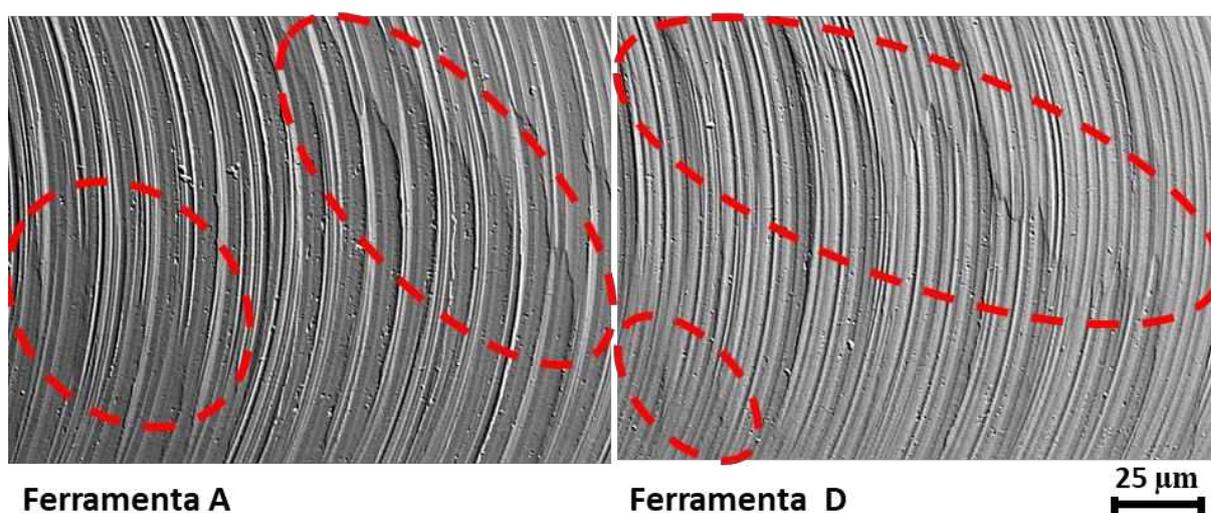


Figura 4.12 - Marcas de avanço no quinto canal fabricados com as ferramentas A e D (Aumento de 1500x)

Estas marcas provavelmente são devidas ao *chatter*. O *chatter* é uma forma de vibração auto excitada causada pelas características de um sistema de usinagem sob ação de uma força de excitação contínua. Geralmente explicita a forte vibração relativa entre uma ferramenta e uma peça de trabalho em um processo de usinagem (YUE et al., 2019).

Devido à diminuição da rigidez da ferramenta com a redução do diâmetro, as microfresas têm uma baixa resistência à esforços. O atrito da aresta de corte e as deformações da ferramenta e da peça podem levar ao aparecimento do *chatter*, responsável por um acabamento superficial ruim, podendo até danificar a ferramenta de corte. As deformações plásticas e elásticas são os principais desafios

encontrados na microusinagem em relação à vibração (Li et al., 2014). Por conta disso, as ferramentas A e D, que possuem os maiores raios, foram as que apresentaram uma maior quantidade de marcas diagonais no fundo dos canais, visto que são as mais propensas à deformação plástica do material usinado.

Para confirmar a influência das microfresas na vibração do sistema ferramenta-peça, seria necessário a captura dos sinais de vibração para posterior análise. Entretanto, não foi possível coletar estas informações neste trabalho, impossibilitando conclusões mais detalhadas acerca deste tema.

4.4. Análise da Formação de Rebarbas

Nesta seção serão apresentados os resultados da formação de rebarba de topo por canal usinado (11,6 mm), bem como a média geral por cada uma das ferramentas utilizadas. Assim como mencionado anteriormente, foi feita a medição da área da rebarba (concordante e discordante separadamente) em três pontos diferentes do canal. As demais rebarbas (lateral, entrada e saída) também foram inicialmente medidas, contudo não foram analisadas pois não apresentaram quantidades expressivas se comparadas às de topo.

Os resultados foram expressos em função do comprimento avaliado, utilizando a Equação 4.1. A unidade dos resultados encontrados é $\mu\text{m}^2/\text{mm}$.

$$\textit{Quantidade de Rebarba} = \frac{\textit{Área de Rebarba}}{\textit{Comprimento Avaliado}} \quad (4.1)$$

Também serão apresentadas as análises estatísticas a fim de validar a influência da variação das ferramentas e comprimento usinado na formação das rebarbas. Além do mais, serão discutidos os parâmetros geométricos mais determinantes para os resultados encontrados. Por fim, serão discutidos também o tipo de rebarba formado.

O gráfico da Fig. 4.13 contém a quantidade média de rebarbas formadas durante o microfresamento com cada ferramenta. Os valores do gráfico são médias dos resultados obtidos em cada canal, tanto no teste quanto na réplica. Além do mais, os dados estão separados pelo tipo de fresamento que originou as rebarbas: concordante e discordante.

