



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA QUALIDADE SUPERFICIAL DURANTE O
MICROFRESAMENTO DO AÇO AISI D2 NO ESTADO
TEMPERADO E REVENIDO

ANDERSON JÚNIOR DOS SANTOS

Belo Horizonte, 16 de Fevereiro de 2018

ANDERSON JÚNIOR DOS SANTOS

**ESTUDO DA QUALIDADE SUPERFICIAL DURANTE O
MICROFRESAMENTO DO AÇO AISI D2 NO ESTADO TEMPERADO E
REVENIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2018

S237e

Santos, Anderson Júnior dos.

Estudo da qualidade superficial durante o microfresamento do aço AISI D2 no estado temperado e revenido [manuscrito] / Anderson Júnior dos Santos. – 2018.

117 f., enc.: il.

Orientador: Marcelo Araújo Câmara.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 115-117.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Processos de fabricação - Teses. 3. Aspereza de superfície - Teses. 4. Desgaste mecânico - Teses. 5. Usinagem - Teses. I. Câmara, Marcelo Araújo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG

Tel.: +55 31 3409.5145

E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"ESTUDO DA QUALIDADE SUPERFICIAL DURANTE O
MICROFRESAMENTO DO AÇO AISI D2 NO ESTADO TEMPERADO
E REVENIDO"**

ANDERSON JÚNIOR DOS SANTOS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Engenharia de Manufatura e Materiais".

Dissertação aprovada no dia 16 de fevereiro de 2018.

Por:

Prof. Marcelo Araújo Câmara
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Alexandre Mendes Abrão
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Juan Carlos Campos Rúbio
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara pelo acompanhamento e colaboração em cada etapa do trabalho.

Aos professores Dr. Alexandre Mendes Abrão e Dr. Juan Carlos Campos Rúbio, pelo auxílio nesta pesquisa e enriquecimento desta dissertação.

A Pontifícia Universidade Católica De Minas Gerais pela disponibilidade dos laboratórios. A Oerlikon Balzers Do Brasil pelo recobrimento dos pinos para o ensaio pino sobre disco.

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal De Minas Gerais. A Professora Dra. Geralda Cristina Durães De Godoy pela utilização do Laboratório de Tribologia e Corrosão de Materiais.

Aos colegas do Laboratório de usinagem pelo companheirismo e ajuda ao longo deste trabalho.

Ao CNPq, Fapemig e Capes que financiaram esta pesquisa.

Meus sinceros agradecimentos.

E não há melhor resposta
que o espetáculo da vida:
vê - la desfiar seu fio,
que também se chama vida,
ver a fábrica que ela mesma,
teimosamente, se fabrica,
vê - la brotar como há pouco
em nova vida explodida

João Cabral de Melo Neto,
Morte e vida severina

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS DE COMPOSTOS QUÍMICOS

NOMENCLATURA

RESUMO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 19 |
| 2.OBJETIVOS..... | 21 |
| 2.1. Objetivo Geral | 21 |
| 2.2. Objetivos específicos | 21 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 22 |
| 3.1. Microfresamento | 22 |
| 3.2. Efeito escala | 25 |
| 3.3. Emissão acústica..... | 32 |
| 3.3.1 Monitoramento da ferramenta de corte..... | 32 |
| 3.4. Forças durante a microusinagem..... | 36 |
| 3.5. Acabamento no microfresamento | 41 |
| 3.5.1 Rugosidade..... | 41 |
| 3.5.2. Formação de rebarbas | 43 |
| 3.6 Considerações Parciais | 47 |
| 4. METODOLOGIA | 48 |
| 4.1. Materiais | 49 |
| 4.2. Equipamentos..... | 50 |
| 4.3. Métodos | 53 |
| 4.3.1 Projeto e preparação das amostras..... | 53 |
| 4.3.2 Tratamento térmico | 55 |
| 4.3.2 Acabamento superficial | 56 |
| 4.4. Ensaio pino sobre disco..... | 57 |
| 4.5. Microfresamento | 58 |
| 4.5.1 Desgaste da ferramenta | 60 |
| 4.6. Perfilômetro..... | 61 |
| 4.7 Aquisição de dados..... | 64 |

| | |
|---|------------|
| 4.7.1 Força..... | 64 |
| 4.7.2 Emissão acústica..... | 65 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 66 |
| 5.1. Caracterização do aço AISI D2 temperado e revenido..... | 66 |
| 5.2. Ensaio de pino sobre disco..... | 67 |
| 5.1.1 Análise do desgaste dos pinos após ensaio tribológico | 69 |
| 5.1.2 Emissão acústica..... | 74 |
| 5.2 Ensaio de microfresamento..... | 75 |
| 5.2.1 Forças de microfresamento | 75 |
| 5.2.2 Emissão acústica..... | 79 |
| 5.2.3 Rugosidade..... | 82 |
| 5.2.4 Formação de rebarba..... | 87 |
| 5.3. Desgaste da ferramenta | 96 |
| 6 CONCLUSÕES | 103 |
| 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 105 |
| 8. ABSTRACT | 106 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 107 |
| ANEXOS | 115 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 3.1 - Desgaste de flanco localizado da microfresa revestida com TiNAl..... | 24 |
| FIGURA 3.2 - Desenho esquemático.(a) Usinagem convencional macro escala; (b) microusinagem | 25 |
| FIGURA 3.3 - Influência da relação do raio de aresta da ferramenta com a espessura do cavaco não deformado na força específica de corte. | 26 |
| FIGURA 3.4 -.Desenho esquemático do efeito da mínima espessura do cavaco; (a) $h > h_m$; (b) $h < h_m$; (c) $h \approx h_m$ | 27 |
| FIGURA 3.5 -. Modelo para determinar a mínima espessura do cavaco..... | 29 |
| FIGURA 3.6 -. Corte no sentido discordante e concordante durante o microfresamento..... | 29 |
| FIGURA 3.7 - Variação da força de corte em relação ao raio da aresta da ferramenta para diferentes tamanhos de grão do material. | 31 |
| FIGURA 3.8 - Microfresamento e ampliação da região de formação do cavaco | 33 |
| FIGURA 3.9 -.Representação esquemática dos sinais de emissão acústica..... | 34 |
| FIGURA 3.10 - Análise numérica por meio de elementos finitos; (a)- vista 3D da perspectiva e das condições de contorno. (b) - Vista superior da perspectiva..... | 38 |
| FIGURA 3.11 -.Imagem generalizada da ponta de corte e da superfície de folga da microfresa com as resultantes das forças..... | 40 |
| FIGURA 3.12 -. Topografia da superfície dos canais microfresados. (a) canal de número 3 (b) canal de número 45 (c) canal de número 90. | 43 |
| FIGURA 3.13 -. (a) Perfilometria do microcanal com rebarbas; (b) Microscopia eletrônica de varredura do mesmo microcanal com rebarbas. | 44 |
| FIGURA 3.14 - Imagens das rebarbas com ampliação de 100x. (a) rebarba primária; (b) rebarba em forma de agulha; (c) rebarba pena; (d) rebarba menor. | 46 |
| FIGURA 3.15 - Processo de formação da rebarba primária; (a) o material é fraturado ao meio; (b) rebarba primária é formada; (c) a rebarba é formada com a largura aproximada da metade da ferramenta; (d) fratura da rebarba primária. | 47 |
| FIGURA 4.1 - Fluxograma elaborado para o procedimento experimental. | 48 |
| FIGURA 4.2 - Pino de metal duro revestido com TiNAl..... | 50 |
| FIGURA 4.3 - (a) Imagem representativa da microfresa MS2MSD0050; (b) desenho técnico com as dimensões da microfresa MS2MSD0050..... | 50 |
| FIGURA 4.4 - Fornos utilizados para realizar o tratamento térmico no aço AISI D2..... | 51 |
| FIGURA 4.5 - Turbina pneumática Air Turbine modelo 650bt40..... | 52 |
| FIGURA 4.6 -. (a) Dispositivo para o ensaio pino sobre disco, (b) montagem do dispositivo com o pino de metal duro revestido com TiNAl e sensor de emissão acústica..... | 54 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 4.7 - (a) Desenho 3D do dispositivo projetado para o microfresamento, (b) montagem 3D com o dinamômetro, emissão acústica, dispositivo e corpo de prova. | 54 |
| FIGURA 4.8 - Curva de revenimento do aço AISI D2. | 56 |
| FIGURA 4.9 - Faceamento da superfície do corpo de prova para o ensaio de microfresamento. | 58 |
| Figura 4.10 - Sentido de avanço durante o microfresamento. | 60 |
| FIGURA 4.11 - Perfilometria dos canais microusinados. | 61 |
| FIGURA 4.12 -. Topografia do corpo de prova após os ensaios de microfresamento. | 62 |
| FIGURA 4.13 - (a)- Linha traçada para medir a altura de rebarba. (b) Histograma para contagem de picos. | 62 |
| FIGURA 4.14 - Medida da altura de rebarba. | 63 |
| FIGURA 4.15 - Curva Abbott Firestone. | 63 |
| FIGURA 4.16 - Área do corpo de prova selecionada para o cálculo do volume de rebarba. .. | 64 |
| FIGURA 4.17 - Aquisição de dados dos sinais de força e emissão acústica. | 65 |
| FIGURA 5.1 - Microestrutura do aço ferramenta AISI D2 temperado e revenido com dureza de 620 HV (57 ± 1 HRC). | 66 |
| FIGURA 5.2 - Ensaio de tração. | 67 |
| FIGURA 5.3 - Coeficiente de atrito versus distância de deslizamento para a carga de 4 N e velocidade de deslizamento de 62,80 m/min. | 67 |
| FIGURA 5.4 - Imagens referentes a análise por meio do MEV/EDS. (a) imagem do topo esférico do pino referente ao primeiro ensaio. (b) gráfico referente a análise por EDS. | 69 |
| FIGURA 5.5 - Imagens referentes a análise por meio do MEV/EDS. (a) imagem do topo esférico do pino referente ao segundo ensaio. (b) gráfico referente a análise por EDS. | 69 |
| FIGURA 5.6 - Perfilometria dos pinos de metal duro revestidos com TiNAl. (a) primeiro ensaio. (b) segundo ensaio. | 70 |
| FIGURA 5.7 - Perfil 2d do topo esféricos dos pinos revestido com TiNAl. (a) pino referente ao primeiro ensaio com profundidade de desgaste de 5.41 μm . (b) pino referente ao segundo ensaio com profundidade de desgaste de 9.29 μm | 71 |
| FIGURA 5.8 - Mapeamento químico por meio de EDS dos debrís formados durante os ensaios de deslizamento. (a) mapeamento químico dos debrís formados durante o primeiro ensaio. (b) mapeamento químico dos debrís formados durante o segundo ensaio. | 72 |
| FIGURA 5.9 - Análise da trilha de desgaste resultante do primeiro ensaio de deslizamento. (a) imagem do meV. (b) EDS. | 73 |
| FIGURA 5.11 - Densidade espectral dos sinais de emissão acústica para os ensaios de deslizamento: (a) ensaio 1 e (b) ensaio 2. | 75 |
| FIGURA 5.12 - Forças de microfresamento em função do comprimento usinado. (a) força de avanço, (b) força de apoio e (c) força passiva. | 76 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 5.13 - Média das forças estáticas da microfresa na condição de início de vida referente ao canal 2..... | 77 |
| FIGURA 5.14 - Média das forças estáticas da microfresa na condição desgastada referente ao canal 42..... | 78 |
| FIGURA 5.15 - Sinais de emissão acústica. (a) microfresa início de vida. (b) microfresa condição desgastada. | 79 |
| FIGURA 5.16 -. Sinais de emissão acústica. (a) microfresa início de vida e (b) microfresa condição desgastada. | 80 |
| FIGURA 5.17 - Ensaio 3 sinais de emissão acústica. (a) microfresa início de vida. (b) microfresa condição desgastada. | 81 |
| FIGURA 5.18 - Sinais de emissão acústica. (a) microfresa início de vida. (b) microfresa condição desgastada. | 81 |
| FIGURA 5.19 - Valores de rugosidade R_a , R_t , R_z e R_q obtidos para os ensaios 1, 2, 3 e 4. | 82 |
| FIGURA 5.20 - Perfis de rugosidade e de ondulação canal 2 para os ensaios 1, 2, 3 e 4..... | 83 |
| FIGURA 5.21 - Gráfico de ondulação média e máxima para a ferramenta no início de vida canal 2..... | 84 |
| FIGURA 5.22 - Perfis de rugosidade e de ondulação canal 42 para os ensaios 1, 2, 3 e 4..... | 85 |
| FIGURA 5.23 - Gráfico de ondulação média e máxima para a ferramenta na condição desgastada canal 42. | 86 |
| FIGURA 5.24 - Imagem do MEV da região de sulcamento do canal 2 referente ao ensaio 3. | 86 |
| FIGURA 5.25 - Modelo proposto por Stachowiak e Batchelor para o efeito de sulcamento do material. | 87 |
| FIGURA 5.26 - Rebarbas encontradas na entrada, topo e saída do canal 42 para os ensaios 1, 2, 3 e 4. | 88 |
| FIGURA 5.27 - Altura de rebarba para os ensaios 1, 2, 3, 4..... | 89 |
| FIGURA 5.28 - Desgaste de flanco e redução do diâmetro após o microfresamento dos 43 canais. | 90 |
| FIGURA 5.29 - Desgaste das microfresas após o microfresamento dos 43 canais..... | 91 |
| FIGURA 5.30 - EDS da ferramenta do ensaio 2. (a) imagem do MEV com a delimitação da região de desgaste. (b) análise semi quantitativa dos elementos químico do espectro 4 | 92 |
| FIGURA 5.31 -. Altura da rebarba no sentido concordante e discordante. (a) ensaio 1. (b) ensaio 2. (c) ensaio 3. (d) ensaio 4..... | 93 |
| FIGURA 5.32 - Histograma da altura de rebarba (a) ensaio 1. (b) ensaio 2. (c) ensaio 3. (d) ensaio 4. | 94 |
| FIGURA 5.33 - Largura de rebarba em função do sentido de corte para os ensaio 1, 2 , 3 e 4. | 95 |
| FIGURA 5.34 - Volume de rebarba para os ensaios 1, 2, 3 e 4. | 96 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 5.35 - Forças de usinagem em função do comprimento usinado para o ensaio de desgaste de ferramenta. (a) força de avanço, (b) força de apoio e (c) força passiva. | 97 |
| FIGURA 5.36 - Densidade espectral dos sinais de emissão acústica para os estágios 1, 2 e 3 do ensaio de desgaste. (a) estágio 1. (b) estágio 2. (c) estágio 3. | 99 |
| FIGURA 5.37 - Perfis de rugosidade e ondulação dos estágios 1, 2 e 3 da curva de desgaste da ferramenta. | 100 |
| FIGURA 5.38 - Gráfico de ondulação média e máxima para os estágios 1, 2 e 3 do ensaio de desgaste. | 100 |
| FIGURA 5.39 - Imagens da perfilometria e do MEV da região de fratura da microfresa. (a) perfilometria. (b) MEV. | 101 |
| FIGURA 5.40 - Histograma da contagem de picos. (a) estágio 1. (b) estágio 2. (c) estágio 3. | 102 |
| FIGURA A – Desenho técnico do corpo de prova. | 115 |
| FIGURA B – Imagens do MEV dos cavacos. (a) Cavacos do Ensaio 1. (b) Cavacos do Ensaio 2. (c) Cavacos do Ensaio 3. (d) Cavacos do Ensaio 4. | 116 |
| FIGURA C – Imagens do MEV das microfresas.do (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3. (d) Ensaio 4. | 117 |
| FONTE: autor, 2017. | 117 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1 - Composição química do aço AISI D2..... | 49 |
| Tabela 4.2 -.Dimensões dos corpos de prova. | 49 |
| Tabela 4.3 - Parâmetros de entrada utilizados durante os teste microfresamento de topo do aço AISI D2. | 59 |
| Tabela 4.4 - Parâmetros ensaio de desgaste da ferramenta. | 60 |
| Tabela 5.1- Taxa de desgaste para o corpo de prova e pino..... | 68 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AISI | Instituto Americano do Ferro e do Aço (<i>American Institute for iron and Steel</i>) |
| ASTM | Sociedade Americana para Testes e Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>) |
| CAD | Desenho assistido por computador (<i>Computer aided design</i>) |
| CAM | Manufatura Assistida pelo Computador (<i>computer aided manufacture</i>) |
| DIN | Instituto Alemão de Normalização (<i>Deutsches Institut für Normung</i>) |
| DLC | Carbono tipo diamante (<i>Diamond Like Carbon</i>) |
| ECAP | Prensagem em Canais Equiangulares (<i>Equal Channel Angular Pressing</i>) |
| EDM | Usinagem por Descargas Elétricas (<i>Electrical Discharge Machining</i>) |
| EDS | Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X (<i>Energy dispersive X-ray spectroscopy</i>) |
| FIB | Feixe de Íon Focalizado (<i>Focused Ion Beam</i>) |
| HRC | Dureza Rockwell – escala C |
| HV | Dureza Vickers |
| ISO | Organização Internacional de Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>) |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura (<i>Scanning Electron Microscopy</i>) |
| NBR | Norma Brasileira |
| OFC | Cobre desoxigenado (<i>oxygen free copper</i>) |
| PCD | Diamante Policristalino (<i>Polycrystalline Diamond</i>) |
| PSD | Densidade espectral de energia (<i>Power Spectrum Density</i>) |
| PUC-MG | Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais |

| | |
|------|---|
| PVD | Deposição Física de Vapor (<i>physical vapour deposition</i>) |
| RMS | Raiz do valor quadrático médio (<i>root mean square</i>) |
| UFMG | Universidade Federal de Minas Gerais |

LISTA DE SÍMBOLO DE COMPOSTOS QUÍMICOS

| | |
|-----------|--|
| AlCrN | Nitreto de cromo alumínio |
| CrN | Nitreto de cromo |
| CrTiAlN | Nitreto de cromo alumínio titânio |
| Ti-6AL-4V | Liga de titânio hexa alumina tetra vanádio |
| TiCN | Carbonitreto de titânio |
| TiN | Nitreto de titânio |
| TiAl | Nitreto de alumínio titânio |
| WC | Carboneto de tungstênio |

NOMENCLATURA

Letras latinas

| | | |
|----------|-------------------------------------|--------------------------------|
| a_p | profundidade de usinagem | [μm] |
| h | Espessura do cavaco não deformado | [μm] |
| h_m | Mínima espessura do cavaco | [μm] |
| n | Número de arestas | adimensional |
| F | Força tangencial | [N] |
| F_c | força de corte | [N] |
| F_f | Força de avanço | [N] |
| F_y | Força na direção de avanço | [N] |
| F_x | Força de apoio | [N] |
| F_p | Força passiva | [N] |
| f_z | avanço por dente | [$\mu\text{m}/\text{dente}$] |
| R_a | Desvio médio aritmético | [μm] |
| r_e | raio de aresta | [μm] |
| R_q | Rugosidade quadrática média | [μm] |
| R_t | Rugosidade total | [μm] |
| R_z | Altura máxima do perfil | [μm] |
| v_c | Velocidade de corte | [m/min] |
| W_a | valor médio aritmético de ondulação | [μm] |
| W_t | valor máximo de ondulação | [μm] |
| S_{pk} | Altura reduzida dos picos | [μm] |

Letras gregas

| | | |
|------------|------------------------------------|--------------|
| θ | ângulo do ponto de estagnação | [graus] |
| β | ângulo de atrito | [graus] |
| γ_o | ângulo de saída no plano ortogonal | [graus] |
| μ | coeficiente de atrito | adimensional |

RESUMO

A indústria de bens de consumo é responsável pela maioria dos postos de trabalho no mundo globalizado. Neste cenário, há uma forte demanda para miniaturização de componentes e desta maneira, o microfresamento surge como alternativa para fabricar micromatrizes para a produção de microcomponentes utilizados na indústria aeronáutica, automobilística, eletrônica e médica. A relevância do estudo do microfresamento do aço AISI D2 no estado temperado e revenido é em virtude de problemas encontrados na qualidade superficial das micromatrizes devido ondulações e rebarbas nas superfícies microusinadas, que exigem um trabalho suplementar de acabamento superficial que, na maioria das vezes, não é possível ser realizado em microcomponentes em razão dos elevados custos e restrição de precisão do produto final. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da variação do avanço e profundidade de usinagem sobre a rugosidade, formação de rebarba e sobre o desgaste da ferramenta na operação de microfresamento a seco de canais em aço AISI D2 no estado endurecido. Para tanto, foi realizado o monitoramento dos sinais das forças de usinagem, emissão acústica e a caracterização da superfície por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), energia dispersiva (EDS) e por perfilometria por contato. Os resultados mostraram que, para todos os ensaios realizados, o desgaste da microfresa tem significativa influência na rugosidade e na formação de rebarba devido ao fenômeno de sulcamento do material e pela deflexão da ferramenta que ocasionaram vibrações mecânicas prejudiciais a qualidade superficial. Os parâmetros de entrada (avanço e profundidade de usinagem) foram significativos para a remoção do cavaco por cisalhamento, sendo, o avanço por dente o parâmetro mais significativo para o efeito de sulcamento do material.