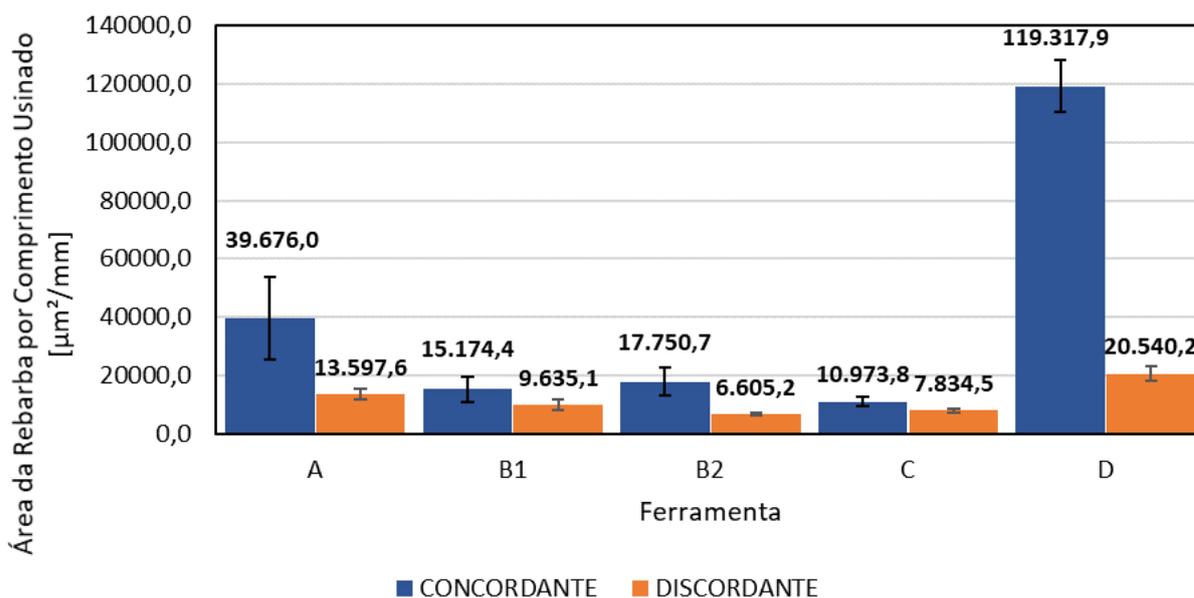


Figura 4.13 - Quantidade de rebarba de topo para cada modelo de microfresa

Os melhores resultados de rebarba para o fresamento concordante foram obtidos com a ferramenta do tipo C. Em seguida vieram as ferramentas B1, B2, A e D, cujas as rebarbas foram respectivamente 38,3 %, 61,8 %, 261,6% e 987,3% maiores que os valores obtidos com a microfresa do tipo C. Já no fresamento discordante, foi a fresa B2 que proporcionou a menor quantidade de rebarbas por comprimento usinado. A ferramenta C alcançou um resultado apenas 18,6 % acima que B2, enquanto a formação de rebarba de topo nas microfresas B1, A e D superou a fresa B2 em 45,9 %, e 105,9 % e 211,0 %, respectivamente.

Para analisar a formação das rebarbas ao longo do comprimento usinado, os dados foram agrupados no gráfico da Fig. 4.14. Os resultados da quantidade de rebarba por canal corresponde à média dos valores obtidos nos testes e nas réplicas

e eles foram separados de acordo com o tipo de fresamento: concordante ou discordante.