Palavras chaves: Microfresamento; AISI D2; Desgaste; Rugosidade; Rebarba.

1. INTRODUÇÃO

Processos de usinagem estão presentes em várias etapas de fabricação de um produto, desde o torneamento do eixo de uma determinada máquina, passando pelo fresamento de uma matriz para estampo. Assim, nota-se a aplicação dos processos de usinagem nas mais diversas indústrias (aeronáutica, automobilística, eletrônica, médica, etc.) e durante a última década, foi observado uma tendência contínua de produtos compactos, integrados e menores como eletrônicos de consumo, trocadores de calor, sensores e atuadores (KOÇ et al., 2011). Dessa forma, a justificativa para miniaturização de componentes deve-se à necessidade de atender à crescente demanda impulsionada pelo desenvolvimento tecnológico dos setores industriais.

Muitos destes microcomponentes são produzidos direta ou indiretamente pelo processo de fabricação por microusinagem, que é uma versão reduzida da macrousinagem com algumas peculiaridades e conforme ressalta (CÂMARA et al., 2012), em geral a microusinagem pode ser definida com base nas dimensões da ferramenta de corte, as quais estão na faixa de 1 a 1000 μm . Contudo, o aspecto mais importante que caracteriza este tipo de operação consiste no fato da espessura de corte e do tamanho de grão do material serem da ordem de grandeza do raio de aresta da ferramenta de corte.

Desta maneira, para produzir microcomponentes por microconformação à frio é necessário a confecção das micromatrizes que são fabricadas geralmente pela operação de microfresamento utilizando como matéria-prima o aço AISI D2, que é um aço ferramenta pertencente ao grupo D para trabalho a frio com alto teor de carbono e cromo. Nesse sentido, ainda não existem muitos estudos da operação de microfresamento de aços ferramentas devido a problemas como quebra prematura da ferramenta, desgaste severo e baixa rigidez, ocasionando baixa rentabilidade da operação. Desta forma, o microfresamento de aços ferramentas está obtendo mais atenção; isto é, devido à possibilidade do microfresamento em substituir a microusinagem por descarga elétrica (EDM), conforme (LI et al., 2011). Além disso, a operação de microfresamento apresenta peculiaridades que podem afetar a qualidade dos microcomponentes, como por exemplo, o efeito escala que é um fenômeno capaz de descrever o comportamento de um material durante a fabricação em escala reduzida. Dessa

forma, o efeito escala influencia os mecanismos de corte alterando as forças, o processo de formação do cavaco, rugosidade, formação de rebarba e a energia consumida para remover o cavaco por cisalhamento.

Na operação de microfresamento frontal ocorrem simultaneamente o fresamento discordante e concordante. Quando o fresamento frontal inicia-se no sentido discordante de corte têm-se, espessura mínima do cavaco no início do corte e espessura máxima do cavaco no final do corte. A partir deste ponto, o sentido de corte muda passando a ser concordante, onde a espessura do cavaco é máxima no início do corte e mínima no final do corte. Portanto, teoricamente a espessura do cavaco durante o início e no final do corte é zero, desta maneira o material é deformação plasticamente nas laterais do canal ao invés de ser removido por cisalhamento evidenciando o efeito escala. Assim, o raio de aresta da ferramenta torna-se relevante em relação à espessura de corte da camada de material a ser removida, pois quando o raio de aresta é maior que a espessura de corte, não há remoção do cavaco por cisalhamento e sim a deformação plástica do material, devido ao ângulo de saída efetivo ser mais negativo fazendo com que a recuperação elástica do material seja mais intensa. Dessa forma, há o aumento das forças de usinagem que afetam a rugosidade em virtude do aumento das vibrações mecânicas e pelo maior fluxo lateral de material na parede do canal que formam maior quantidade de rebarbas. Por este motivo, investigar as interações dos parâmetros de entrada durante o microfresamento para minimizar os erros geométricos, os maiores valores de rugosidade e a maior quantidade de rebarbas dos microcomponentes é justificável, pois quando estabelecido os parâmetros de entradas que menos afetam a qualidade superficial pode-se reduzir os custos com microferramentas, rebarbação e aumentar a produtividade.

A formação de rebarbas no microfresamento é inevitável e sua remoção nem sempre pode ser realizada devido aos requisitos de precisão da peça. Já que a rebarbação pode gerar tensões residuais e alterações de propriedades que afetam a funcionalidade de alguns microcomponentes (CHENG et al., 2013). Em virtude dos aspectos relacionados com qualidade superficial dos microcomponentes, este trabalho teve como objetivo principal analisar a qualidade superficial durante o microfresamento do aço AISI D2, juntamente com a análise das forças de usinagem e emissão acústica durante essa operação de corte.

2.OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi analisar os efeitos da variação do avanço por dente e profundidade de usinagem sobre a rugosidade e a formação de rebarba, na operação de microfresamento a seco de canais em aço AISI D2 no estado temperado e revenido com dureza de 620 HV (57 ± 1 HRC), por meio de microfresas de topo retas com diâmetro de 500 μ m revestidas com TiNAl.

2.2. Objetivos específicos

- Correlacionar o coeficiente de atrito obtido pelo ensaio de desgaste pino sobre disco entre o par tribológico metal duro revestido com TiNAl e aço AISI D2 temperado e revenido com a razão entre o avanço por dente e o raio de aresta da ferramenta para trabalhar no modo de cisalhamento do material.

- Avaliar influência do avanço por dente e profundidade de usinagem na rugosidade e na formação de rebarba durante o microfresamento do aço AISI D2 no estado temperado e revenido, por meio de perfilometria por contato e microscopia eletrônica de varredura.

- Avaliar o desgaste da microfresa revestida com TiNAl com diâmetro 500 μ m por meio do monitoramento dos sinais de emissão acústica, força e microscopia eletrônica de varredura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são descritos os aspectos mais relevantes que envolvem a operação de microfresamento. Primeiramente, apresentam-se breves considerações sobre a operação de microfresamento com suas respectivas características. Na sequência, é apresentada uma revisão sobre efeito escala, emissão acústica e forças durante a microusinagem. Por fim, são retratados os principais parâmetros que afetam a qualidade superficial e a formação de rebarbas durante o microfresamento.

3.1. Microfresamento

Para a fabricação de componentes na escala micrométrica foi necessário o avanço tecnológico das operações de usinagem já existentes e o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de produzir microcomponentes. Sendo assim, os microcomponentes podem ser fabricados pelos métodos não convencionais e convencionais de microusinagem (KOÇ et al., 2011). Os principais métodos não convencionais são: a microusinagem a laser, microeletroerosão, feixe de íons focalizados (FIB), microretífica e por litografia profunda de Raios-x, no quais não existe uma ferramenta afiada. Já para os métodos convencionais, pode-se citar as operações de microfuração, microtorneamento e microfresamento, que têm como principal característica a presença de uma ferramenta afiada.

Segundo (KOÇ et al., 2011) a principal vantagem da microusinagem comparada com outros processos usados para fabricar partes miniaturizadas é a flexibilidade do processo. Nesse sentido, o microfresamento é uma relevante operação de usinagem, capaz de produzir com flexibilidade e precisão microcomponentes com formas tridimensionais. Contudo, o sucesso da aplicação da operação de microfresamento depende de alguns fatores como: a precisão da máquina ferramenta utilizada e da condição da ferramenta nova e desgastada (PRAKASH et al., 2013).

Não existe um consenso na literatura sobre a definição da operação de microfresamento entretanto, no geral é definida baseada nas dimensões da ferramenta de corte, que encontra-se na faixa entre 1 e 1000 μm . Além disso, o microfresamento apresenta algumas

diferenças quando comparado com o fresamento convencional que estão relacionadas ao efeito escala, microgeometria da aresta de corte e aquelas relacionadas à formação do cavaco.

Para as microferramentas, o material e a geometria são importantes fatores nas operações de microusinagem (CHAE et al., 2006). Para a microusinagem de aço são utilizadas ferramentas de corte de metal duro, cuja aplicação está relacionada a sua dureza ao longo de uma ampla gama de temperaturas (CARDOSO et al., 2012) e WANG et al., 2009). Dessa forma, para aumentar a vida útil da ferramenta de corte tem-se realizado pesquisas para o desenvolvimento de revestimentos que possam exercer a função de lubrificante e serem capazes de diminuir o desgaste durante o processo de corte, propiciando benefícios como a redução dos custos de produção, melhor acabamento superficial e a redução do uso de fluídos de corte que são prejudiciais, ao meio ambiente e ao operador da máquina. Segundo (UCUN et al., 2013), o revestimento na superfície da microfresa ajuda a solucionar ocorrentes problemas encontrados a respeito do desgaste da ferramenta. Os mesmos autores estudaram a influência dos revestimentos de TiAlN + AlCrN, DLC, TiAlN, TiAlN+ WC/C, AlCrN na usinagem da superliga de Inconel 718 sem fluido de corte, utilizando microfresas de diâmetro de 768 μm de metal duro de grão ultrafino. Os resultados apontaram que as ferramentas revestidas apresentaram baixos níveis de desgaste e menor variação dimensional em relação ao seu diâmetro após o microfresamento em comparação às ferramentas sem revestimento. Tal fato foi atribuído aos altos valores de dureza do revestimento e o baixo coeficiente de atrito entre as ferramentas revestidas e a liga de Inconel 718.

ARAMCHAROEN et al. (2008) realizaram experimentos de microfresamento a seco do aço AISI H13 com dureza de 45 HRC com ferramentas revestidas com filmes finos de TiN, CrN, TiCN, TiAlN e CrTiAlN depositados pela técnica PVD (deposição física de vapor). Os autores concluíram que sob as mesmas condições de avanço por dente e profundidade de usinagem os revestimentos influenciaram a redução do desgaste da aresta de corte em comparação com uma microfresa de topo de metal duro com grão ultrafino sem revestimento. A microfresa revestida com TiN apresentou melhor comportamento em termos de desgaste de flanco, acabamento superficial, altura de rebarba e desgaste do raio de aresta, em virtude do revestimento de TiN apresentar melhor adesão ao substrato, bom acabamento superficial associado à maior tenacidade e baixo coeficiente de atrito contra o material usinado. O revestimento de TiAlN apresentou maior desgaste de flanco, como mostrado na Figura 3.1, e maior altura de rebarbas devido à baixa adesão ao substrato.

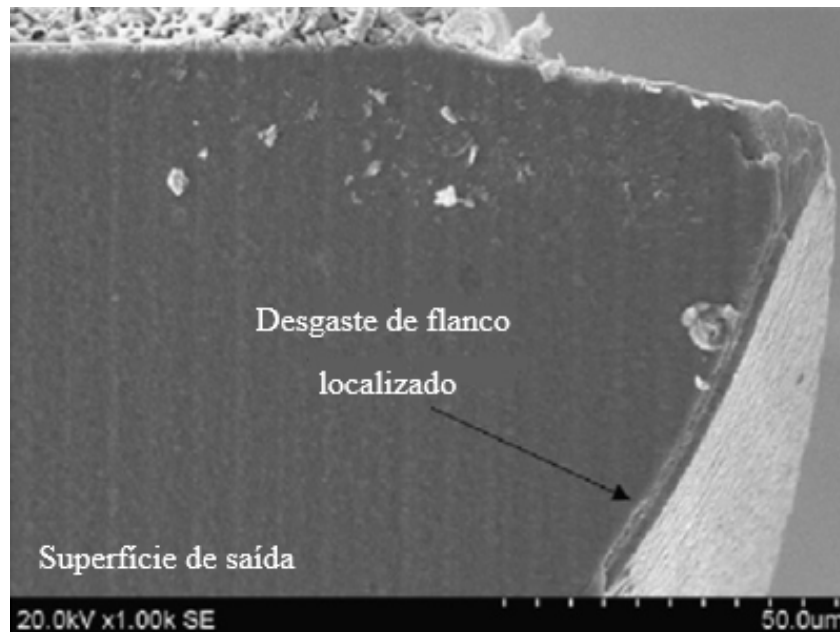


FIGURA 3.1 - Desgaste de flanco localizado da microfresa revestida com TiAlN.

FONTE: Adaptado de Aramcharoen *et. al.*, (2008).

Recentemente SREDANOVIC *et al.* (2016) estudaram a usinabilidade do aço AISI D2 com dureza de 62 HRC por meio do microfresamento de canais utilizando microfresas com diâmetro de 600 μm revestidas com TiAlN. Os autores avaliaram a qualidade superficial dos canais por meio dos parâmetros R_a e R_t e concluíram que os valores de rugosidade aumentaram gradualmente à medida que o diâmetro da ferramenta foi reduzido devido à perda de material nas arestas de corte.

Logo, a operação de microfresamento é capaz de fabricar microcomponentes tridimensionais com flexibilidade e precisão. Porém, para que haja sucesso alguns fatores são relevantes, tais como, a precisão da máquina-ferramenta, materiais da ferramenta, geometria, condições de corte e os revestimentos que evitam o desgaste acelerado durante a microusinagem. Além disso, outro fator a ser considerado é o efeito escala durante o microfresamento, fenômeno associado as reduções consideráveis das dimensões dos microcomponentes, sendo este apresentado a seguir com as variáveis de influência.

3.2. Efeito escala

O microfresamento de topo não é simplesmente a versão reduzida do fresamento de topo convencional. Há certos desafios encontrados no microfresamento que não estão associados com o fresamento convencional. Uma das características mais significativas da operação de microfresamento é o efeito escala (LAI et al., 2008), sendo este fenômeno capaz de descrever o comportamento de um material durante a fabricação em escala reduzida e na usinagem é definido como um crescimento não linear da energia específica de corte com a redução da espessura do material a ser cisalhado (KOÇ et al., 2011). Nesse sentido, na operação de microfresamento a microestrutura do material (tamanho de grão) e a relação entre a espessura do cavaco não deformado e o raio de aresta da ferramenta são determinantes para a formação do cavaco, como detalhado na Figura 3.2.

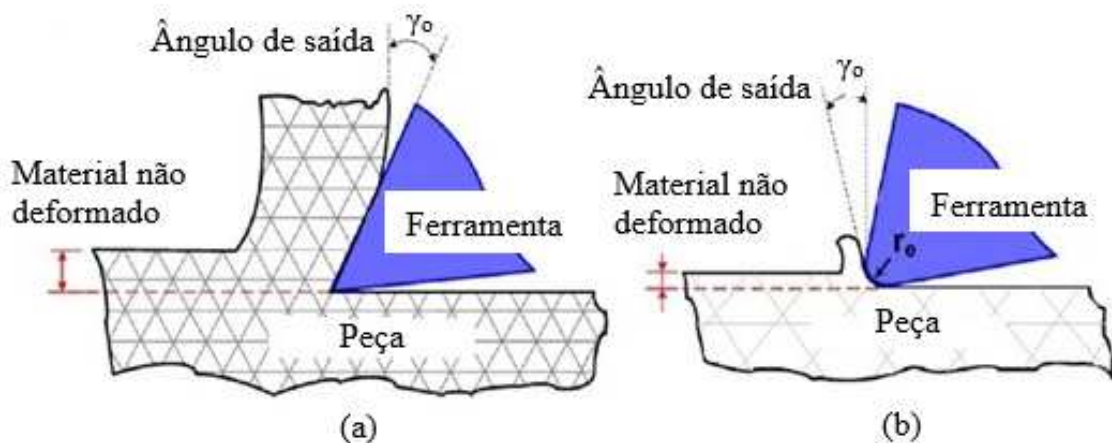


FIGURA 3.2 - Desenho esquemático.(a) Usinagem convencional macro escala; (b) microusinagem.

FONTE: Adaptado de ARAMCHAROEN et al. (2009).

Na Figura 3.2 (a) pode ser observada a usinagem convencional, onde o ângulo de saída é considerado positivo para reduzir as forças de corte durante o corte de materiais dúcteis, sendo a espessura do cavaco e o tamanho do grão normalmente maiores que o raio de aresta da ferramenta. Além disso, o raio de aresta pode ser desconsiderado, dado que a ferramenta é considerada como completamente afiada e a remoção do cavaco é proveniente por cisalhamento do material. Já na Figura 3.2 (b) é detalhada a microusinagem, onde a razão entre a espessura do cavaco não deformado e o tamanho do grão do material com o raio de aresta da ferramenta é menor em comparação com a usinagem convencional. Neste caso, a ferramenta não pode ser considerada completamente afiada e o ângulo de saída torna-se negativo,

provocando o aumento das forças de usinagem. Esse fenômeno de acordo com KOÇ et al. (2011), é conhecido como efeito escala que é caracterizado pelo aumento não linear da força específica de corte ou energia específica de corte para processos de usinagem com pequena espessura de corte. Portanto, o efeito escala pode ocorrer quando a espessura do cavaco é da mesma ordem de grandeza do raio de aresta ou, até mesmo, do tamanho do grão do material a ser usinado (MIAN et al., 2011).

A relação entre espessura do cavaco não deformado e o raio de aresta da ferramenta pode ser observada na Figura 3.3, onde a força específica de corte aumenta de maneira não linear quando o avanço por dente é menor que o raio de aresta da ferramenta.

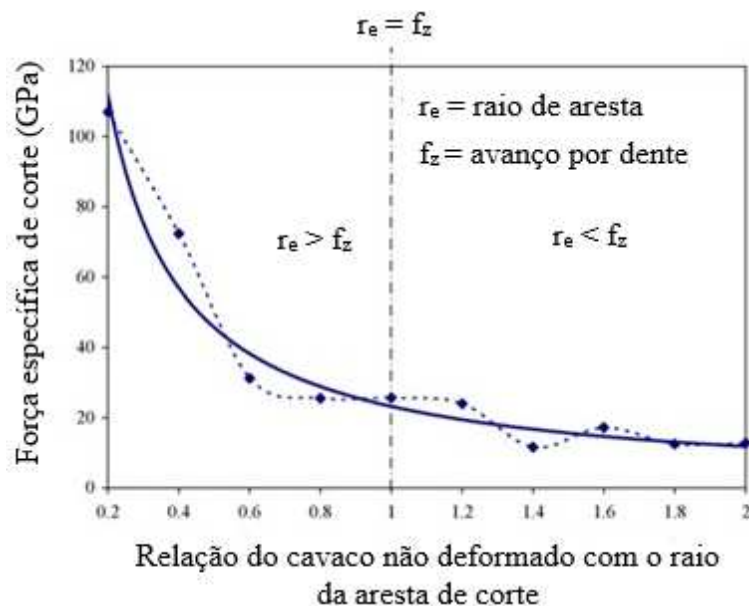


FIGURA 3.3 - Influência da relação do raio de aresta da ferramenta com a espessura do cavaco não deformado na força específica de corte.

FONTE: ARAMCHAROEN et al. (2009).

No microfresamento, a microdureza e a resistência do material da peça podem ser modificadas localmente devido à intensidade da pressão de corte, alta tensão, alta taxa de deformação e a temperatura na zona de corte que, contribuem para a observação do efeito escala. Algumas características relacionadas ao efeito escala podem influenciar os mecanismos de corte do material, com alteração das forças de corte, rugosidade, processo de formação do cavaco, formação de rebarba, vibrações e energia consumida durante a operação (CHENG et al. 2013).

Dependendo da espessura do cavaco, os mecanismos de corte do material podem ser alterados, conforme especificado na Figura 3.4, onde h representa a espessura do cavaco não deformado e h_m a mínima espessura do cavaco.

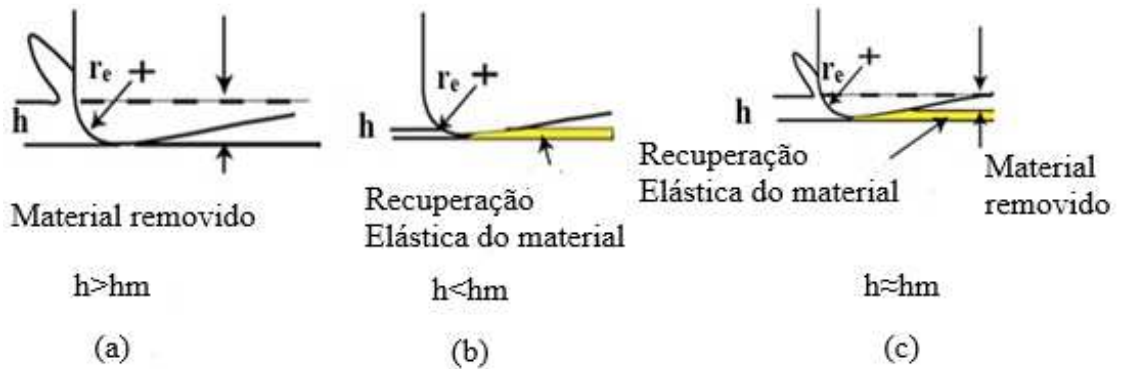


FIGURA 3.4 -.Desenho esquemático do efeito da mínima espessura do cavaco; (a) $h > h_m$; (b) $h < h_m$; (c) $h \approx h_m$.
FONTE: Adaptado de CHAE et al. (2006).

Quando a mínima espessura do cavaco é menor que a espessura do cavaco não deformado (Figura 3.4 a), a remoção do material acontece somente pelo modo de cisalhamento. Já, na Figura 3.4 b verifica-se que quando a mínima espessura do cavaco é maior que a espessura do cavaco não deformado, o material não é removido pela ferramenta, sendo deformado plasticamente pela ferramenta ocorrendo, um maior atrito da ferramenta com a peça favorecendo o fenômeno de sulcamento. Por fim, quando a mínima espessura do cavaco é igual a espessura do cavaco não deformado (Figura 3.4 c), acontece a remoção do material por cisalhamento e devido a recuperação elástica do material verifica-se o fenômeno de sulcamento, porém, em menor proporção em relação à Figura 3.4 b.

Para investigar o efeito escala na microusinagem, tem sido proposta a utilização de técnicas capazes de identificar e descrever o fenômeno, como a emissão acústica e o método de elementos finitos. Os autores MIAN et al. (2011) utilizaram a emissão acústica para monitorar o microfresamento da liga de níquel Inconel 718 a seco com microfresas com duas arestas de corte de diâmetro e $500 \mu\text{m}$ sem revestimento e com revestimento de TiNAl. Os sinais de emissão acústicas mostraram que o aumento da energia específica, rugosidade, largura da rebarba foram intensificados com a redução da espessura do cavaco não deformado, sendo assim, associados ao efeito escala.

JACKSON et al. (2017) analisaram os mecanismos de formação do cavaco no microfresamento discordante da liga de titânio Ti6Al4V utilizando o método de elementos finitos. Os autores relacionaram a força de corte (F_c) e a força de avanço (F_f) para avaliar a transição da formação do cavaco não deformado para a formação do cavaco por cisalhamento. Observou-se que durante a operação de microfresamento as componentes das forças aumentaram com a redução da espessura do cavaco, o que levou a uma mudança na distribuição das forças de usinagem. Quando o raio de aresta da ferramenta se aproximou do tamanho da espessura do cavaco não deformado, a força de avanço foi maior em magnitude que a força de corte. Consequentemente, a mudança na relação da força de corte com a força de avanço ocorreu devido à transição do modo cisalhamento para o sulcamento. Os autores concluíram que quando $F_c/F_f > 1$ ocorreu a formação do cavaco, para $F_c = F_f$ a rebarba e a formação do cavaco existiram simultaneamente e quando $F_c/F_f < 1$ não houve formação de cavaco, mas somente formação de rebarbas. Porém, existem alguns desafios relacionados à análise da formação do cavaco pelo método de elementos finitos. Esses incluem os obstáculos associados aos diferentes tipos de malhas, coeficiente de atrito e à não uniformidade dos materiais analisados, que prejudicam a análise por esse método, pois geram resultados diferentes dos resultados experimentais dos ensaios de microfresamento (MALEKIAN et al., 2012).

Um modelo analítico foi desenvolvido por SON et al. (2005), no qual o raio de aresta da ferramenta e o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho são os principais fatores para determinar a mínima espessura do cavaco, como detalhado na Figura 3.5. O estudo foi conduzido considerando as forças passiva (F_p) e tangencial (F) e o coeficiente de atrito entre ferramentas de diamante e os seguintes materiais: alumínio, bronze e cobre para determinar uma relação matemática entre a mínima espessura do cavaco e o raio de aresta da ferramenta, conforme apresentado na EQ. 3.1. Neste trabalho, o modelo adotado para determinar a mínima espessura do cavaco foi o modelo proposto por SON et al. (2005). O motivo da escolha deste modelo foi a possibilidade de determinar a mínima espessura do cavaco antes de realizar os ensaios de microfresamento, o que possibilitou minimizar o efeito do sulcamento do material que foi prejudicial para a rugosidade, formação de rebarba, desgaste da ferramenta e forças de usinagem.

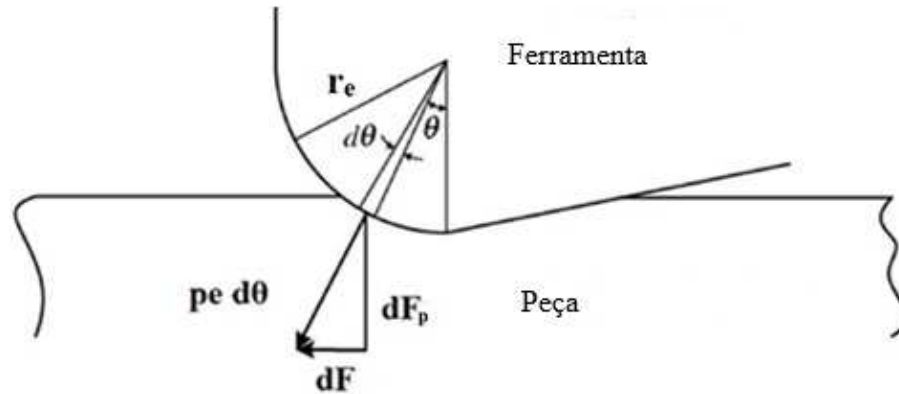


FIGURA 3.5 - . Modelo para determinar a mínima espessura do cavaco.

FONTE: SON *et al.*, (2005).

$$h_{min} = r_e \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right) \right) \quad (3.1)$$

Onde:

h_{min} = mínima espessura do cavaco

r_e = raio de aresta da ferramenta

β = ângulo de atrito entre a ferramenta e o cavaco

Na operação de microfresamento de canais, onde o corte é tridimensional, existem dois sentidos de corte atuando simultaneamente: concordante e discordante. Nesse sentido, a espessura do cavaco não é constante e haverá regiões de sulcamento do material e regiões de cisalhamento do material como demonstrado na Figura 3.6.

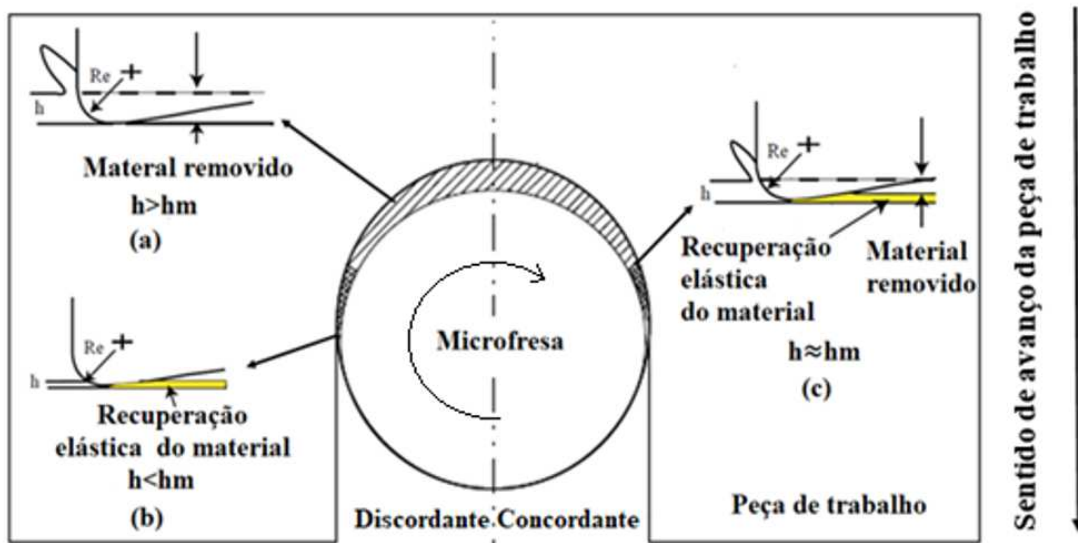


FIGURA 3.6 - . Corte no sentido discordante e concordante durante o microfresamento.

FONTE: Adaptado de CHAE *et al.* (2006) e CHENG *et al.* (2013).

Um fator relevante a ser considerado na microusinagem é a influência da microestrutura do material no efeito escala. ELKASEER et al. (2016) realizaram investigaram o desempenho da liga de Cu99.9E modificada metalurgicamente e mecanicamente pelo processo de ECAP (Presagem em Canais Equiangulares). Os autores conduziram os ensaios com duas diferentes microestruturas, sendo a primeira amostra com tamanho médio de grão de 30 μm e a segunda amostra processada pelo ECAP com tamanho médio de grão de 200 nm. Para o ensaio de microfresamento a seco, foram produzidos canais sem utilizando microfresas com 200 μm de diâmetro revestidas com TiNAl e velocidade de corte de 5 e 25 m/min com profundidade de usinagem de 7 μm . Os resultados mostraram que a microestrutura refinada da liga de Cu99.9E tornou o material mais homogêneo em relação a liga de Cu99.9E sem processamento por ECAP, e reduziu a mínima espessura do cavaco melhorando as condições de corte durante o microfresamento e, além disso, minimizou o efeito escala. Durante o microfresamento da liga processada por ECAP e devido à redução da mínima espessura do cavaco em relação a liga de cobre sem processamento, notou-se uma melhora da rugosidade do canal microusinado e redução do número de defeitos, como microtrincas do qual são altamente dependentes da homogeneidade do material. Outro fator considerado foi a redução das vibrações causadas pela mudança do ângulo de cisalhamento ao passar da aresta de corte por grãos de diferentes tamanhos, corroborando o entendimento que o material apresentou melhores condições de corte.

Os autores WU et al. (2016) investigaram a influência do raio de aresta da ferramenta e o tamanho do grão na força de corte durante o microtorneamento da liga de cobre OFC (cobre desoxigenado). O microtorneamento foi realizado a seco com ferramentas de PCD (diamante policristalino) e as ligas de cobre utilizadas como peça apresentaram tamanho médio de grão de 20 e 60 μm . Os autores selecionaram três valores de avanço por dente (f_z) e três valores de raio de aresta (r_e) e mantiveram a velocidade de corte (v_c) e profundidade de usinagem (a_p) constantes ao longo dos experimentos. Os resultados apresentados na Figura 3.7 mostraram que o aumento do raio de aresta da ferramenta e o aumento do avanço por dente afetaram principalmente a força de corte. A justificativa para o aumento da força de corte está relacionada com a redução do tamanho de grão do material durante o processamento por ECAP que aumentou a resistência a deformação do material devido a diminuição dos defeitos do material, na qual requer maiores forças de corte para remover o cavaco por cisalhamento. Nesse sentido, outros autores (DING et al., 2012) e (SIMONEAU et al., 2006) também registraram

que mudanças na estrutura cristalográfica, tais como o tamanho de grão do material e a orientação de grão, podem causar uma distinta variação na força de corte e na rugosidade.

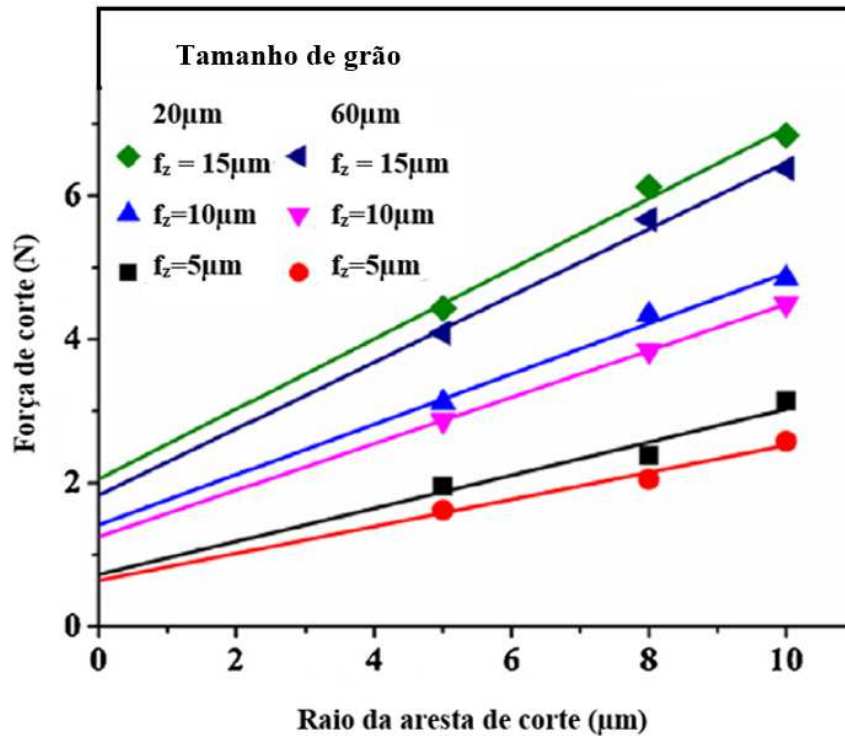


FIGURA 3.7 - Variação da força de corte em relação ao raio da aresta da ferramenta para diferentes tamanhos de grão do material.

FONTE: WU et al. (2016).

Portanto, pode-se depreender da Figura 3.7 que o raio de aresta da ferramenta e o tamanho de grão do material afeta de maneira significativa a força de corte. Conforme abordado nos parágrafos anteriores, o desenvolvimento de modelos e estudos experimentais são importantes para evitar a seleção de parâmetros de entradas e condições de cortes inadequadas que podem ocasionar o efeito de sulcamento do material, que aumenta o atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a peça de trabalho em virtude do retorno elástico do material. Quando o efeito do sulcamento do material ocorre, há um aumento não linear da força específica de corte, desgaste excessivo da ferramenta e conseqüentemente, influenciando a qualidade superficial da peça.

A seguir, serão detalhados a emissão acústica bem como o monitoramento da ferramenta de corte por meio desse processo.

3.3. Emissão acústica

LIPTAI et al. (1971) afirma que a emissão acústica é definida como ondas elásticas de compressão ou tensão geradas durante processos dinâmicos em materiais. Dessa forma, por meio do registro da intensidade dos sinais de emissão acústica é possível detectar a energia elástica de natureza mecânica, que se propaga pelo material na forma de ondas elásticas.

A origem da emissão acústica é resultado do movimento e crescimentos de defeitos acompanhados por rápida reorganização atômica da estrutura cristalina que ocorre durante o estado de tensão deformação ou fratura do material (VICTOR et al., 2007). Posto isto, a energia elástica é redistribuída, o que resulta em sinais de emissão acústica.

Os primeiros estudos e aplicação da técnica de emissão acústica foram por volta de 1930 na área de geologia para o monitoramento de ondas sísmicas que se propagam em virtude dos tremores de terra. Em 1950 a emissão acústica foi aplicada em outras áreas do conhecimento como a metalurgia. CHRISTIAN et al. (2008) relataram em seu livro que o primeiro fenômeno estudado na metalurgia foi “*tin cry*”, observado em chapas finas de estanho onde o som emitido era devido à formação de maclação durante a deformação plástica do material. Além disso, pode-se também detectar por meio dos sinais de emissão acústica as transformações de martensita, pois são acompanhadas de um ruído característico.

Segundo Porto et al. (2004), a aplicação da emissão acústica em máquinas ferramentas começou na década de 1970, no Japão e vem sendo aplicada com sucesso em sistemas de monitoramento de ferramenta (desgaste e fratura), formação do cavaco e análise do estado de corte.

3.3.1 Monitoramento da ferramenta de corte

Como destacado na ampliação da Figura 3.8, existe um grande número de efeitos envolvidos e mecanismos que afetam os sinais de emissão acústica durante o microfresamento, uma vez que há cisalhamento, deformação, aumento de temperatura, movimento de deslocamentos e vibrações mecânicas que afetam a rigidez da microfresa e qualidade superficial da peça microusinada. Vários desses mecanismos estão relacionados com o desgaste e ou com fenômenos metalúrgicos.

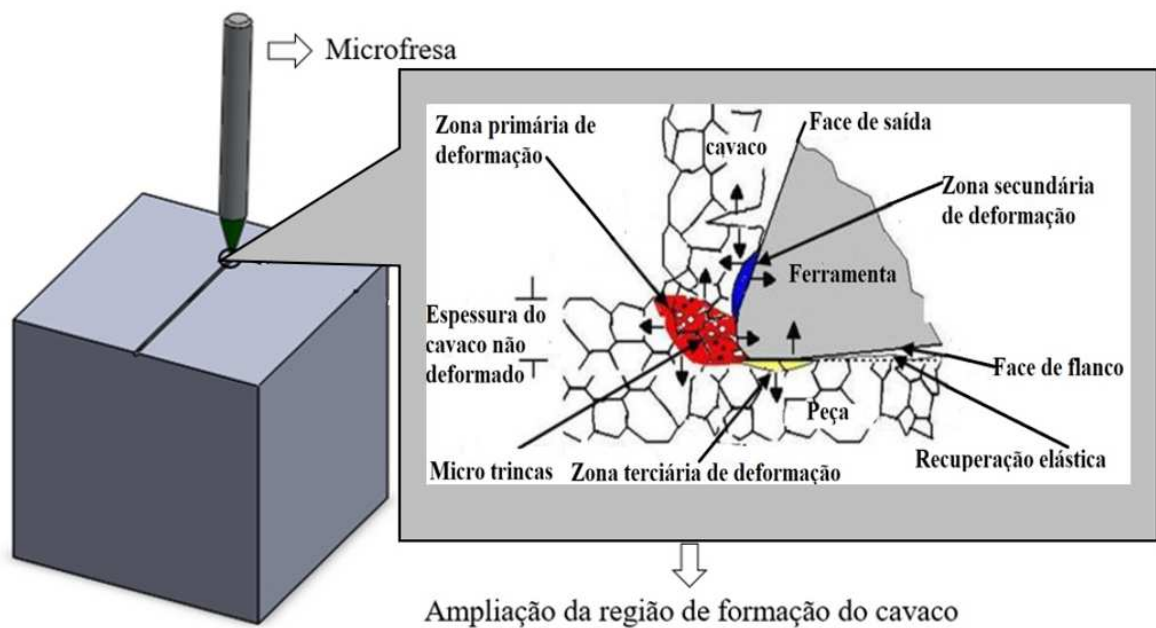
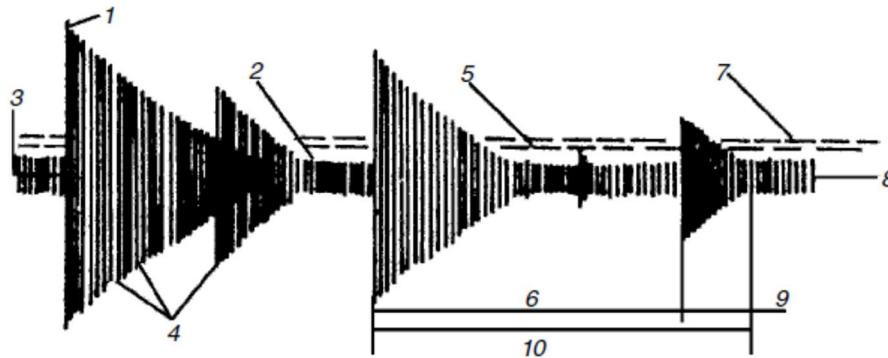


FIGURA 3.8 - Microfresamento e ampliação da região de formação do cavaco.