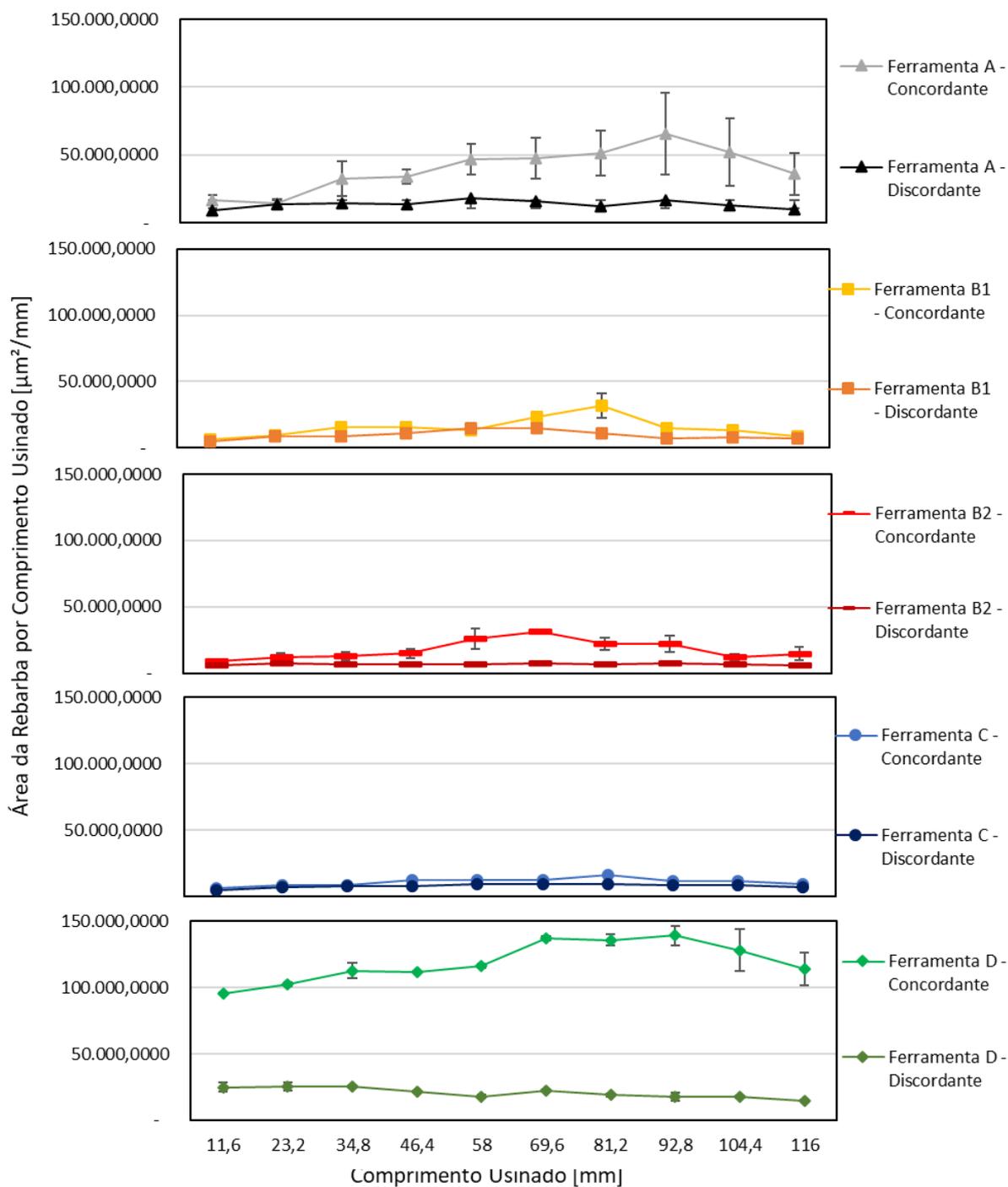


Figura 4.14 - Quantidade de rebarba por comprimento usinado para cada ferramenta

Ao analisar os gráficos apresentados anteriormente, é possível notar a discrepância entre a quantidade de rebarbas formadas no fresamento concordante e discordante para as mesmas ferramentas. A área das rebarbas no fresamento concordante foi, em média, 248,54 % maior que o resultado obtido no fresamento discordante. Este comportamento é comum no microfresamento e já foi observado por outros autores.

Segundo Biermann e Steiner (2012), a principal razão para esta característica na formação de rebarbas de topo pode ser encontrada na cinemática do corte. Para o fresamento discordante, a espessura de corte é zero no início do corte, assim, o material é comprimido e empurrado em um primeiro momento. Com o aumento da espessura de corte, a sustentação de material que ainda será cortada também aumenta, levando ao cisalhando. Ao contrário disso, o efeito do material de sustentação é menor durante o fresamento concordante. Quando a espessura de corte reduz, o material não é perfeitamente cisalhado, o que ocorre na última etapa do corte do fresamento concordante. Assim, o material não é cortado, mas sim empurrado na direção da menor resistência, que é o lado superior do canal.

Ao comparar o primeiro canal, com os últimos canais usinados, é possível perceber uma tendência de alta no volume de rebarbas formadas, tanto no fresamento discordante quanto no concordante. Aslantas et al. (2016), em seu trabalho experimental, investigaram ferramentas com diferentes revestimentos, encontrando resultados de formação de rebarba com comportamento semelhante. Segundo os autores, o aumento na quantidade de rebarba se deve à perda da afiação da aresta de corte devido ao desgaste abrasivo pelo qual a ferramenta está sujeita. Por conta disso, a deformação plástica prevalece sobre o microcorte, aumentando a quantidade de rebarbas formadas.

É possível notar também oscilações na área das rebarbas ao longo do comprimento usinado, com redução das rebarbas nos últimos canais, principalmente no fresamento concordante. Wanga et al. (2019) também observaram variações na quantidade de rebarbas formadas com o aumento do comprimento de corte, ao avaliar o microfresamento de liga de titânio Ti-6Al-4V. A quantidade de rebarba pode sofrer variações, principalmente devido ao desgaste da ferramenta, batimento radial, vários mecanismos de remoção de material atuantes e diferentes propriedades das

fases do material, que neste caso são ferrita e carbonetos. Todavia, é necessário um aprofundamento neste tema para maior compreensão dos fenômenos envolvidos.

Para assegurar se a variação da ferramenta e o comprimento usinado são significativos para a formação de rebarba, foi feita uma nova análise de variância. Para esta investigação, o ANOVA teve dois fatores (ferramenta e comprimento usinado), sendo cinco níveis para o fator ferramenta e 10 níveis para o fator comprimento usinado. A variável resposta da análise foi a quantidade total de rebarba por canal usinado, ou seja, a soma das rebarbas formadas no fresamento concordante e discordante. Adotou-se 95 % como intervalo de confiança. A hipótese nula (H_0), neste caso, é que tanto as variações nas ferramentas quanto o comprimento usinado não têm relação com a área das rebarbas formadas. Já a hipótese alternativa (H_1) é que as diferenças nas características das ferramentas e o comprimento usinado são significativos para a formação de rebarbas.