FONTE – Adaptado de MIAN et al. (2011).

O desgaste da ferramenta em uma operação de usinagem é altamente indesejável, uma vez que degrada severamente a qualidade das superfícies usinadas e provoca mudanças indesejáveis e imprevisíveis na geometria da peça usinada (LIANG et al. (1989). No microfresamento, em virtude das dimensões da ferramenta de corte e sua baixa rigidez quando comparada com as ferramentas do fresamento convencional, o simples procedimento de remover a ferramenta da máquina para avaliar as condições de desgaste pode ocasionar a sua quebra ou erros geométricos se for fixada de maneira incorreta na máquina. Logo, é necessário a utilização de sensores capazes de realizar o monitoramento do desgaste durante o microfresamento. Além disso, a emissão acústica é utilizada para prever a fratura da ferramenta de corte, sendo apenas um dos vários métodos que podem ser usados para monitorar operações de usinagem de forma a fornecer informações do processo. A principal vantagem do uso dos sinais de emissão acústica no monitoramento das condições da ferramenta é a não detecção das frequência de vibrações da máquina e do meio ambiente (CHEN et al. (2007). Nesse sentido, os sensores de emissão acústica são adequados a operação de microfresamento, pois a baixa taxa de remoção de material, juntamente com as altas rotações, resulta em altas frequências durante a operação.

O fato da emissão acústica ter uma larga banda de espectro é em parte explicado pela origem dos sinais, que podem ser de dois tipos (pulsos ou contínuos), como detalhado na Figura 3.9.



Onde:

- | | |
|----------------------------------|---------------------------|
| 1- Máxima amplitude do pulso | 6- Intervalo entre pulsos |
| 2- Nível de ruído | 7- Nível de contagem |
| 3- Diferença de potencial | 8- Tempo |
| 4- Única oscilação | 9- Duração do pulso |
| 5- Diferença de potencial em RMS | 10- Evento |

FIGURA 3.9 - Representação esquemática dos sinais de emissão acústica.

FONTE: Victor et al. (2007).

Em materiais policristalinos, os sinais de emissão acústica são comumente contínuos e atribuídos à deformação plástica de grãos de um policristal. Devido à distribuição de tensões não uniformes na estrutura policristalina, as deformações plásticas de cristais individuais ocorrem quando a deformação total é pequena e o metal está na região elástica do ponto de vista fenomenológico. Por esta razão, os sinais de emissão acústica permitem determinar o aparecimento de não-homogeneidades e microdefeitos durante a fase inicial de deformação e danos materiais VICTOR et al. (2007).

Na usinagem, os sinais contínuos são caracterizados como de baixa frequência e baixa amplitude gerados principalmente nas zonas de deformação primária, secundária e terciária. A zona de deformação terciária é responsável pela maior fonte de sinais de emissão acústica em virtude do maior atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície

usinada, o que aumenta a energia gasta para deslizar o material nesta região. Os sinais de emissão acústica descontínuos são descritos como sinais de alta frequência e alta amplitude associados com a quebra do cavaco e o desgaste da ferramenta (PRAKASH et al. 2015). Além disso, o monitoramento dos sinais de emissão acústica durante a microusinagem apresenta questões relacionados com ruído e a taxa de aquisição de dados, que exigem grande capacidade computacional para realizar o armazenamento dos dados para posterior processamento. Segundo SHAW et al. (2005), todas as máquinas-ferramentas operam com algumas vibrações e em certas operações de corte estas podem ter grandes amplitudes. Para que as frequências de excitação da máquina não influenciem as frequências de excitação da usinagem, a taxa de aquisição de dados tem que ser de no mínimo quatro vezes a frequência de excitação da máquina, sendo, possível calcular a taxa de aquisição de dados conforme a EQ. 3.2 descrita por COPPEL *et al.*, (2016).

$$f(Hz) = \frac{rpm \times n}{60} \times 4 \quad (3.2)$$

Onde:

f(Hz)= frequência de amostragem

rpm= número de rotações por minuto

n= número de arestas

Em relação o microfresamento, é necessário um cuidado especial para posicionar a ferramenta à peça, principalmente devido as dimensões da microfresa. Alguns trabalhos relataram maneiras de determinar o contato entre ferramenta e peça de trabalho, como a utilização de microscópio óptico acoplado a máquina ferramenta, a condução elétrica entre ferramenta e peça e a emissão acústica. A detecção do contato da ferramenta com a peça por meio do microscópio óptico, existe a questão da imprecisão na determinação do contato, já no monitoramento por meio da condução elétrica existe a peculiaridade de alguns materiais serem isolantes e não conduzir eletricidade. Logo, a emissão acústica surge como alternativa para determinar o contato entre ferramenta e peça devido à sua alta sensibilidade e pela capacidade de fixar o sensor o mais próximo possível da região de usinagem. Nesse sentido, BOURNE et al. (2008) analisaram a técnica de emissão acústica para a liga de alumínio Al 6061-T6, aço inoxidável 304 e aço de baixo carbono durante a operação de microfuração e notaram que o

erro presente quando se utiliza a técnica de emissão acústica para determinar o contato entre a ferramenta e a peça de trabalho é menor do que $1\ \mu\text{m}$. Devido ao fato dos sinais de emissão acústica serem mais sensíveis ao contato que os outros métodos citados, houve em menor dano na superfície durante o contato da ferramenta com a peça.

JEMIELNIAK et al. (2008) pesquisaram a influência dos sinais de força e emissão acústica no microfresamento a seco do aço AISI D2 temperado e revenido com dureza de 50 HRC com microfresas de metal duro de topo esférico sem revestimento de diâmetro de $800\ \mu\text{m}$ e concluíram que durante o contato entre a ferramenta com a peça, os sinais de emissão acústica são mais perceptíveis que os sinais de força. Durante o microfresamento, as frequências associadas com a alta rotação da máquina ferramenta ficaram próximas da frequência natural do dinamômetro que entrou na faixa de ressonância, tendo como respostas resultados não adequados dos sinais da força de corte.

KOO et al. (2017) monitoraram o microfresamento da liga de alumínio Al6061-T6 utilizando sinais de emissão acústica e relacionaram as características dos sinais de emissão acústica com as microrebarbas formadas e os mesmos detectaram que valores maiores da intensidade dos sinais de emissão acústica estão relacionados com a não formação do cavaco durante o microfresamento. Um aumento da intensidade dos sinais de emissão acústica pode estar relacionado com a recuperação elástica do material e maior atrito na zona de corte aumentando a energia específica de corte, na qual é um parâmetro para determinar a energia consumida durante a usinagem. Por fim, os autores associaram o aumento dos sinais de emissão acústica à uma maior quantidade de rebarbas formadas durante o microfresamento.

Neste trabalho, o objetivo foi realizar o monitoramento dos sinais de emissão acústica durante o microfresamento, correlacionando as intensidades dos sinais com a rugosidade, formação de rebarba e desgaste da ferramenta. A seguir será apresentado o tópico sobre as forças relacionadas a operação de microusinagem.

3.4. Forças durante a microusinagem

O conhecimento da força de usinagem que age sobre a cunha cortante e o estudo de suas componentes são de grande importância porque possibilitam estimar a potência necessária para o corte, bem como as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta,

além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte, influenciando a viabilidade econômica do processo MACHADO et al. (2015). A justificativa do monitoramento dos sinais de força neste trabalho deve-se à sua relevância no controle da qualidade da superfície e no desgaste da ferramenta, uma vez que pelo controle dos sinais de força é possível prever e minimizar a deflexão e a falha prematura da ferramenta proveniente do desgaste excessivo e, conseqüentemente, vibrações, formação de rebarbas e precisão do microcomponente. Dessa forma, para obter as forças nas operações de usinagem foram propostos métodos baseados em modelos analíticos, mecânicos e numéricos, dado que a previsão das forças de corte permite reduzir custos relacionados com a operação de usinagem.

Modelos analíticos são construídos a partir de equações matemáticas baseadas em fundamentos da mecânica, ciência dos materiais ou física. Sua complexidade pode variar da escala de usinagem para a qual estão destinados, implicando vários graus de precisão. Os modelos analíticos são projetados não apenas para prever forças, mas também fornecem informações intermediárias, como tensões, deformações, etc. Estes modelos utilizam a menor quantidade de dados experimentais e tem como principal objetivo utilizar resultados empíricos e estatísticos para determinar as forças de usinagem (GERMAIN et al., 2013).

Os modelos mecânicos, ao contrário dos modelos analíticos, exigem uma quantidade significativa de ensaios variando os parâmetros de usinagem e o material da peça de trabalho para obter a maior quantidade de dados. O maior número de ensaios é importante para aumentar a precisão do modelo, pois a partir dos resultados experimentais são traçados gráficos que geram os fatores de correções das equações dos modelos mecânicos.

Os modelos numéricos representam mais uma possibilidade de obtenção das forças durante o processo de usinagem. Pela abordagem do método de elementos finitos, representado na Figura 3.10, é possível realizar o estudo das tensões, deformações e temperatura durante a usinagem e analisar os mecanismos importantes tais como a formação do cavaco, desgaste da ferramenta, força de corte e distribuição de temperatura. Porém, devido à dificuldade em caracterizar o material em termos de taxa de deformação, coeficiente de atrito entre o material e ferramenta para o estudo do fluxo de cavaco na superfície de saída é utilizado em conjunto o modelo semi mecânico com o objetivo de obter as características do material (URBIKAIN et al. (2017).

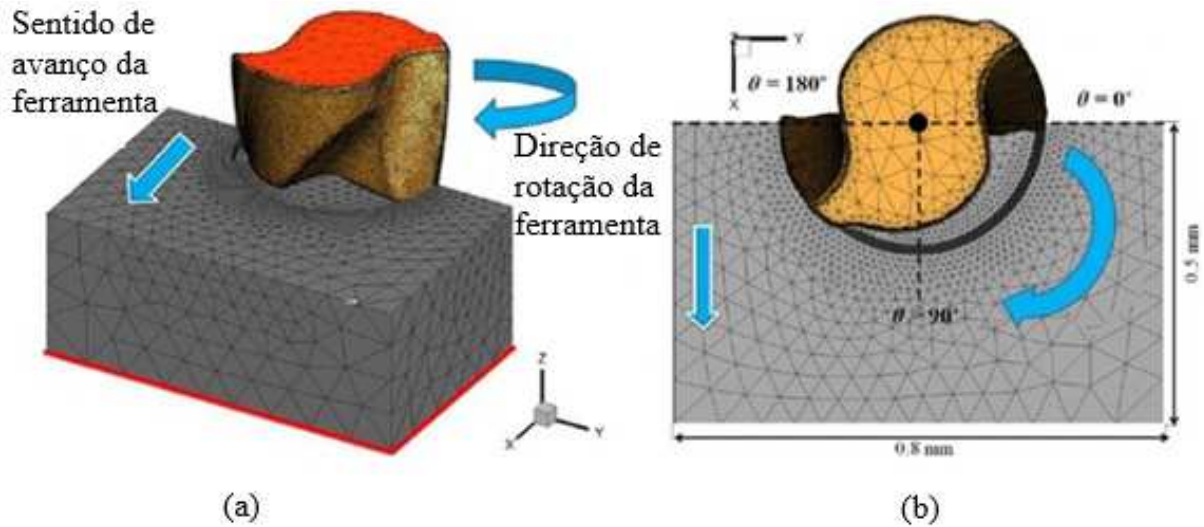


FIGURA 3.10 - Análise numérica por meio de elementos finitos; (a)- vista 3D da perspectiva e das condições de contorno. (b) - Vista superior da perspectiva.

FONTE: DAVOUDINEJAD et al. (2017).

Os trabalhos desenvolvidos para o estudo das forças de usinagem por meio dos modelos analíticos, mecânicos e numéricos na usinagem convencional foram importantes para o desenvolvimento de novos modelos para a microusinagem. Apesar do presente trabalho não apresentar como objetivo o desenvolvimento de um novo modelo de força para o microfresamento, mas sim um estudo experimental, foi relevante apresentar estudos anteriores dos modelos desenvolvidos, uma vez que a partir dos resultados destes modelos foi possível compreender fenômenos que afetam o acabamento, formação de rebarba, desgaste da ferramenta e forças durante o microfresamento. Desta forma, nos próximos parágrafos serão apresentados alguns estudos sobre os modelos de força e resultados referentes ao monitoramento dos sinais de força durante o microfresamento.

ZHOU et al. (2015) desenvolveram um modelo analítico para realizar o estudo da influência do efeito do encruamento do material, raio de aresta da ferramenta e a velocidade de corte nas forças na direção de avanço e na direção da força de apoio durante o microfresamento. Os autores destacaram que o efeito do encruamento do material aumentou as forças de usinagem por causa do gradiente de deformação do material, uma vez que o material não deformou uniformemente devido à ausência de defeitos na zona de cisalhamento. Com o aumento do raio de aresta da ferramenta sem alterar o avanço por dente, houve um aumento das forças. Isso pode ser explicado pelo maior comprimento de contato entre o raio de aresta da ferramenta e o material ocasionando maior atrito. Com o aumento da taxa de remoção de material, dado o

incremento da velocidade de corte, ocorreu redução das forças de usinagem que foi justificada pela elevação da temperatura na interface ferramenta cavaco na zona de cisalhamento secundário o que acarretou na diminuição do coeficiente de atrito, reduzindo as forças durante o microfresamento.

KANG et al. (2007) desenvolveram um modelo mecânico para o microfresamento de topo considerando o efeito do raio de aresta da ferramenta e a transição sulcamento-cisalhamento. Além disso, realizaram o microfresamento da liga de alumínio 7075 com uma microfresa de 200 μm de diâmetro de metal duro com objetivo de verificar a validade do modelo com os resultados experimentais. Os autores encontraram uma pequena discrepância entre os resultados de força do modelo e os resultados experimentais, fato justificado pelo fenômeno de desalinhamento da ferramenta com o eixo árvore da máquina. Esse fenômeno muda completamente o modelo de força pelo corte irregular da ferramenta que remove uma quantidade maior de material em umas das arestas. O desalinhamento pode ser justificado por erros geométricos durante a fabricação da ferramenta ou por erros de fixação da microfresa no mandril da máquina (PÉREZ et al., 2007).

Um outro fator que pode ocasionar discrepância entre os valores obtidos pelos modelos e os resultados experimentais está relacionado com aquisição dos sinais de forças. O principal obstáculo é causado pela alta velocidade de rotação da ferramenta, que causa distorção nos sinais. Sendo assim, um caminho para minimizar a distorção dos sinais de força está no projeto do dinamômetro, que deve possuir uma frequência natural três vezes maior que a frequência de corte. Tipicamente nas operações de usinagem, a frequência de corte é em torno de 2 kHz, logo, a frequência natural do dinamômetro deve ser ao menos 6 kHz (VENKATESH et al., 2017).

O modelamento numérico é um recurso utilizado para obter informações aproximadas dos resultados experimentais. Pesquisadores como JIN et al. (2012), DAVOUDINEJAD et al. (2017) e WANG et al. (2009) estudaram por meio de elementos finitos as forças de corte analisando a variação da espessura de corte, o raio de aresta da ferramenta e o efeito do desalinhamento da ferramenta. Os resultados verificados por meio da análise de elementos finitos foram capazes de definir as forças atuantes na aresta de corte durante o microfresamento, pois os mesmos apontaram que quando a relação ou razão entre o raio de aresta da ferramenta e o avanço por dente é menor do que a mínima espessura do cavaco, ocorre

o aumento da força de corte. Além disso, foi observado que o retorno elástico do material aumenta a força de corte devido à redução da relação entre o raio de aresta da ferramenta e a espessura do cavaco não deformado, no qual houve um aumento da energia específica de corte em aproximadamente 100 vezes em relação a usinagem convencional, conforme representado na Figura 3.11.

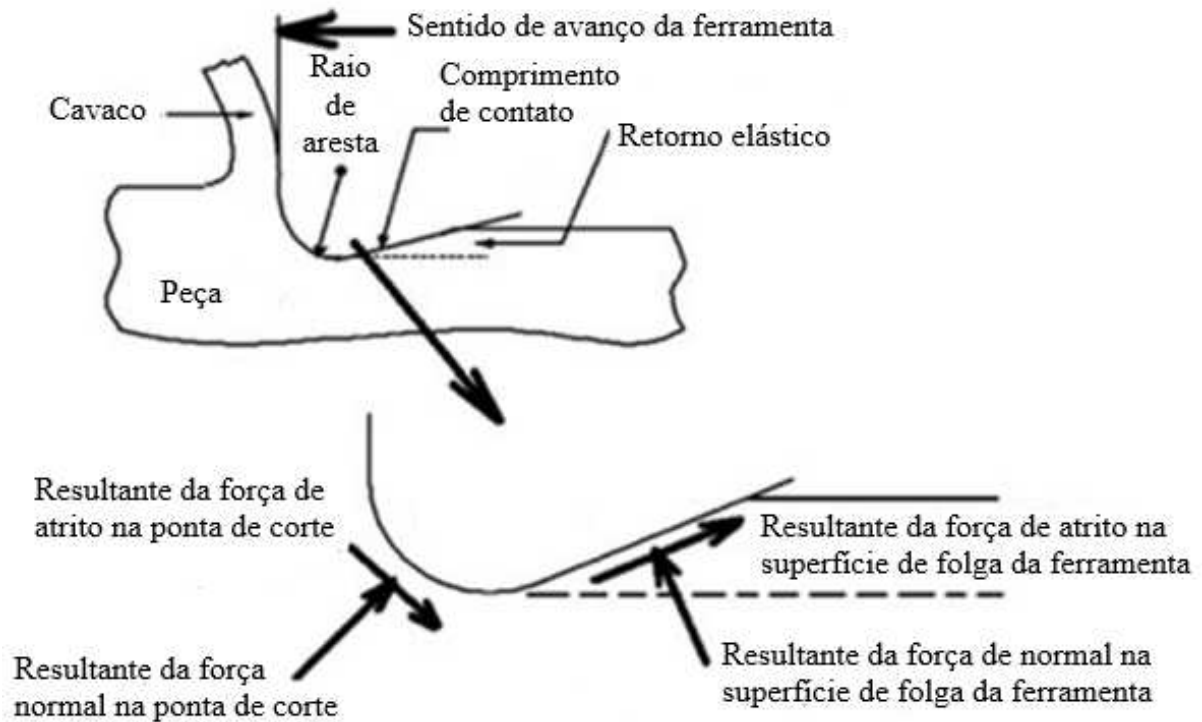


FIGURA 3.11 - Imagem generalizada da ponta de corte e da superfície de folga da microfresa com as resultantes das forças.

FONTE: Adaptado de FRIEDRICH et al. (2004).