O resultado do R^2 para o modelo traçado foi de 93,49 %, mostrando que os dados possuem boa aderência ao modelo proposto, pois quanto mais próximo de 100 %, melhor o modelo explica a variância dos dados coletados. Com esta análise, obteve-se os resultados de f-valor e p-valor mostrados na Tab. 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados da ANOVA para a formação de rebarbas

Fator	f-valor	p-valor
Ferramenta	169,56	0,000
Comprimento Usinado	2,87	0,008
Ferramenta e Comprimento Usinado	0,38	0,999

Como o intervalo é de 95 %, qualquer resultado de p-valor abaixo de 5 % indica que o fator investigado ou a combinação deles é significativo no resultado da área das rebarbas. Nessa análise, a ferramenta (e suas características) e o comprimento de usinagem são significativos, pois o p-valor foi de 0,000 e 0,008, respectivamente, confirmando que ambos os fatores impactam diretamente na quantidade de rebarba formada.

Com a intenção compreender quais parâmetros geométricos tiveram maior influência sobre a formação das rebarbas, foi calculado o coeficiente de correlação

de Pearson, assim como havia sido feito nas análises anteriores, do desgaste e da rugosidade superficial. Todos resultados obtidos nesta etapa foram inseridos na Tab. 4.5.

Tabela 4.5 - Correlação entre os parâmetros geométricos e a área das rebarbas por comprimento usinado

	Ângulo de Posição Primário	Ângulo de Posição Secundário	Ângulo de Ponta	Ângulo de Cunha	Raio de Ponta	Raio de Aresta
Coefficiente de Correlação	-0,63	-0,33	0,63	-0,19	0,89	0,87

Novamente, os raios de ponta e de aresta foram os parâmetros geométricos que possuem o índice de correlação com a formação de rebarbas mais próximo de 1, logo, eles são as características da geometria da ferramenta de maior influência na formação das rebarbas durante o microfresamento. Como o índice é positivo para ambos, indica que o aumento dos raios promove acréscimo na quantidade de rebarbas formadas, conforme estão retratados nos gráficos da Fig. 4.15.

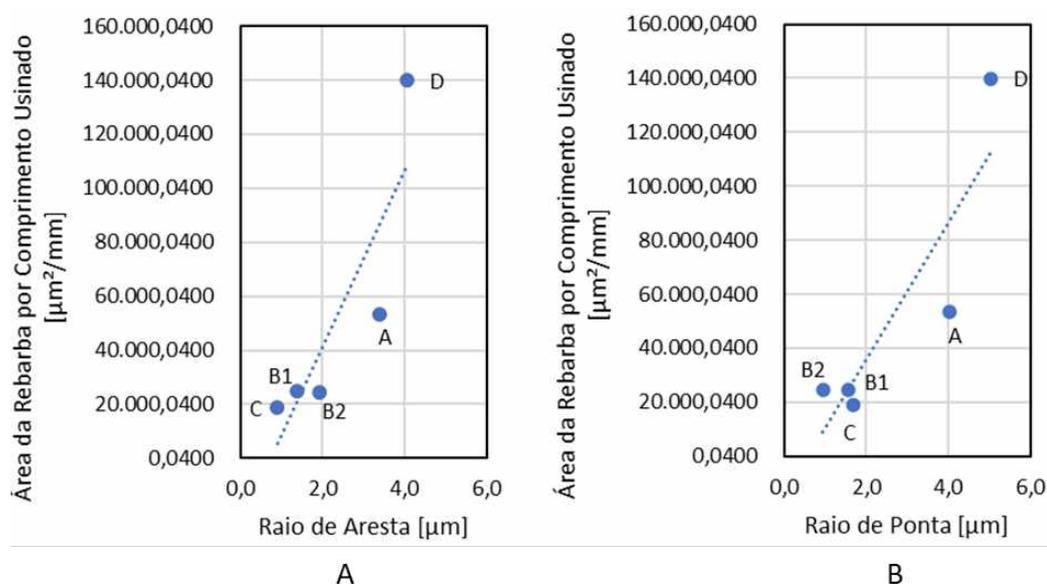


Figura 4.15 - Gráficos que relacionam os Parâmetros Geométricos com a Formação de Rebarbas: A) Raio de Aresta x Rebarba; B) Raio de Ponta x Rebarba

A relação entre o raio de ponta e as rebarbas formadas também foi observada por Olvera e Barrow (1998). Os autores investigaram o fresamento de topo com ferramentas que se diferiam quanto ao raio de ponta e concluíram que, ao aumentar o raio de ponta, ocorre aumento nas rebarbas do canal usinado, principalmente nas rebarbas primárias. O mesmo efeito mencionado também foi observado neste trabalho.

A principal característica da microfresa para a formação de rebarbas encontrada neste trabalho foi o raio da aresta de corte. O alto valor do raio de aresta promove um ângulo de saída efetivo muito negativo e aumenta o sulcamento. Estes efeitos aumentam a deformação plástica e o fluxo lateral de material, elevando a quantidade de cavaco não cortado. Por conta disso, há um rápido aumento na área da rebarba de topo (WU et al., 2021).

De acordo com Aslantas et al. (2016), o revestimento também tem influência sobre o volume de rebarbas formadas. Segundo os autores, quanto menor o coeficiente de atrito da cobertura da ferramenta, menor a formação de rebarbas durante o microfresamento. Grzesik e Rech (2019) ao fazerem uma análise do coeficiente de atrito para diferentes tipos de revestimento, inclusive os mesmos utilizados nas microfresas deste trabalho. Eles estudaram o coeficiente de atrito dos revestimentos ao usinar o aço em aço AISI 4140 e concluíram que o AlCrN é o material com menor coeficiente de atrito (0,35). Baseando-se nestas informações, além da geometria favorável, a ferramenta C, por ser revestida com AlCrN, possui também o revestimento com propriedades melhores se tratando da formação de rebarbas, o que contribuiu ainda mais para que esta microfresa apresentasse a menor quantidade de rebarbas de topo durante o microfresamento.

4.4.1. Análise dos Tipos de Rebarbas

Além da quantificação das rebarbas formadas no microfresamento do aço ferramenta ABNT H13, foi realizada também uma análise qualitativa do tipo de rebarba. As Fig. 4.16 e 4.17 contém as imagens dos canais usinados com foco nas rebarbas. As fotos foram separadas por fabricante das ferramentas e por cada microfresa utilizada 1 para o teste e 2 para a réplica.

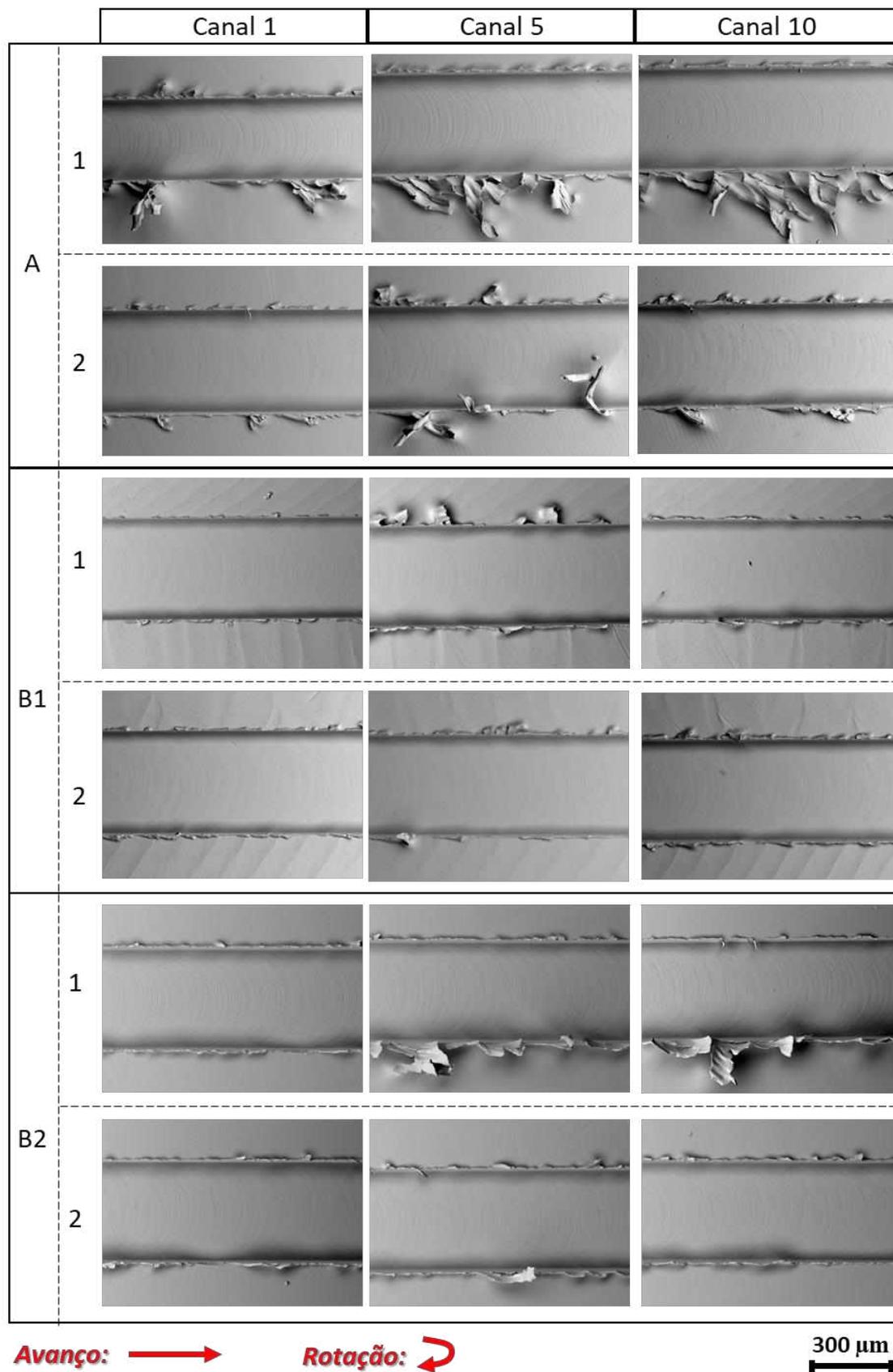


Figura 4.16 - Fotos das rebarbas formadas nos canais usinados com as ferramentas A, B1 e B2 (Aumento de 250x)