BIERMANN et al. (2010) estudaram o efeito escala durante o microfresamento a seco do aço ferramenta 40CrMnMo7 endurecido (50 HRC) utilizando microfresas de metal duro revestidas com TiNAl e sem revestimentos com duas arestas de corte e diâmetros de 200, 400 e 1000 μm . Os autores observaram que a ferramenta de menor diâmetro, ou seja, de menor rigidez, apresentou maior deflexão e maior desvio de trajetória em relação as ferramentas de maior diâmetro. Além disso, pode ser assumido que a deflexão da ferramenta aumentou com o maior valor do avanço por dente e, portanto, também aumentaram as forças na ferramenta. Nesse sentido, a deflexão da ferramenta associada com forças mais elevadas causou um aumento da rugosidade do canal.

No próximo tópico, será apresentado a influência da rugosidade e da rebarba na operação de microfresamento.

3.5. Acabamento no microfresamento

3.5.1 Rugosidade

A superfície de componentes usinados é um fator de grande relevância na qualidade do produto final, pois pode afetar sua aplicação caso esteja fora das especificações de projeto. A textura da superfície resultante das operações de usinagem é afetada pela geometria da ferramenta de corte, velocidade de corte, avanço e material da peça de trabalho. Em adição, alguns fatores dinâmicos tais como, as condições de desgaste da ferramenta de corte, vibração, temperatura, refrigeração ou lubrificação também contribuem para alterações na textura da superfície e na forma do produto final (SUN et al. 2017) e DAVIM et al. 2011).

WEULE et al. (2001) realizaram microfresamento do aço AISI 1045 somente temperado e temperado e revenido utilizando temperaturas de revenimento de 180, 300, 450, 600° C para obter durezas e microestruturas diferentes. Durante o microfresamento, a velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de usinagem e o sentido de corte concordante e discordante foram variados em dois níveis com o objetivo de verificar as influências destes parâmetros na superfície microfresada. Os resultados indicaram que maiores valores de dureza e de velocidades de corte e avanço por dente propiciaram melhores acabamentos superficiais. Foi observada também a formação de aresta postiça utilizando baixas velocidades de corte e avanço por dente quando foi microfresado materiais com menores durezas e assim, como na usinagem convencional, os valores da rugosidade aumentaram.

POPOV et al. (2006) investigaram os efeitos da microestrutura da liga de Al 5083 modificada mecanicamente e metalurgicamente sob a qualidade superficial microfresada. A pesquisa consistiu em modificar o tamanho de grão mecanicamente por meio da extrusão do material com tamanho médio de grão de 2,5 μm , por meio de deformação plástica severa gerando tamanho de grão na ordem de 0,3 – 0,8 μm e, metalurgicamente, por meio do recozimento da liga de Al 5083 que apresentou tamanho médio de grão de 200 μm . As conclusões demonstraram que o refinamento da microestrutura do material por meio da deformação plástica severa melhorou consideravelmente a qualidade superficial microusinada.

Os autores justificaram que durante o microfresamento houve o corte de um maior número de grãos, o que pode atenuar as vibrações devido a diferentes direções cristalográficas. O refinamento do material também aumentou o número de contorno de grãos que distribuem o movimento das deslocações no material.

SHIZUKA et al. (2011) realizaram o microfresamento discordante do aço AISI D2 com dureza de 28 HRC com microfresas de diâmetro de 900 μm revestidas com TiNAl variando a profundidade de usinagem, avanço por dente e a penetração de trabalho. Os resultados mostraram que as mudanças no avanço por dente e na profundidade de usinagem têm pouca influência na rugosidade do canal microusinado. WANG et al. (2005) e DIMOV et al. (2004) justificaram que as variações dos parâmetros não causaram mudanças drásticas nos valores de rugosidade devido as altas rotações. Porém, com o aumento da penetração de trabalho os valores da rugosidade aumentaram devido à elevação da força de corte, que causou a deflexão da ferramenta e vibrações que deterioraram a rugosidade do microcanal. Entretanto, DIMOV et al. (2004) notaram que a profundidade de usinagem afetou a qualidade da superfície. Com o aumento da profundidade de usinagem, as forças e as vibrações aumentaram ocasionando a deterioração da qualidade superficial. Portanto, a profundidade de usinagem não pode ser descartada como um parâmetro que afetou a qualidade da superfície durante o microfresamento.

WANG et al. (2005) afirmaram que a rugosidade após o microfresamento pode ser influenciada pela mudança da velocidade de corte. Desse modo, os parâmetros de rugosidade R_a e R_t aumentaram com a redução do diâmetro da ferramenta em razão da maior deflexão da microfresa. Já, com o aumento da rotação verificou-se altas frequências de vibração, contribuindo para o aumento da rugosidade.

CARDOSO et al. (2010) e DIMOV et al. (2004) estudaram os efeitos das estratégias de usinagem durante o microfresamento e observaram que diferentes trajetórias da ferramenta com os mesmos parâmetros de usinagem ocasionaram o sulcamento do material, aumento do atrito da ferramenta com o material e, conseqüentemente, o aumento do desgaste da ferramenta, aos quais reduzem a qualidade superficial. Neste sentido, LLANOS et al. (2014) estudaram o microfresamento da liga de alumínio Al6061-T4 e bronze CuZn36Pb3 nos sentidos de corte discordante e concordante utilizando ferramentas de metal duro com diâmetro de 500 μm . Os resultados apontaram que o microfresamento discordante apresentou melhor qualidade superficial em relação ao sentido concordante, fato atribuído à menor deflexão da ferramenta

durante o microfresamento. Os autores também verificaram que para maiores valores de rotação a qualidade superficial obtida foi superior em relação a baixas rotações e que a profundidade de usinagem não teve influência na rugosidade superficial.

DIMOV et al. (2004) e LI, H. et al. (2007) relataram que o desgaste da microfresa durante a microusinagem foi reproduzido na qualidade superficial da peça. Dessa forma, o aumento do desgaste da ferramenta intensificou as vibrações durante a microusinagem devido às mudanças na geometria da aresta de corte, o que promoveu mudanças nas distribuições das tensões que atuaram na ferramenta durante a microusinagem, elevando os valores das forças de corte e dos valores de rugosidade, conforme mostrado na Figura 3.12.

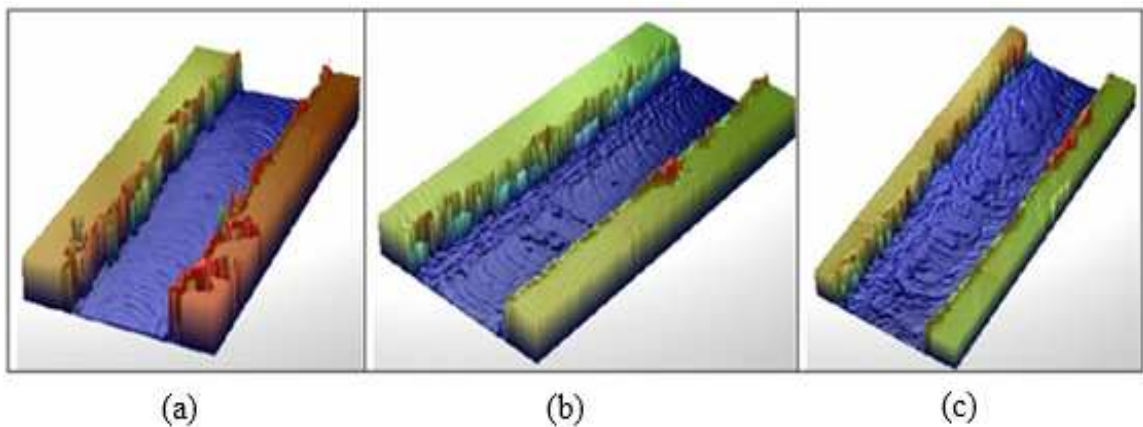


FIGURA 3.12 -. Topografia da superfície dos canais microfresados. (a) canal de número 3 (b) canal de número 45 (c) canal de número 90.

FONTE: LI, H. et al. (2007) adaptado, 2017.

3.5.2. Formação de rebarbas

A definição de rebarba utilizada neste trabalho segue a norma ISO 13715 que padronizou a rebarba como um material residual, fora da geometria ideal da borda do material de trabalho, que permanece após a usinagem ou conformação mecânica AURICH *et al.*, (2010). A Figura 3.13 mostra as rebarbas após a operação de microfresamento.

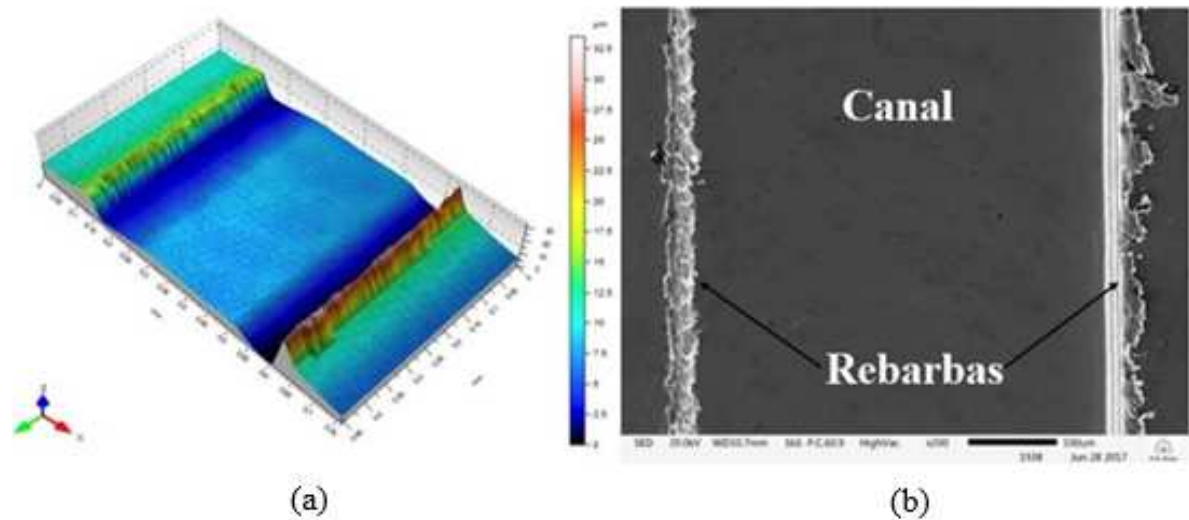


FIGURA 3.13 -. (a) Perfilometria do microcanal com rebarbas; (b) Microscopia eletrônica de varredura do mesmo microcanal com rebarbas.

FONTE: autor, 2017.

A formação de rebarbas na microusinagem é inevitável em materiais dúcteis, sendo que a sua presença não só reduz a precisão e a qualidade da peça de trabalho, mas também afeta sua montagem e funcionalidade. Na usinagem convencional, o rebarbamento é rotineiramente realizado para atender à tolerância especificada e requisitos de precisão, no entanto, nem sempre pode ser aplicado a micropartes devido as características das peças minúsculas, bem como os requisitos de alta qualidade da superfície. Além disso, a remoção da rebarba é muitas vezes um grande obstáculo em termos de tempo, esforço ou automação. O desempenho dos microprodutos não pode ser mantido conforme necessário devido à alteração de propriedade e funcionalidades em toda a zona de rebarbamento, conseqüentemente, a formação da microrebarba deve ser controlada e minimizada, na medida do possível, durante o processo de microusinagem. (CHENG et al. (2013)

Devido à dificuldade da remoção da rebarba e por este ser um processo oneroso, tem-se aumentado o interesse no estudo das microrebarbas. Os temas presentes na literatura sobre microrebarbas abordam a formação de rebarba, tipos de rebarbas, formas de caracterizar as rebarbas, monitoramento das microrebarbas durante a microusinagem e propõe alternativas de rebarbação que sejam capazes de remover as microrebarbas sem danificar a superfície dos microcomponentes. Durante a microusinagem, a formação de rebarbas é influenciada pelo desgaste da ferramenta, avanço por dente, velocidade de corte, profundidade de usinagem e dureza do material a ser usinado.

WU et al. (2017) e BIERMANN et al. (2012) relataram que durante o microfresamento o desgaste da ferramenta alterou a geometria da microfresa aumentando o raio de aresta, causando uma maior ângulo de saída e aumentando o efeito do sulcamento, produzindo maior quantidade de rebarbas. Sendo assim, em materiais com maior dureza, a presença de maiores alturas de rebarba deve-se ao maior desgaste da ferramenta (WEULE *et al.*, 2001).

Sobre o avanço por dente e velocidade de corte DENKENA et al. (2004) estudaram a altura de rebarba utilizando a operação de microfuração da liga AlCu4MgSi e constataram que o aumento do avanço por dente e da velocidade de corte acarretou em um aumento da altura de rebarba. BIERMANN et al. (2012) analisaram a formação da rebarba durante o microfresamento do aço inoxidável X5CrNi18 – 10 e observaram que a altura da rebarba foi maior com o aumento do avanço por dente e da velocidade de corte em razão do aumento da taxa de deformação do material, dado que o aumento do avanço por dente, reduziu a influência do efeito do sulcamento, conseqüentemente, o desgaste da ferramenta reduziu em virtude ao ângulo mais positivo da superfície de saída da ferramenta. BAJPAI et al. (2013) e BIERMANN et al. (2010) apresentaram resultados análogos e concluíram que durante o microfresamento, a altura da rebarba reduz com o aumento do avanço por dente e da velocidade de corte. O microfresamento com menor avanço por dente apresentou um significativo aumento da altura de rebarba, fato relacionado à menor proporção entre o raio de aresta da ferramenta e a espessura do cavaco não deformado, causando o sulcamento. Os resultados podem ser explicados pela influência da ductilidade, orientação cristalográfica, tamanho de grão do material durante o microfresamento, pois esses parâmetros têm influência na deformação do material e conseqüentemente afetam a formação de rebarba. Sendo assim, a mobilidade reduzida das deslocamentos causou o aumento das forças devido ao comportamento heterogêneo do material que podem influenciar as rebarbas geradas durante o microfresamento.

O aumento da profundidade de usinagem influenciou a largura e altura de rebarba. De acordo com os trabalhos de BAJPAI et al. (2013) e CHEN et al. (2012), a profundidade de usinagem é o único parâmetro que afetou de maneira significativa a largura de rebarba. Os autores também observaram que o volume de rebarba formado no microfresamento no sentido discordante normalmente é menor que o volume de rebarbas formadas no sentido concordante. Desta maneira, segundo CHERN et al. (2007), as rebarbas formadas durante a microusinagem,

são basicamente de quatro tipos: rebarba primária, rebarba em forma de agulha, rebarba pena e rebarba menor (Figura 3.14).

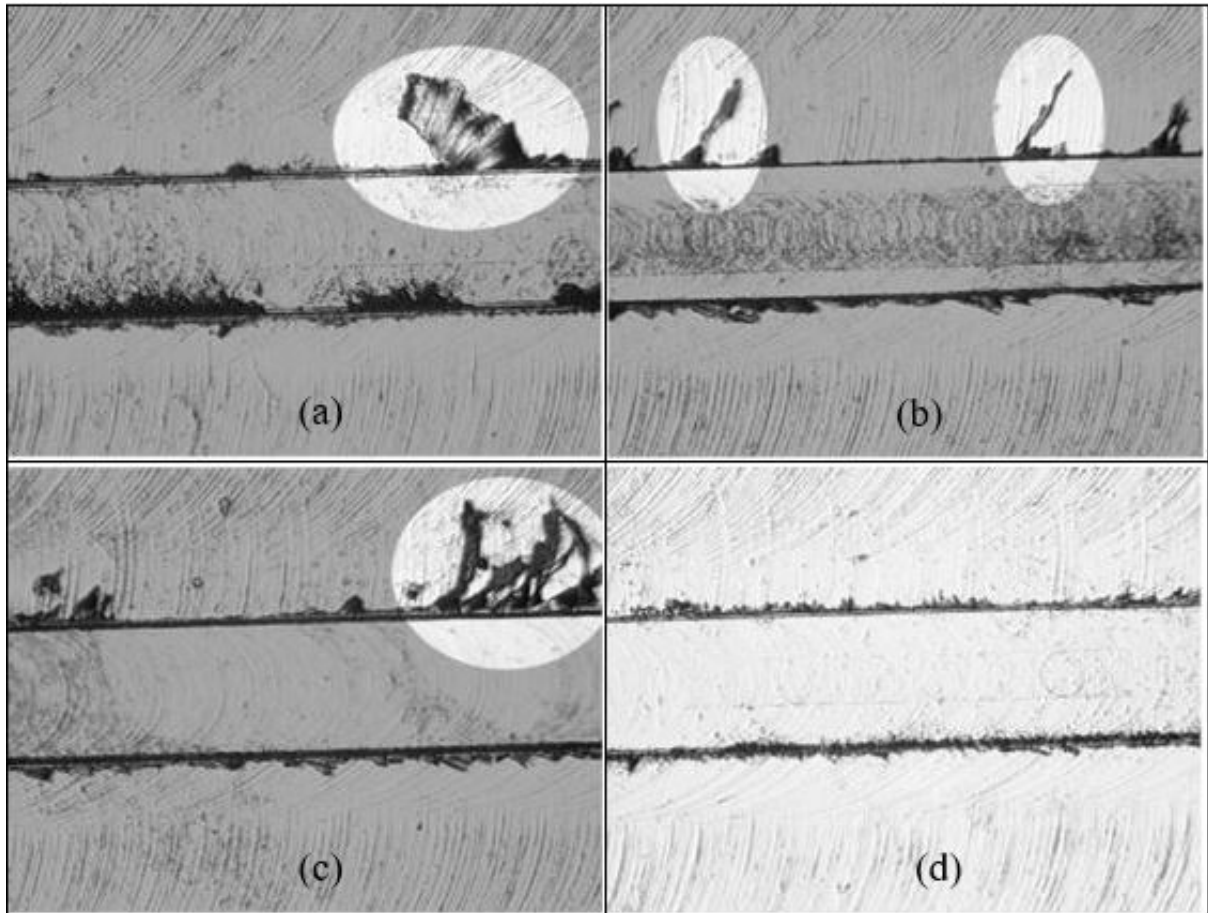


FIGURA 3.14 - Imagens das rebarbas com ampliação de 100x. (a) rebarba primária; (b) rebarba em forma de agulha; (c) rebarba pena; (d) rebarba menor.

FONTE: CHERN *et al.*, (2007).

Segundo CHERN *et al.* (2007) quando o efeito de sulcamento do material torna-se predominante durante o microfresamento, a ferramenta não removeu o cavaco por cisalhamento. Assim, ao invés de ocorrer cisalhamento, o material à frente da ferramenta é empurrado e deformado plasticamente pela microfresa. A Figura 3.15 apresenta o processo de formação da rebarba primária.

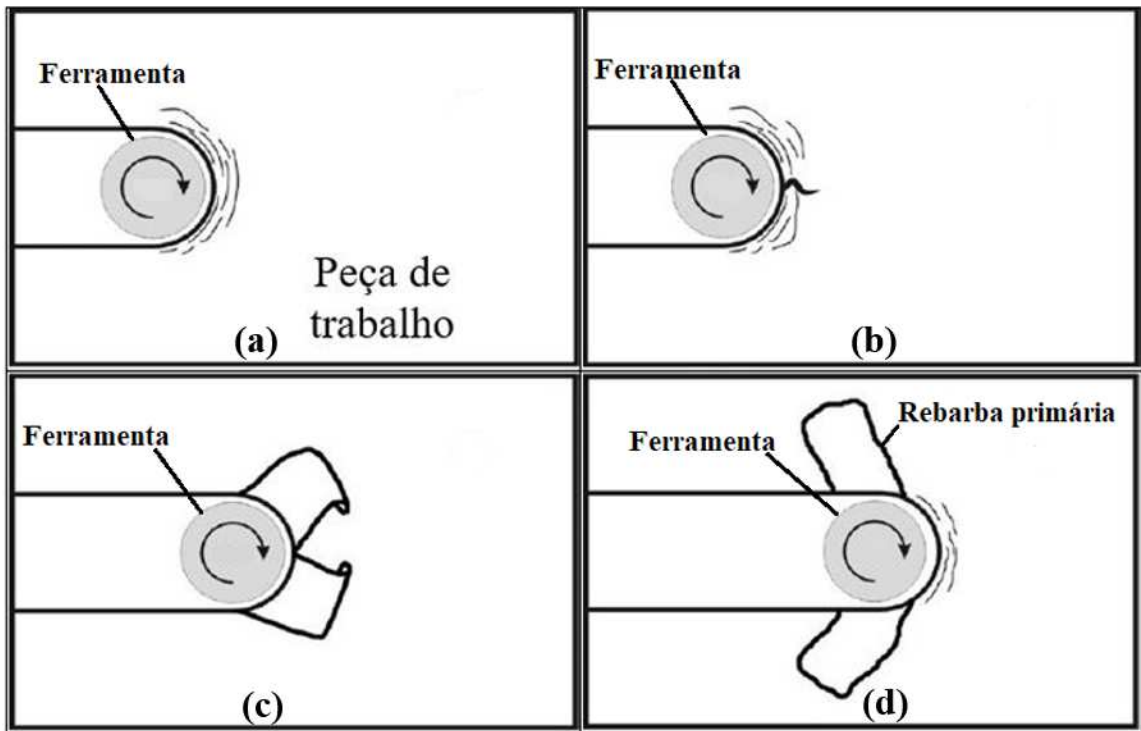


FIGURA 3.15 - Processo de formação da rebarba primária; (a) o material é fraturado ao meio; (b) rebarba primária é formada; (c) a rebarba é formada com a largura aproximada da metade da ferramenta; (d) fratura da rebarba primária.