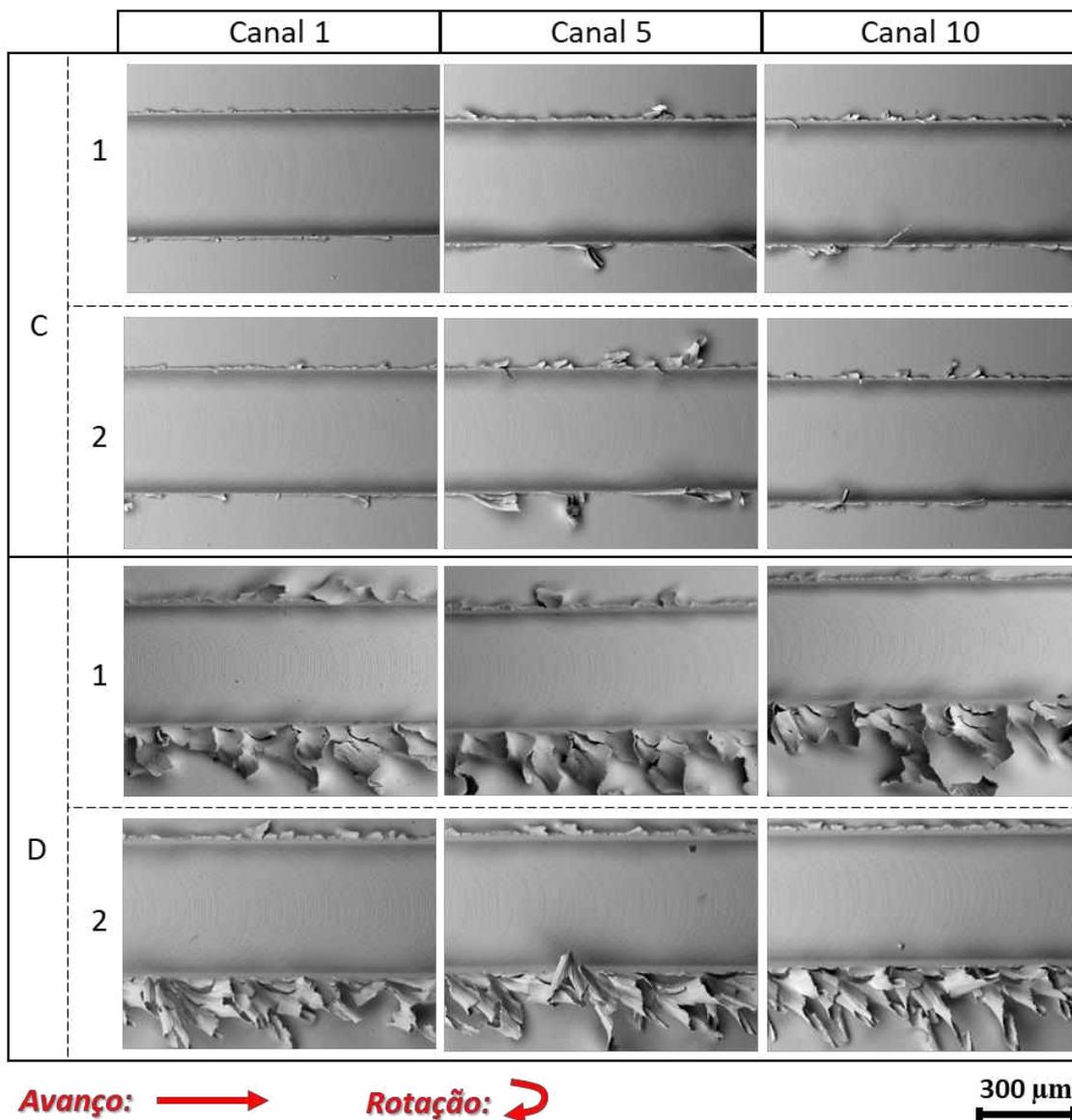


Figura 4.17 - Fotos das rebarbas formadas nos canais usinados com as ferramentas C e D (Aumento de 250x)

Seguindo a classificação proposta por (CHERN et al., 2007), as rebarbas formadas nos canais usinados pelas ferramentas B1, B2 e C são predominantemente do tipo rebarbas menores, com alguns pontos de ocorrência de rebarbas primárias, principalmente no fresamento concordante.

As ferramentas fornecidas pelo fabricante A, produziram rebarbas do tipo pena em grande parte do comprimento no fresamento concordante, com

pouquíssimos focos de rebarbas de agulha. No fresamento discordante, há predomínio das rebarbas menores e algumas ocorrências de rebarbas primárias.

Por fim, as microfresas D, que foram as responsáveis pela maior área de rebarba formada, a predominância no fresamento concordante foi por rebarbas do tipo pena. No discordante, houve um equilíbrio entre rebarbas menores e rebarbas primárias.

Analisando o comportamento de cada ferramenta na formação das rebarbas, é possível notar que ocorre uma transição do tipo de rebarba formada à medida que o raio de aresta aumenta. Para menores valores de raios de aresta, as rebarbas formadas tendem a ser dos tipos menores e primárias. Enquanto para os raios de aresta maiores, as rebarbas dominantes são as de agulha e de pena.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio dos ensaios de microfresamento no aço ferramenta ABNT H13 com diferentes ferramentas de metal duro revestidas e com diâmetro de 400 μm , foi possível concluir acerca do desgaste das microfresas que:

- Dada as condições de corte e o material da peça usinada, o desgaste apresentado pelas microfresas foi muito baixo, possibilitando que elas fossem usadas para usinar maiores comprimentos de corte.
- As variações na geometria da microfresa foram significativas para o desgaste da ferramenta;
- A característica geométrica de maior influência no desgaste são os ângulos de posição primário, de posição secundário e de ponta, pois foram os que apresentaram o índice de correlação mais forte;
- A diminuição do ângulo de posição primário reduz o desgaste, pois influencia na formação dos cavacos, aumentando sua largura e removendo mais calor;
- O aumento do ângulo de ponta eleva a resistência da microfresa e reduz o desgaste da ferramenta;
- Apesar das características geométricas serem os fatores mais influentes no desgaste, o revestimento possui uma parcela de contribuição no desgaste da ferramenta. Quanto mais duro o revestimento, menor o desgaste.
- A ferramenta do fabricante D apresentou o menor resultado de desgaste por ter a melhor combinação entre os valores do ângulo de posição primário, de posição secundário e de ponta.

Em relação à rugosidade da superfície usinada, conclui-se que:

- As alterações na geometria da ferramenta foram significativas na rugosidade do canal, porém o comprimento usinado não foi significativo;
- O raio de aresta foi o parâmetro geométrico que apresentou a correlação mais forte com a rugosidade. Devido ao aumento do raio, ocorre também o aumento do sulcamento, deformando plasticamente a superfície e elevando a rugosidade;
- O revestimento aumenta o raio da aresta de corte, podendo prejudicar a qualidade da superfície usinada;
- A qualidade do revestimento, como sua adesão à superfície da ferramenta e acabamento, influencia diretamente a rugosidade final do canal;
- A ferramenta do fabricante C foi a microfresa que apresentou o menor valor de rugosidade Ra. Isso se deve ao seu raio de aresta ser o menor dentre as ferramentas analisadas.

Sobre a qualidade das superfícies usinadas, é possível afirmar que:

- Menores valores de raio de aresta deixam menos marcas no fundo do canal devido à menor deformação plástica do material;

Sobre as rebarbas de topo formadas durante o microfresamento, é possível dizer que:

- Tanto as alterações na geometria das microfresas quanto o comprimento usinado foram significativos para a quantidade de rebarbas formadas;
- Maiores valores de raios de aresta e de ponta levaram a formação de uma maior área de rebarba adjacente ao canal. Esse efeito se deve ao aumento da deformação plástica do material com o aumento do raio;
- Ao aumentar o raio de aresta, ocorre uma transição do tipo de rebarba formada. Menores raios tendem a formar rebarbas primárias e menores, enquanto raios maiores favorecem a formação de rebarbas do tipo agulha e tipo pena;

- A menor quantidade de rebarbas se deu nos ensaios com as ferramentas do fabricante C. Assim como na rugosidade, os bons resultados se devem aos menores valores de raio de ponta e de aresta;

De maneira geral, a ferramenta C foi a que apresentou a melhor combinação de resultados (desgaste da ferramenta, rugosidade e formação de rebarbas). Isso se deve à combinação dos seus parâmetros geométricos e revestimento. Ela apresentou o segundo menor desgaste e os melhores resultados de rebarba e rugosidade. Por conta disso, dentre as microfresas avaliadas, ela é a mais indicada para o microfresamento do aço ferramenta H13.

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Expandir o número de ferramentas avaliadas, buscando mais fornecedores de microfresas;
- Investigar a resistência ao desgaste das ferramentas através de um ensaio do tipo pino-disco;
- Realizar uma investigação mais profunda da causa e efeito na vibração do microfresamento com cada uma das ferramentas utilizadas;
- Investigar individualmente o efeito do revestimento da ferramenta no microfresamento do aço H13. Para tal, seria necessário utilizar microfresas idênticas quanto à geometria, porém revestidas com diferentes materiais;
- Realizar simulações computacionais para aumentar a compreensão do efeito da geometria da ferramenta sobre a qualidade da superfície usinada (rugosidade e formação de rebarbas).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P.T.. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. **Precision Engineering**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 402-407, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.002>.

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

ASLANTAS, K.; H., H.e.; PERCIN, M.; UCUN, İ.; ÇICEK, A.. Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy. **Precision Engineering**, [S.L.], v. 45, p. 55-66, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.01.009>.

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

ASTAKHOV, V. P.; DAVIM, J. P.. Tools (Geometry and Material) and Tool Wear. **Machining**, [S.L.], p. 29-57, 2008. Springer London. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5_2.

BENESTY, J.; CHEN, J.; HUANG, Y.. On the Importance of the Pearson Correlation Coefficient in Noise Reduction. **Ieee Transactions On Audio, Speech, And Language Processing**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 757-765, maio 2008. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tasl.2008.919072>.

BIERMANN, D.; STEINER, M.. Analysis of Micro Burr Formation in Austenitic Stainless Steel X5CrNi18-10. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 3, p. 97-102, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.018>.