FONTE: CHERN et al. (2007).

3.6 Considerações Parciais

A revisão bibliográfica mostrou que a operação de microfresamento é uma relevante operação de microusinagem, porém algumas peculiaridades relacionadas com o efeito escala, geometria da ferramenta, condições de usinagem e dentre outras podem provocar imperfeições na superfície microusinada. Tais imperfeições se intensificaram principalmente quando o modo de sulcamento do material é predominante em relação ao modo de cisalhamento, o que é caracterizado por um ângulo efetivo de saída menor e um aumento não linear da força específica de corte que provocaram o desgaste acelerado do raio de aresta e a deterioração da superfície microusinada. Nesse sentido, o registro e o monitoramento por meio dos sinais de emissão acústica e das forças de usinagem são importantes para monitorar a integridade das arestas de corte, formação de rebarbas, vibrações, deflexão da ferramenta e indicar tendências de possíveis falhas durante a operação de microfresamento. A seguir será apresentado o procedimento experimental adotado neste trabalho.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritas as etapas utilizadas para realização do procedimento experimental, os materiais utilizados, as informações sobre os equipamentos utilizados e métodos adotados nessa pesquisa. Além disso, serão informados os parâmetros e as condições de corte avaliados, durante a operação de microfresamento e as características do material micro usinado, AISI D2 no estado temperado e revenido. Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal De Minas Gerais – UFMG, Laboratório de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica De Minas Gerais - PUC-MG e no Laboratório NANOTECH Tribologia do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Para o melhor entendimento da metodologia utilizada, foi elaborado um fluxograma Figura 4.1 das etapas realizadas referente ao procedimento experimental.

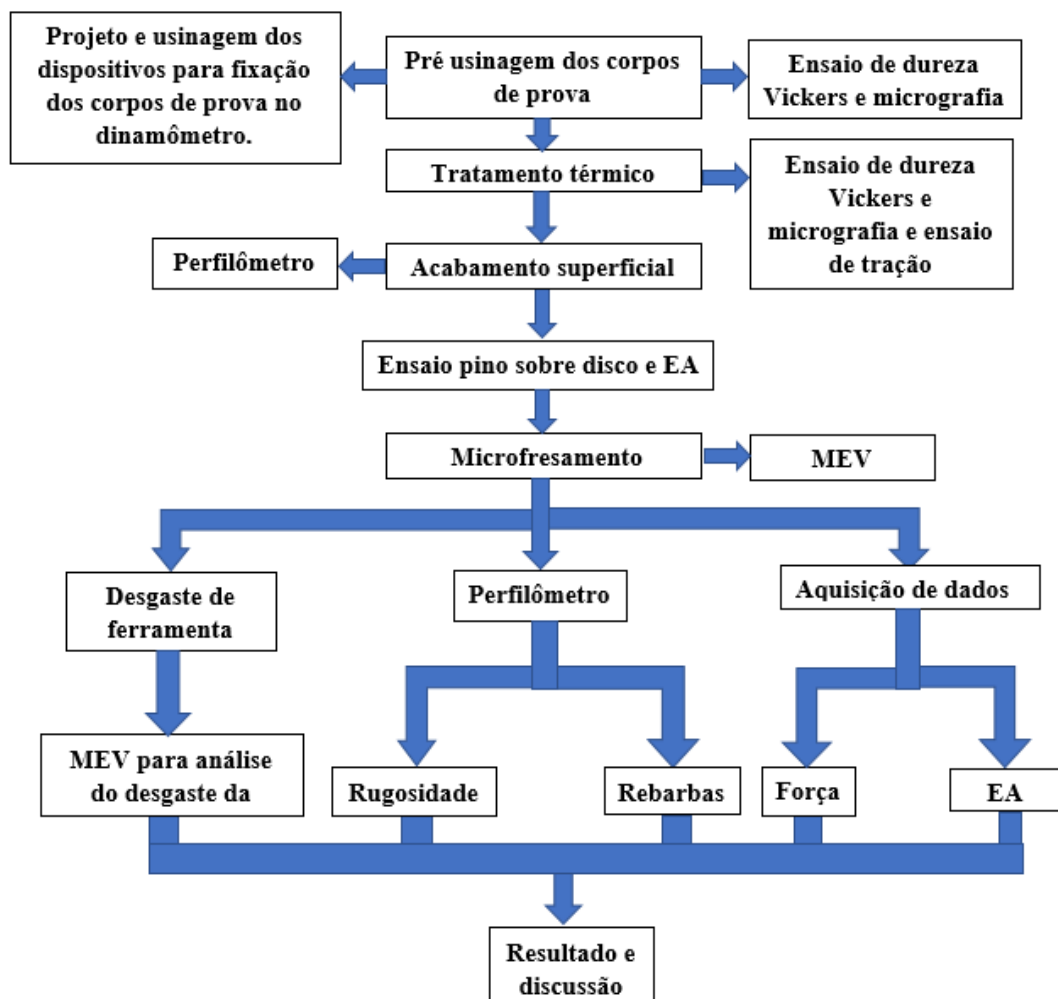


FIGURA 4.1 - Fluxograma elaborado para o procedimento experimental.

FONTE: autor, 2017

4.1. Materiais

O material utilizado na fabricação dos corpos de prova para os ensaios de microfresamento, pino sobre disco, ensaio de tração e dispositivo para fixação dos pinos metal duro revestidos com TiNAl durante o ensaio pino sobre disco, foi o aço AISI D2 no estado recozido com dureza de 272 HV (26 HRC \pm 1) na forma de placas com dimensões de 171 x 101 x 15 mm. A Tabela 4.1 apresenta a composição química desse material.

Tabela 4.1 - Composição química do aço AISI D2.

| C (%) | Si (%) | Cr (%) | Mo (%) | V (%) |
|-------|--------|--------|--------|-------|
| 1,50 | 0,30 | 12,0 | 0,95 | 0,90 |

Fonte: Villares Metals. 2017

Inicialmente, foi elaborado o planejamento do corte das placas de aço AISI D2 considerando-se que cada corpo de prova para o ensaio de microfresamento tivesse dimensões suficientes para a fixação do sensor de emissão acústica. Além disso, os corpos de prova para o ensaio pino sobre discos foram dimensionadas por meio da velocidade de corte utilizada durante o microfresamento. As dimensões dos corpos de prova de tração foram definidas segundo a norma ABNT NBR 6152 (1992). Para isso, foi utilizado um *software* CAD no desenvolvimento de todos os desenhos e durante a etapa de elaboração dos desenhos foi definido a quantidade de corpos de prova que seria utilizada para cada ensaio, conforme indicado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 -.Dimensões dos corpos de prova.

| Tipo de ensaio | Quantidade | Dimensões (mm) |
|----------------------------|------------|---------------------------|
| Ensaio de tração | 4 | \varnothing 12,7x 94 mm |
| Ensaio de pino sobre disco | 2 | 55x55x8 mm |
| Ensaio de microfresamento | 15 | 38x38x12mm |

Fonte: autor, 2017.

Para o ensaio tribológico de pino sobre disco, foram utilizados dois pinos de metal duro microgrão de topo esférico revestidos com TiNAl. A Figura 4.2 ilustra o desenho tridimensional com suas respectivas dimensões.

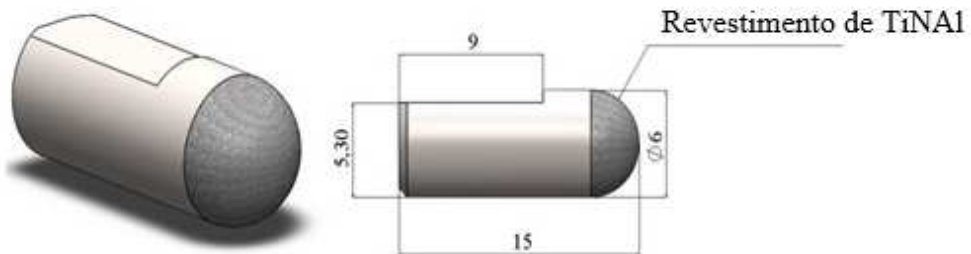


FIGURA 4.2 - Pino de metal duro revestido com TiNAl.

FONTE: autor, 2017.

As microfresa de topo reto revestidas com TiNAl foram fabricadas pela Mitsubishi Materials, código MS2MSD0050, conforme detalhado na Figura 4.3. A condição de corte recomendada pelo fabricante para materiais endurecidos é: avanço por dente de 12 μm /dente, velocidade de corte de 62,80 m/min e profundidade de usinagem de 15 μm .

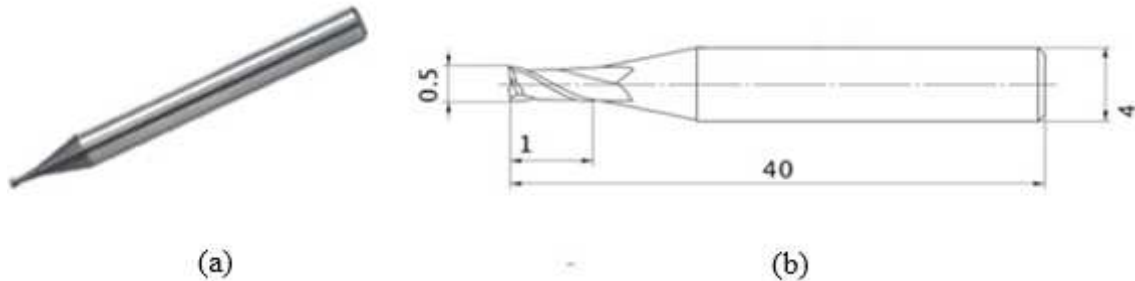


FIGURA 4.3 - (a) Imagem representativa da microfresa MS2MSD0050; (b) desenho técnico com as dimensões da microfresa MS2MSD0050.

FONTE: Mitsubishi Materials U.K., 2017.

4.2. Equipamentos

O corte das placas de aço AISI D2 foi realizado em uma serra de fita Franho modelo FM 500. Para o desbaste e acabamento dos corpos de prova para o ensaio de tração, foi utilizado um torno Romi Centur 30S potência máxima de 5,5 kW e rotação máxima de 3500 rpm, com comando numérico Mach 9. Para o desbaste dos corpos de prova para o ensaio pino sobre disco e microfresamento, foi utilizado um centro de usinagem Romi modelo Discovery 560 com potência de 9,0 kW e rotação máxima de 7500 rpm, com comando numérico Siemens 810D.

Em paralelo à operação de desbaste dos corpos de prova de tração, para o ensaio pino sobre disco e microfresamento, foram realizados os ensaios de micrografia e dureza Vickers no material fornecido. Referente à micrografia, foi realizado o ataque químico com o reagente Vilella por 10 segundos e utilizado o microscópio óptico fabricado pela *Zeiss* modelo *Axio Scope. A1*. Já para o ensaio de dureza Vickers foi utilizado o durômetro universal, marca *Wolpert* modelo *D6700*.

O tratamento térmico foi realizado seguindo as recomendações do fabricante Villares e foram utilizados dois fornos Mufla, fabricante *Magnus* modelo *200F DM* com temperatura máxima até 1200°C , conforme mostrado na Figura 4.4.



FIGURA 4.4 - Fornos utilizados para realizar o tratamento térmico no aço AISI D2.

FONTE: autor, 2017.

Os equipamentos utilizados para o ensaio pino sobre disco foram uma balança de precisão *Shimadzu* modelo *AX200* e um tribômetro *Micro Photonics*, modelo *MT60*, acoplado a um computador e *software Nanovea Tribometer V1.5*. Além disso, para avaliar a trilha de desgaste do ensaio pino sobre disco e o acabamento superficial após a operação de microfresamento, foram geradas imagens tridimensionais utilizando um perfilômetro de contato *Hommelwerk* modelo *T8000*. Este equipamento possui os *softwares*, *Turbo Wave* para realizar a configuração de varredura da superfície e o controle dos componentes mecânicos do equipamento e o *Hommelmap Expert 6.2* para obtenção das imagens e análise das superfícies geradas.

Devido ao diâmetro da microfresa e a limitação de rotação de 7500 rpm do centro de usinagem, foi necessária a utilização de uma turbina pneumática para atingir a rotação e velocidade de corte recomenda pelo fabricante da microfresa. A turbina pneumática é da marca *Air Turbine* modelo 650BT40 com potência de 0.66 kW, rotação máxima de 40000 rpm e pressão de trabalho de 6.2 bar, conforme detalhado na Figura 4.5.

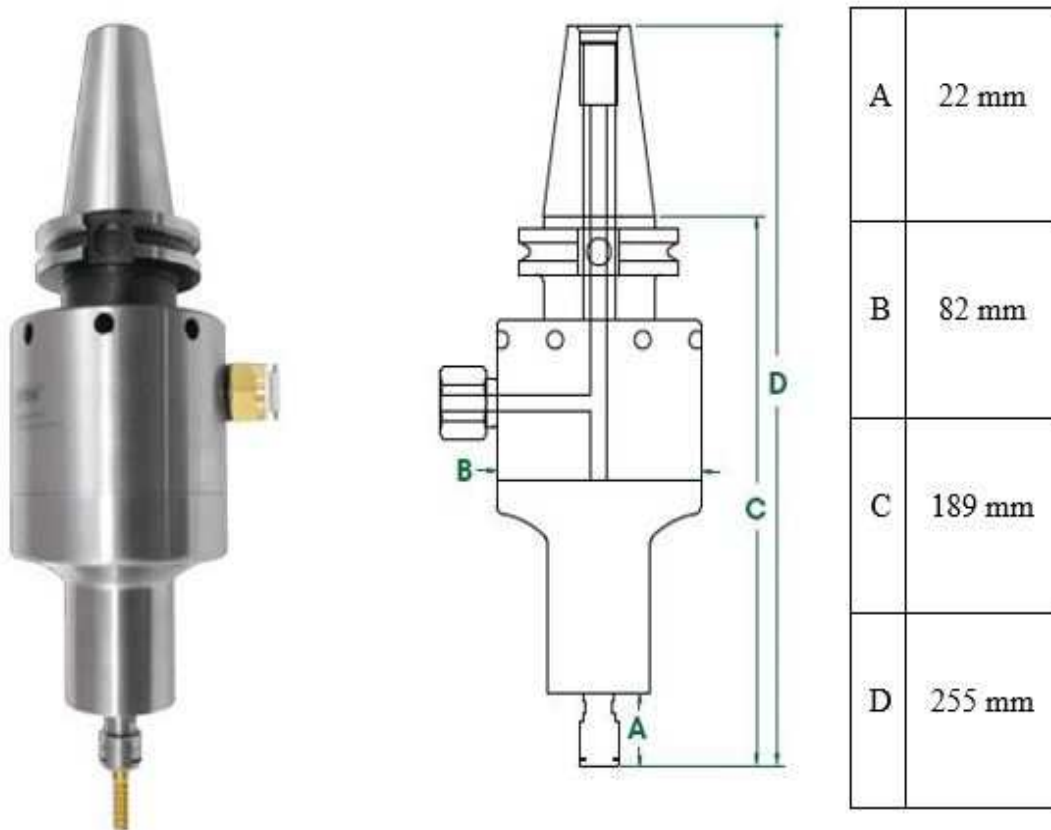


FIGURA 4.5 - Turbina pneumática Air Turbine modelo 650bt40.

FONTE: Air turbine, 2017.

Para aquisição dos sinais de força durante o microfresamento, foi utilizado o dinamômetro *Kistler* modelo 9272. Utilizou-se a placa de aquisição de dados *National Instruments USB – 6366* fabricada pela *National Instruments*, conectada a um computador equipado com *Windows XP Professional*, processador Intel i5-2500 e memória RAM de 4 gigabytes. O software utilizado para aquisição do sinal de força foi o *NI LabView SignalExpress 2013* e posteriormente os dados coletados foram exportados para o *Microsoft Excel 2007* para serem analisados no *software Matlab 2015*.

Para aquisição dos sinais de emissão acústica durante o ensaio pino sobre disco e durante o microfresamento, foi utilizado o sensor *MCWade Associate* NS3303 de 150 kHz com faixa de frequências entre 100 – 200 kHz, o pré-amplificador de sinais tipo PA 3301 com ganho de 40 dB, regulador de sinais DFF-01 e uma fonte de corrente contínua de 28 Volts tipo PS – 07. O equipamento foi conectado no mesmo computador e na mesma placa de aquisição utilizada durante o registro dos sinais de força.

Devido às impurezas presentes na superfície da microfresa e material aderido após a operação de microfresamento, foi necessário realizar uma limpeza ultrassônica a fim de não contaminar a câmara do microscópio eletrônico de varredura e obter uma visualização da região de desgaste da ferramenta. O equipamento utilizado para limpeza das microfresas foi o *Branson* modelo 1800, contendo acetona. Para a caracterização das rebarbas, cavacos, desgaste da ferramenta e desgaste no pino e trilha durante o ensaio pino sobre disco foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura *Jeol* modelo JSM-IT300 e EDS *Oxford Instruments* modelo X-Max^N.

4.3. Métodos

4.3.1 Projeto e preparação das amostras

Conforme apresentado no fluxograma da Figura 4.1, a primeira etapa do trabalho consistiu no corte das placas de aço AISI D2, nas dimensões dos corpos de prova. Este procedimento foi realizado no Laboratório de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica De Minas Gerais - PUC-MG.

Para a etapa de desbaste dos corpos de prova, foi deixado sobremetal de 500 μm para a retirada da camada de óxidos formados na superfície do material, prevista devido ao tratamento térmico. Em paralelo à etapa de desbaste dos corpos de prova, foi elaborado o projeto e a usinagem dos dispositivos para o ensaio pino sobre disco e microfresamento. A Figura 4.6 e Figura 4.7 apresentam, respectivamente, os projetos dos dispositivos para o ensaio pino sobre disco e microfresamento.

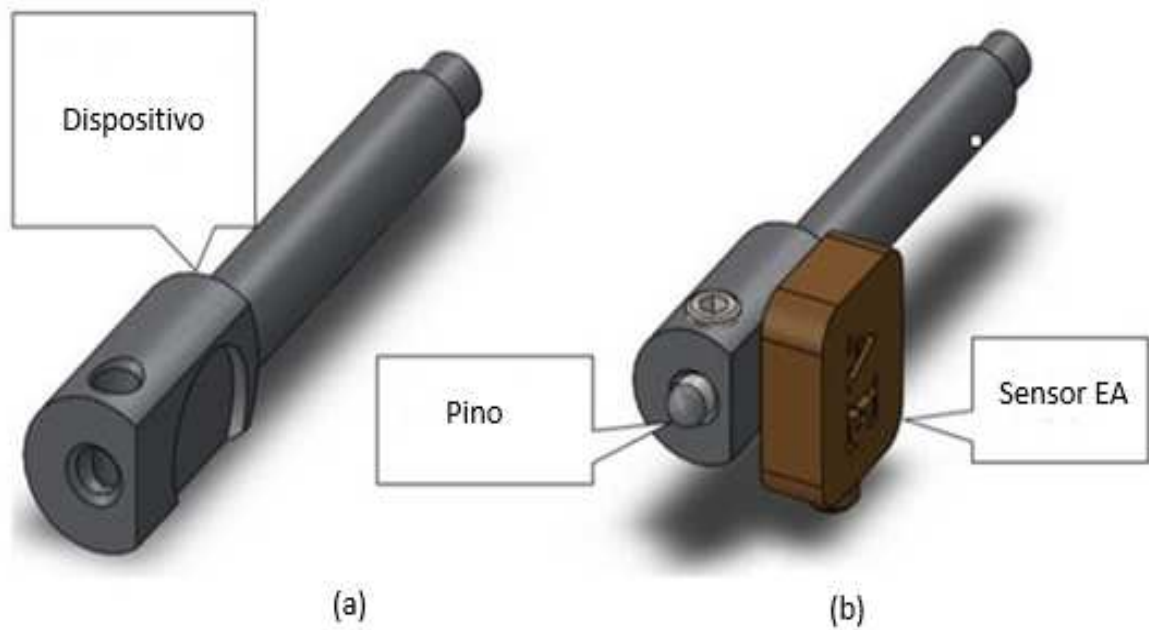


FIGURA 4.6 - (a) Dispositivo para o ensaio pino sobre disco, (b) montagem do dispositivo com o pino de metal duro revestido com TiNAl e sensor de emissão acústica.

FONTE: autor, 2017.

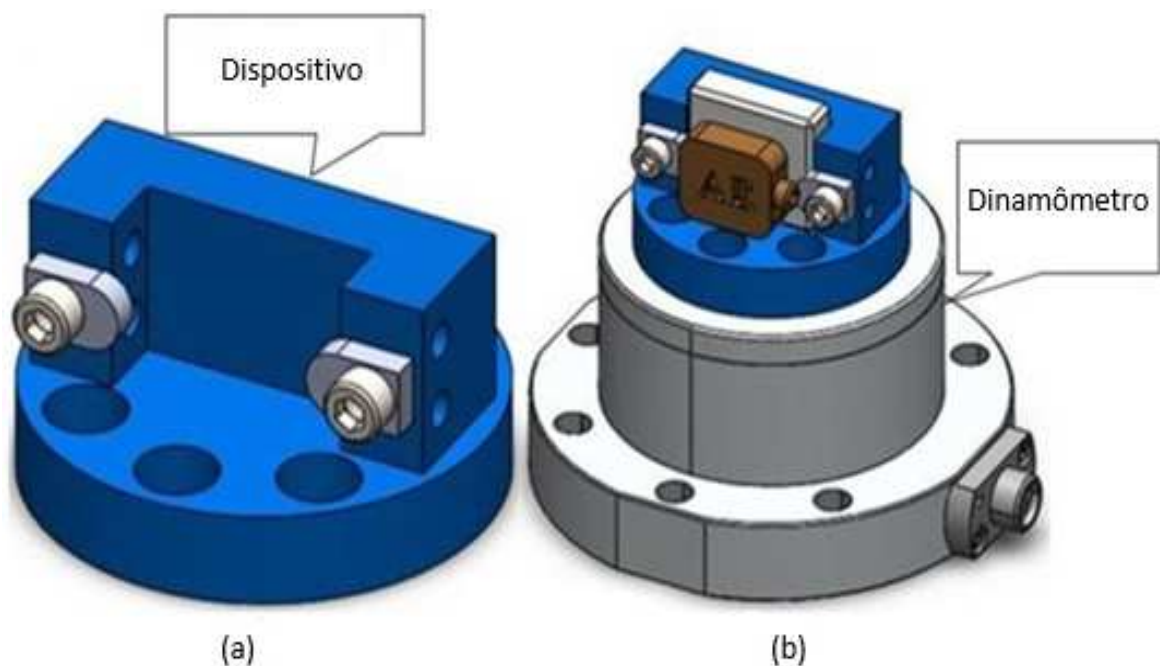


FIGURA 4.7 - (a) Desenho 3D do dispositivo projetado para o microfresamento, (b) montagem 3D com o dinamômetro, emissão acústica, dispositivo e corpo de prova.

FONTE: autor, 2017

Após a etapa de elaboração dos dispositivos, foi realizado micrografia do aço AISI D2 no estado recozido e o ensaio de dureza Vickers com carga 50 kgf em cinco pontos

diferentes nos quinze corpos de prova para o ensaio de microfresamento e nos dois corpos de prova para o ensaio pino sobre disco.

4.3.2 Tratamento térmico

O tratamento térmico consistiu de alívio de tensão, têmpera e dois revenimentos. O procedimento de tratamento térmico foi realizado no Laboratório de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC-MG seguindo os parâmetros indicados pelo fabricante Villares Metals.

Alívio de tensões: os parâmetros utilizados para o alívio de tensão após a usinagem foram temperatura de 550° C, tempo de 2 horas dentro do forno, resfriamento até a temperatura de 200° C dentro do forno e posteriormente resfriado a temperatura ambiente.

Têmpera: durante a têmpera foram realizados dois pré-aquecimentos para garantir uma homogeneidade de temperatura e minimizar distorções. Os parâmetros foram dois pré-aquecimentos, um a 650° C mantendo as amostras nesta temperatura durante 5 minutos e outro a 850° C mantendo esta temperatura por 5 minutos. Após está etapa, o forno atingiu a temperatura de 1020° C e foi mantida durante 60 minutos. Após esta etapa as amostras foram retiradas e resfriadas ao ar até a temperatura de 60° C.

Revenimento: as amostras passaram por duas etapas de revenimento após têmpera e a dureza esperada foi 57 HRC segundo a curva de revenimento, conforme apresentado na FIGURA 4.8. O procedimento foi realizado após a têmpera, apresentando uma temperatura inicial de 60° C e o forno com temperatura de 400° C, sendo mantido as amostras nesta temperatura por um tempo de 120 minutos e resfriamento ao ar até a temperatura ambiente. O segundo revenimento foi realizado mantendo a temperatura do forno em 400° C por 120 minutos e resfriamento ao ar até a temperatura ambiente.

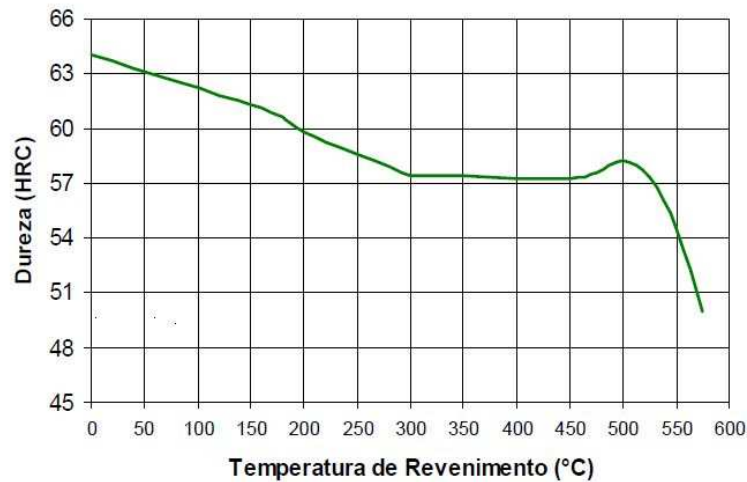


FIGURA 4.8 - Curva de revenimento do aço AISI D2.

FONTE: Villares Metals, 2017

4.3.2 Acabamento superficial

Após a etapa de tratamento térmico, as amostras foram usinadas para remoção da camada de óxido, resultante do tratamento térmico. O ensaio de dureza Vickers foi realizado com o objetivo de registrar a dureza após o tratamento térmico, sendo realizado com carga 50 kgf em cinco pontos diferentes, para cada amostra, correspondente aos quinze corpos de prova utilizado para o ensaio de microfresamento e nos dois corpos de prova para o ensaio pino sobre disco.

Com relação aos dois corpos de provas correspondentes ao ensaio de pino sobre disco, foi realizada a medição do desvio médio aritmético (R_a) da superfície usinada. Este procedimento está de acordo com a ASTM- G99-05 (2010), a qual recomenda um valor de $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$ para o ensaio. A medição do valor de R_a foi realizada no perfilômetro e verificado que a superfície usinada destinada ao ensaio pino sobre disco dos dois corpos de prova apresentaram um valor de $R_a > 0,80 \mu\text{m}$, sendo necessário o lixamento com lixas de granulometria de 280, 320, 360, 500 e 600. Após a etapa de lixamento, foi novamente verificado no perfilômetro a superfície destinada ao ensaio pino sobre disco dos dois corpos de prova e os valores de R_a da superfície de ambos os corpos de prova apresentaram valores de rugosidade inferiores a $0,8 \mu\text{m}$

4.4. Ensaio pino sobre disco

Foram realizados ensaios pino sobre disco com carga normal de 4 N, com registro da intensidade dos sinais de emissão acústica, tendo como intuito determinar o coeficiente de atrito do par tribológico pino de metal duro topo esférico revestido com TiNAl e disco de aço AISI D2 temperado e revenido. O objetivo foi determinar a mínima espessura do cavaco para os ensaios de microfresamento e observar a influência da carga normal nos mecanismos de desgaste juntamente com as frequências dominantes dos sinais de emissão acústica durante o ensaio de pino sobre disco. Para estabelecer a carga normal utilizada durante o ensaio pino sobre disco, foi levado em considerações o trabalho de SREDANOVIC et al. (2016), no qual os autores realizaram o estudo das forças de usinagem durante o microfresamento do aço AISI D2 no estado temperado e revenido. A partir disso, tomou-se como base os valores da força de avanço durante o microfresamento para determinar a carga normal de 4 N a ser utilizada durante os ensaios pino sobre disco.

O primeiro passo antes de realizar os ensaios foi o nivelamento do suporte do corpo de prova e do braço de sustentação de carga, já com o equipamento de emissão acústica montado. Após, o nivelamento do equipamento, foi realizado um pré ensaio com duração de 30 minutos com carga de 1 N para que o equipamento chegasse em sua temperatura ótima de trabalho como recomendado pelo fabricante. Além disso, antes de realizar os ensaios, os pinos e discos foram limpos com um pano umedecido com álcool etílico a fim de remover resíduos. Em seguida, os pinos e os discos foram para calcular, o volume de material antes e após os ensaios pino sobre disco.

Os ensaios foram realizados com carga normal de 4 N e rotação de 416,67 rpm, diâmetro de pista de 48 mm e tempo de duração de ensaio programado para 180 minutos. Além disso, foi utilizada uma taxa de aquisição de 60 amostras/segundo para monitorar os sinais de emissão acústica. Esta taxa foi determinada por ser próxima à taxa de aquisição de dados do tribômetro.

4.5. Microfresamento

O microfresamento de topo dos corpos de prova foi realizado sem fluido de corte, no centro de usinagem. Foi necessário fixar uma base metálica à mesa do centro de usinagem, sobre a qual foi montado o dinamômetro juntamente com o dispositivo de apoio dos corpos de prova. O sensor de emissão acústica, foi fixado na lateral da superfície do corpo de prova por meio de fita adesiva. Além disso, foi aplicado uma camada do acoplante metil *Ultrage*l 2 para preencher as depressões e melhorar a transmissão acústica na interface da superfície do corpo de prova e da superfície do sensor de emissão acústica. Após a fixação do corpo de prova no dispositivo montado no dinamômetro, foi necessário realizar o faceamento da superfície a ser microusinada conforme indicado na Figura 4.9, tendo os seguintes parâmetros: profundidade de usinagem de 100 μm , avanço de 150 mm/min e velocidade de corte de 125 m/min, utilizando uma fresa com 50 mm de diâmetro. Este procedimento foi executado para garantir que a superfície do corpo de prova estivesse perpendicular ao eixo árvore do centro de usinagem e assegurando que a profundidade de usinagem fosse constante durante o microfresamento.



FIGURA 4.9 - Faceamento da superfície do corpo de prova para o ensaio de microfresamento.

FONTE: autor, 2017

A frequência de aquisição dos dados do ensaio de força e emissão acústica foi determinada de acordo com Shaw et al. (2005), que descreve a seguinte afirmação: se todas as máquinas-ferramenta operam com algum tipo de vibração, e para não haver influência das vibrações do dinamômetro nas forças de corte registradas durante a usinagem, recomenda-se que determine uma frequência de aquisição de dados quatro vezes maior que a frequência de excitação da máquina ferramenta. Nesse sentido, para o ensaio de força e emissão acústica foi calculado o produto da rotação em segundos, pelo número de aresta da microfresa e fator quatro estabelecido por Shaw *et al.*, (2005), encontrando uma frequência de aquisição de dados de aproximadamente 5,3 kHz. Porém, para se obter o maior número de informações durante o microfresamento, neste trabalho foi estabelecida uma frequência de aquisição de 25 kHz. Além disso, também foi realizado um planejamento fatorial dos parâmetros de entrada utilizados durante os experimentos e mantendo-se a velocidade de corte constante em 62,83 m/min e variando-se a profundidade de usinagem e o avanço por dente, conforme detalhado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Parâmetros de entrada utilizados durante os teste microfresamento de topo do aço AISI D2.

| Ensaio | Velocidade de corte (m/min) | Profundidade de usinagem (μm) | Avanço por dente ($\mu\text{m}/\text{dente}$) |
|---------------|------------------------------------|--|---|
| 01 | 62,83 | 20 | 6 |
| 02 | 62,83 | 20 | 3 |
| 03 | 62,83 | 40 | 6 |
| 04 | 62,83 | 40 | 3 |

Fonte: autor, 2017.

Para as condições citadas na Figura 4.10, foi considerado o microfresamento de 43 canais por corpo de prova com comprimento de usinagem de 9 mm por canal e comprimento total de usinagem de 387 mm por corpo de prova, sendo realizado uma réplica para cada ensaio. Dos quinze corpos de prova destinados ao microfresamento, oito nesta etapa do trabalho foram utilizados. Antes de executar os testes, foi realizado o movimento dos eixos x,y e z do centro de usinagem juntamente com a turbina por cerca de 15 minutos para minimizar a influência da temperatura durante o microfresamento.

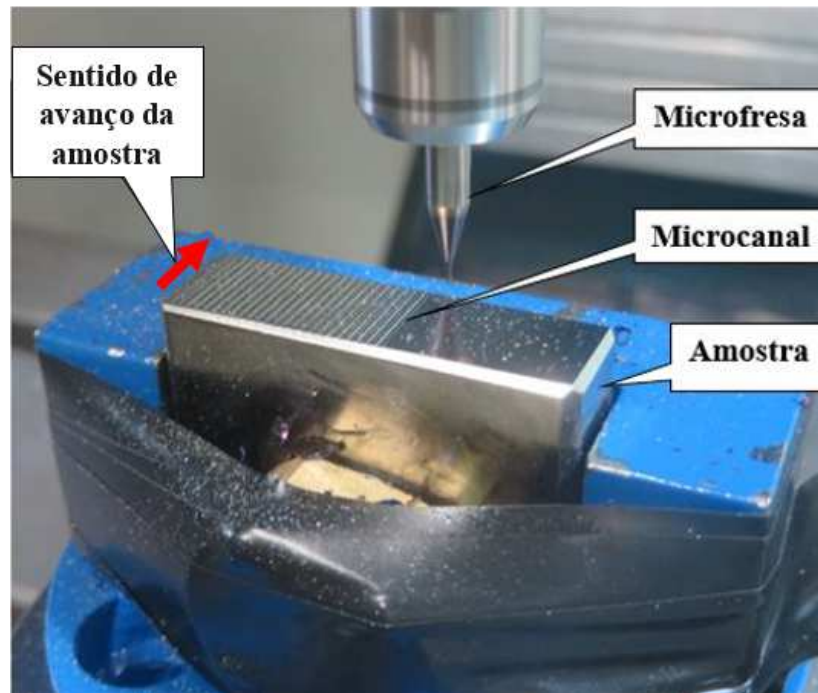


Figura 4.10 - Sentido de avanço durante o microfresamento.

Fonte: autor, 2017.

4.5.1 Desgaste da ferramenta

Para o ensaio de vida de ferramenta, realizou-se a aquisição dos sinais de força e emissão acústica utilizando as condições indicadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Parâmetros ensaio de desgaste da ferramenta.

| Velocidade de corte (m/min) | Profundidade de usinagem (μm) | Avanço por dente ($\mu\text{m}/\text{dente}$) | Penetração de trabalho (μm) |
|-----------------------------|--|---|--|
| 62,83 | 17 | 13,2 | 500 |

FONTE: autor, 2017.

Para o ensaio de desgaste da ferramenta, optou-se por dividi-lo em duas etapas: a primeira etapa consistiu no microfresamento de 129 canais com um comprimento de usinagem total de 1161 mm avaliando o desgaste da microfresa no microscópio eletrônico de varredura. Nesta fase do ensaio foram destinados três corpos de prova para o primeiro ensaio e mais três corpos de prova para a réplica. A segunda etapa consistiu em realizar o microfresamento com as microfresas da primeira etapa até a fratura da ferramenta.

4.6. Perfilômetro

O objetivo da análise por perfilometria (detalhado na Figura 4.11), foi à medição da rugosidade dos microcanais, altura e volume de rebarba.

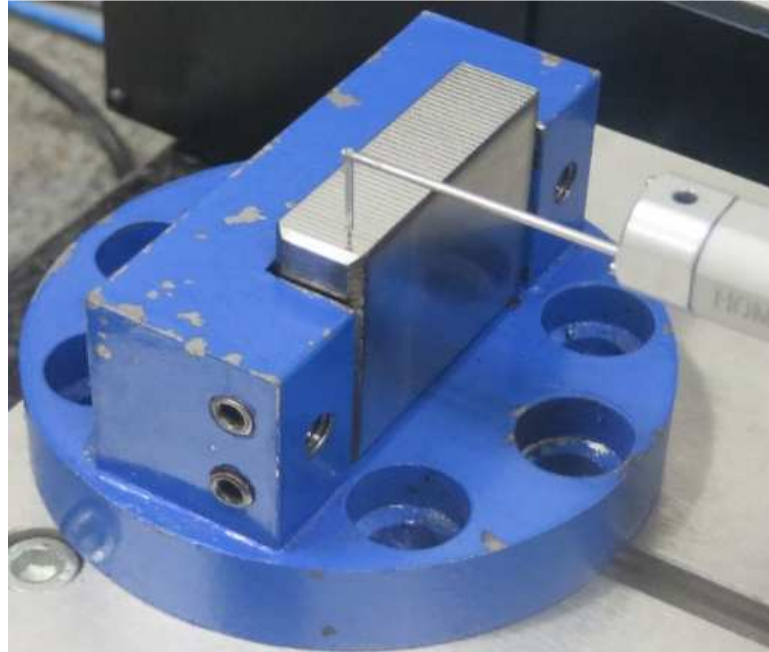


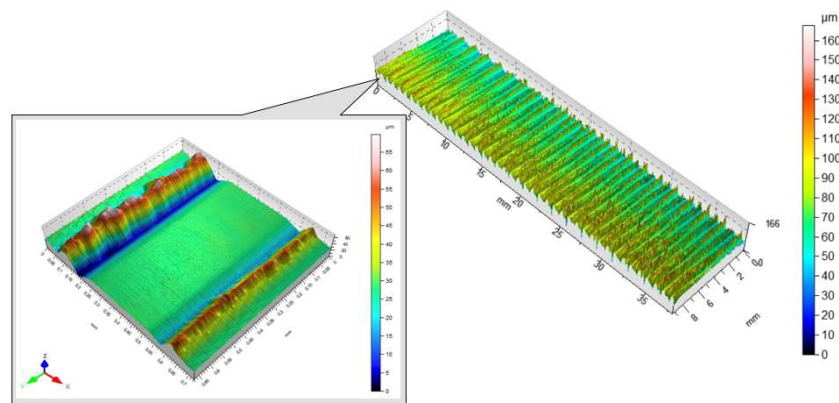
FIGURA 4.11 - Perfilometria dos canais microssinados.