BIERMANN, D.; STEINER, M.; KREBS, E.. Investigation of Different Hard Coatings for Micromilling of Austenitic Stainless Steel. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 7, p. 246-251, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.042>.

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

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

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

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

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

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**, [S.L.], v. 31, n. 2, p. 122-129, abr. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2006.04.001>.

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

CIMM (Brasil). **Classificação das fresas varia com superfície**. 2011. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7903-classificacao-das-fresas-varia-com-superficie. Acesso em: 02 jun. 2021.

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

EZUGWU, E.O.; WANG, Z.M.; MACHADO, A.R.. The machinability of nickel-based alloys: a review. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 86, n. 1-3, p. 1-16, fev. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(98\)00314-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(98)00314-8).

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

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

GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H.. Roughness parameters. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 123, n. 1, p. 133-145, abr. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(02\)00060-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00060-2).

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

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

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

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

KOMATSU, T.; YOSHINO, T.; MATSUMURA, T.; TORIZUKA, S.. Effect of Crystal Grain Size in Stainless Steel on Cutting Process in Micromilling. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 1, p. 150-155, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.026>.

KRAFT. **Matriz em H13 para extrusão de alumínio**. 2015. Disponível em: <https://www.krafttornearia.com.br/produto/matriz-em-h13-para-extrusao-de-aluminio>. Acesso em: 31 maio 2021.

KUMAR, P.; KUMAR, M.; BAJPAI, V.; SINGH, N. K.. Recent advances in characterization, modeling and control of burr formation in micro-milling. **Manufacturing Letters**, [S.L.], v. 13, p. 1-5, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mfglet.2017.04.002>.

Lee, K. Dornfeld, D. A. An experimental study on burr formation in micro milling aluminum and copper. **Transactions of NAMRI/SME**, v. 30, p. 1-8, 2002

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**, [S.L.], v. 228, n. 11, p. 1359-1371, 31 out. 2014. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954405414522216>.

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**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 628-640, abr. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tase.2017.2667709>.

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; DA SILVA, M.B., **Teoria da Usinagem dos Materiais**, Editora Edgard Blucher, São Paulo – SP, 1ª Edição, março de 2009.

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

MEDEOSSI, F.; SORGATO, M.; BRUSCHI, S.; SAVIO, E.. Novel method for burrs quantitative evaluation in micro-milling. **Precision Engineering**, [S.L.], v. 54, p. 379-387, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.07.007>.

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**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 70, 12 ago. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/jmmp3030070>.

MINITECH MACHINERY (Eua). **The GX Granite Base Super Precision**. 2022. Disponível em: <https://minitechcncmachines.com/the-gx-granite-base-super-precision/>. Acesso em: 30 maio 2022.

MUHAMMAD, A.; GUPTA, M. Ku.; MIKOŁAJCZYK, T.; PIMENOV, D. Y.; GIASIN, K.. Effect of Tool Coating and Cutting Parameters on Surface Roughness and Burr Formation during Micromilling of Inconel 718. **Metals**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 167, 18 jan. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/met11010167>.

O'TOOLE, L.; KANG, C. W.; FANG, F. Z.. Precision micro-milling process: state of the art. **Advances In Manufacturing**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 173-205, 27 out. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-020-00323-0>.

OLIAEI, S.N.B.; KARPAT, Y.; DAVIM, J. Paulo; PERVEEN, A.. Micro tool design and fabrication: a review. **Journal Of Manufacturing Processes**, [S.L.], v. 36, p. 496-519, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.10.038>.

OLIVEIRA, F. B.; RODRIGUES, A. R.; COELHO, R. T.; SOUZA, A. F.. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [S.L.], v. 89, p. 39-54, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001>.

REWIID. **Fresas em Metal Duro**. 2021. Disponível em: <https://rewiid.com.br/produtos/fresamento/fresas-em-metal-duro/>. Acesso em: 20 abr. 2022.

ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R.. **Tool steels**. 5. Ed. AMS International, 1998.

SAHAI, K.; NARAYAN, A.; YADAVA, V.. Micro-milling Processes: a review. **Lecture Notes In Mechanical Engineering**, [S.L.], p. 403-411, 2021. Springer Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-8542-5_35.

SAHOO, P.; PATRA, K.; SZALAY, T.; DYAKONOV, A. A.. Determination of minimum uncut chip thickness and size effects in micro-milling of P-20 die steel using surface quality and process signal parameters. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 106, n. 11-12, p. 4675-4691, 24 jan. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-04926-6>.

SERIACOPI, V.. **Simulação numérica do campo de tensões na microestrutura do aço ferramenta AISI H13 durante o forjamento a quente**. 2013. 152 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

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

SILVEIRA, M. L.. **AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO ABNT H13 SUBMETIDO À OPERAÇÃO DE FRESAMENTO FRONTAL**. 2021. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

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

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

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

WEGENER, K.. Ploughing (in Grinding). **Cirp Encyclopedia Of Production Engineering**, [S.L.], p. 950-956, 2014. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_16686.

WU, Xi.; DU, M.; SHEN, J.; JIANG, F.; LI, Y.; LIU, L.. Experimental research on the top burr formation in micro milling. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 117, n. 11-12, p. 3477-3486, 30 ago. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-021-07916-4>.

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

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

ZYGO. **Zegage Pro: Production Surface Profile**. 4p, 2018.