FONTE: autor, 2017.

Para cada corpo de prova referente ao ensaio de microfresamento, foram realizadas varreduras na direção de avanço do ensaio de microfresamento, com os seguintes parâmetros de varredura:

- espaçamento entre cada ponto de medição de $1\mu\text{m}$;
- velocidade de varredura de 0.50 mm/s ;
- passo lateral de $12\mu\text{m}$;
- palpador TKU 300;
- *stylus* (ponta) n°231289 5/90, ângulo de ponta 90° e raio de ponta $5\mu\text{m}$;
- área de varredura $(9 \times 38)\text{ mm}^2$;

Após a varredura, foi aplicado uma metodologia no *software Hommelmap Expert 6.2* para gerar as topografias dos corpos de prova, conforme indicado na Figura 4.12, com o objetivo de determinar a rugosidade, altura e volume de rebarba.



Ampliação do canal número 2 do ensaio 3.

FIGURA 4.12 -. Topografia do corpo de prova após os ensaios de microfresamento.

FONTE: AUTOR, 2017.

A metodologia adotada foi a seguinte:

- Rugosidade: antes de realizar a medição da rugosidade dos micronais, foi necessário utilizar a ferramenta *levelling* do software *Hommelmap Expert 6.2*, para nivelar a área varrida pelo perfilômetro. Os parâmetros escolhidos para quantificação da rugosidade foram R_a , R_z , R_q , R_t .

- altura de rebarba: para análise da altura de rebarba foram traçadas cinco linhas perpendiculares à direção de varredura do perfilômetro com 38 mm de comprimento, no perfil extraído no software *Hommelmap Expert 6.2*. Após esta etapa, foi gerado o histograma de contagem de picos que representa a densidade de picos/mm², sendo os picos característicos a altura de rebarba, como indicado na Figura 4.13.

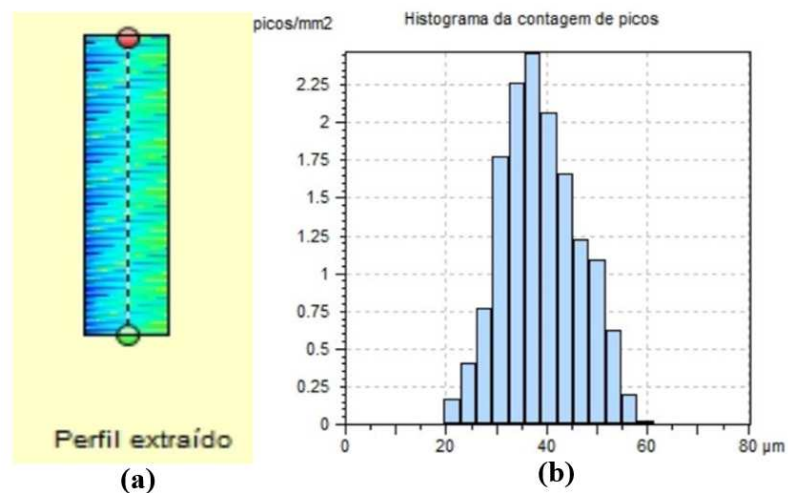


FIGURA 4.13 - (a)- Linha traçada para medir a altura de rebarba. (b) Histograma para contagem de picos.

FONTE: autor, 2017.

A altura de rebarba foi medida por meio do perfil bidimensional referente a linha do perfil extraído da topografia, como indicado na Figura 4.14. Sendo assim, considerou-se como altura de rebarba, a distância da superfície do corpo de prova e o maior pico presente ao longo da linha traçada no perfil extraído. A medida da largura de rebarba foi realizada no microscópio eletrônico de varredura.

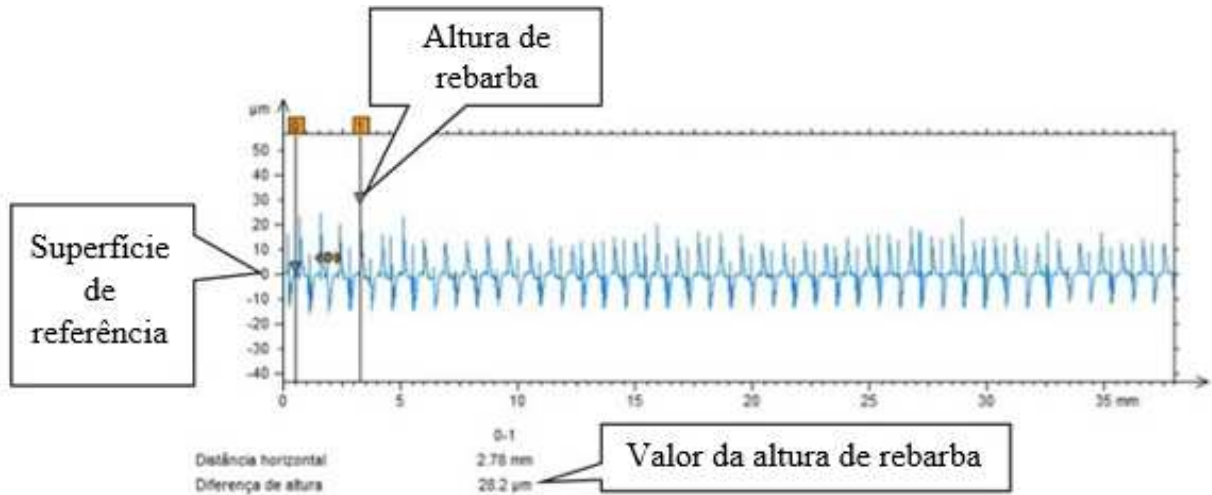


FIGURA 4.14 - Medida da altura de rebarba.

FONTE: autor, 2017.

- volume de rebarba: para o cálculo do volume de rebarba foi utilizado a curva de Abbott - Firestone, mostrada na Figura 4.15. Foi usado o parâmetro S_{pk} (altura reduzida dos picos) que se refere à altura de picos acima da superfície.

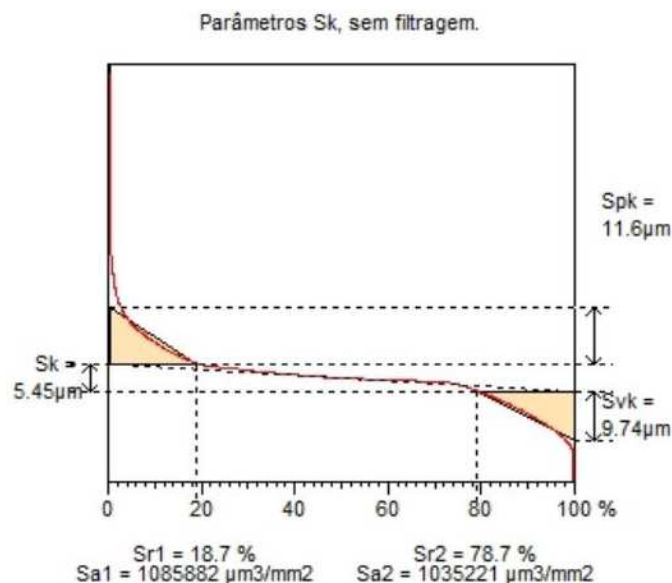


FIGURA 4.15 - Curva Abbott Firestone.

FONTE: autor, 2017.

Com o propósito de calcular o volume dos picos referentes às rebarbas, foi necessário realizar o corte da superfície, isto é, retirar os picos correspondentes à rugosidade da superfície. Desta forma, eliminou-se a rugosidade da superfície de referência e os vales referentes aos canais microfresados e com a separação dos picos da superfície de referência e dos vales provenientes do microfresamento, realizou-se o cálculo do volume de rebarba utilizando a ferramenta *Volume of hole/peak*, conforme mostrado na Figura 4.16.

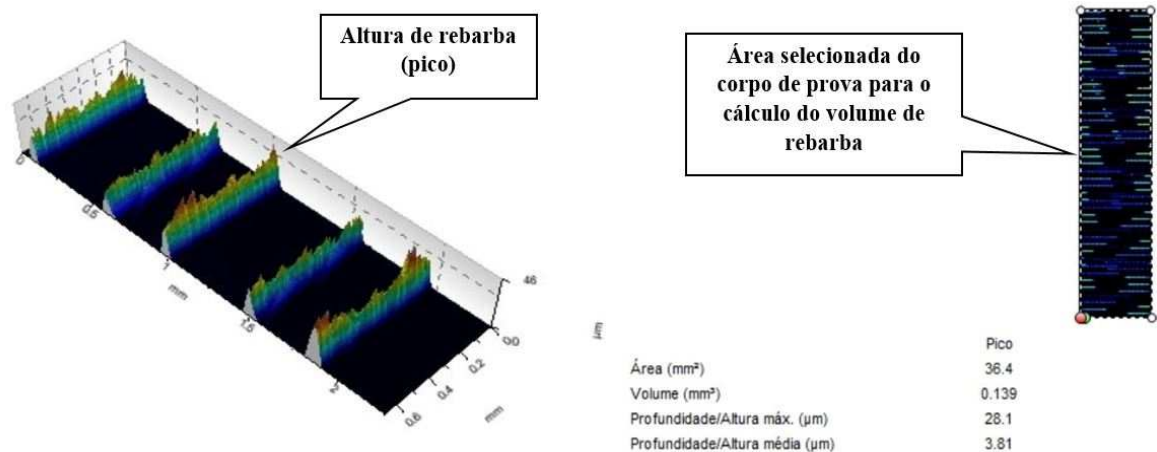


FIGURA 4.16 - Área do corpo de prova selecionada para o cálculo do volume de rebarba.

FONTE: autor, 2017.

4.7 Aquisição de dados

4.7.1 Força

Durante o microfresamento foi realizada a aquisição dos sinais de força na direção da força de avanço - F_y , força de apoio - F_x e na direção da força passiva - F_p . Foi necessária a calibração estática do dinamômetro, devido à ausência do amplificador do dinamômetro e gerando equações lineares para poder determinar a força durante o microfresamento. O dinamômetro foi conectado diretamente à placa de aquisição de dados como indicado Figura 4.17 e calibrado com cargas de 1, 2, 3, 4, 5 e 10 N.



FIGURA 4.17 - Aquisição de dados dos sinais de força e emissão acústica.

FONTE: autor, 2017.

A taxa de aquisição foi de 25 kHz e passou um filtro *Butterworth*. Essa frequência foi extraída da máquina durante seu funcionamento, porém sem a realização do ensaio de microfresamento e tentou-se minimizar os efeitos das frequências da máquina nas frequências do dinamômetro e os dados coletados exportados para planilha do *Excel 2007* para serem analisados no *software Matlab 2015*.

4.7.2 Emissão acústica

O sensor de emissão acústica foi conectado diretamente ao corpo de prova a ser microssinado. Na interface da superfície do corpo de prova e do sensor de emissão acústica, foi aplicado uma camada do acoplante metil *Ultragel 2* para homogeneizar a superfície e evitar a penetração de ar durante o ensaio, no qual é responsável pela alteração da velocidade de propagação da onda de som. Necessitou-se passar um filtro *Butterworth* passa baixa com *cutoff* 1.3kHz. Essa frequência foi extraída da máquina durante seu funcionamento, porém sem a realização do microfresamento e tentou-se minimizar os efeitos das frequências da máquina nas frequências do microfresamento. A taxa de aquisição de dados foi de 25 kHz e os dados coletados foram exportados para planilha do *Excel 2007*, para a realização da transformada de densidade espectral de energia (*Power Spectrum Density – PSD*) no *software Matlab 2015*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão foram fundamentados nos ensaios realizados e na revisão bibliográfica e serão apresentados neste capítulo, na seguinte ordem: caracterização do aço AISI D2 no estado temperado e revenido, análise tribológica do ensaio pino sobre disco e resultados referentes as forças de usinagem, emissão acústica, rugosidade e formação de rebarba. Além disso, serão apresentados também os resultados referentes aos sinais de força e emissão acústica correlacionando com o desgaste das microfresas utilizadas durante os ensaios de microfresamento.

5.1. Caracterização do aço AISI D2 temperado e revenido

A caracterização do aço AISI D2 temperado e revenido consistiu na análise metalográfica do material e a realização dos ensaios de tração e dureza, como detalhado na Figura 5.1.

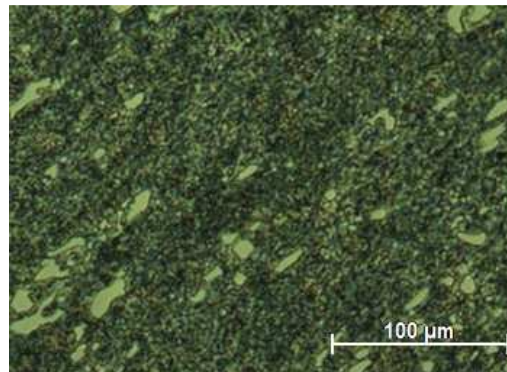


FIGURA 5.1 - Microestrutura do aço ferramenta AISI D2 temperado e revenido com dureza de 620 HV (57 ± 1 HRC).

FONTE: autor, 2017.

Os resultados dos ensaios de tração foram realizados para quatro corpos de provas e os resultados obtidos estão detalhados na Figura 5.2, e foi constatado que o aço AISI D2 temperado e revenido utilizados neste trabalho tem um comportamento frágil com limite de resistência de $64 \text{ kN} \pm 1$.

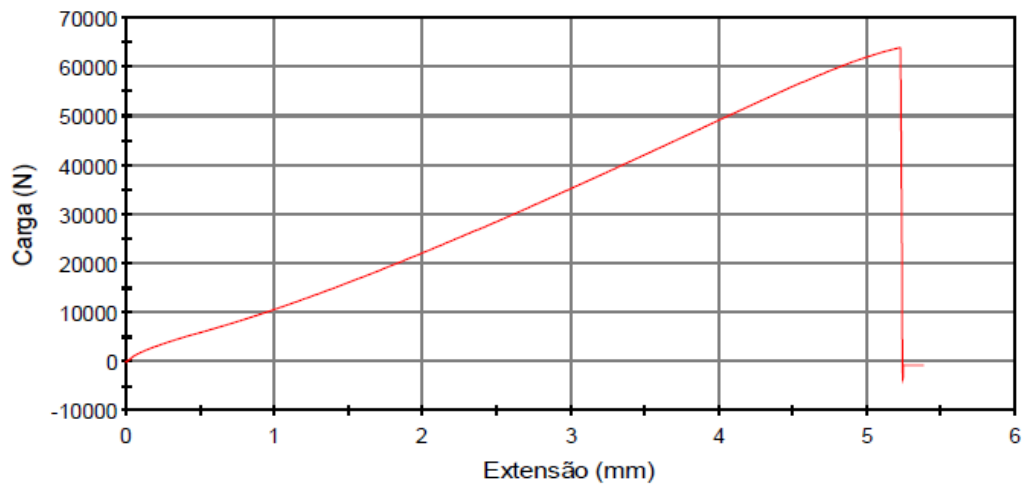


FIGURA 5.2 - Ensaio de tração

FONTE: autor, 2017.

5.2. Ensaio de pino sobre disco

Os ensaios de desgaste por deslizamento foram realizados para o par tribológico pino de metal duro de topo esférico revestido com TiNAl e aço AISI D2 temperado e revenido com carga normal de 4 N e velocidade de deslizamento de 62,8 m/min. Dessa forma, a velocidade de deslizamento adotada nos ensaios pino sobre disco foi equivalente à velocidade de corte utilizada durante os ensaios de microfresamento. A Figura 5.3 apresenta o comportamento do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento percorrida.

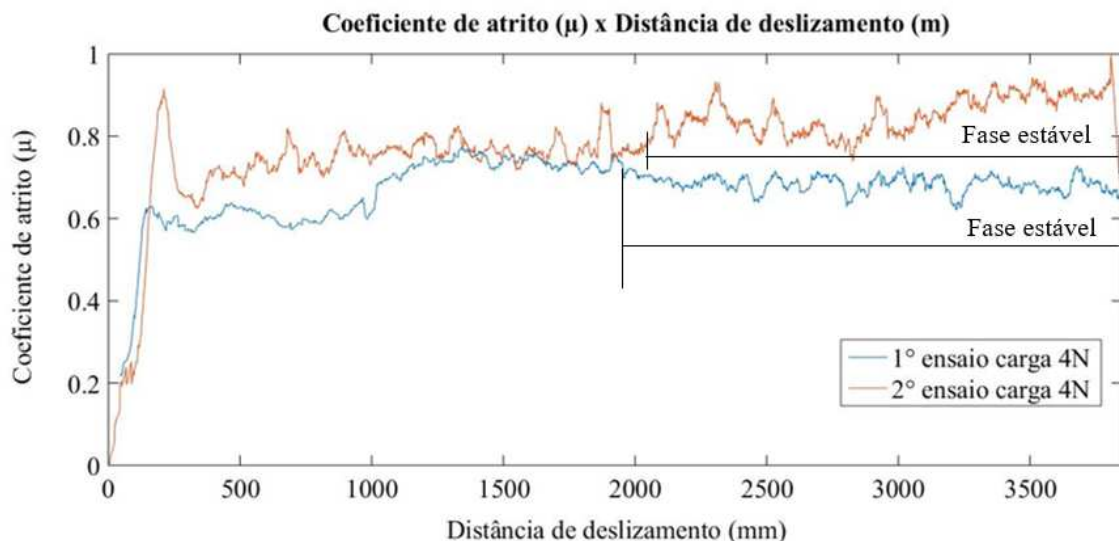


FIGURA 5.3 - Coeficiente de atrito versus distância de deslizamento para a carga de 4 N e velocidade de deslizamento de 62,80 m/min.

FONTE: autor, 2017.

Observa-se que o coeficiente de atrito, apresentou valores médios de 0,65 e 0,85 $\pm 0,05$ respectivamente coletados na fase estável. A diferença entre os valores do coeficiente de atrito possivelmente poderia estar relacionada com a temperatura ambiente onde foram realizados os experimentos. Desse modo, os ensaios foram executados a temperatura ambiente, porém em horários diferentes durante o mesmo dia de trabalho e a possível variação da temperatura ao longo do dia pode ter influenciado o período de *run in* e a fase estável da curva dos ensaios. Nesse sentido, o primeiro ensaio pode ter ocorrido em temperaturas maiores de cisalhamento das junções devido à curva conter valores de coeficiente de atritos inferiores em relação a réplica. Segundo BLAU *et al.*, (2009), a curva de comportamento do atrito é dividida entre *run in* e estágio estacionário (fase estável). Sendo assim, quando duas superfícies estão em contato, sob carga e movimento, mudanças nas superfícies podem ocorrer e são detectáveis pelo comportamento do coeficiente de atrito e por alterações nos valores de rugosidade entre a condição inicial (*run in*) até a forma de estágio estacionário, quando atinge a conformidade geométrica e mantém um nível de coeficiente de atrito médio relativamente constante. Portanto, a coleta do coeficiente de atrito médio foi realizada na fase estável. A Tabela 5.1 detalha a taxa de desgaste do par tribológico dos ensaios pino sobre disco, conforme recomendado pela norma ASTM- G99-05 (2010).

Tabela 5.1- Taxa de desgaste para o corpo de prova e pino.

| Ensaio | | Rugosidade Ra (μm) | Distância de deslizamento (mm) | Varição de massa (g) | Volume de desgaste (mm^3) | Volume desgaste total (mm^3) | Taxa de desgaste (mm^3/s) | Taxa de desgaste total (mm^3/s) |
|-----------|----------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---|---|---|
| 1º ensaio | Corpo de prova | 0,082 | 3850 | $7,60 \times 10^{-3}$ | $9,69 \times 10^{-1}$ | 1,03 | $5,27 \times 10^{-6}$ | $5,61 \times 10^{-6}$ |
| | Pino | 0,088 | | $7,80 \times 10^{-4}$ | $6,24 \times 10^{-2}$ | | $3,40 \times 10^{-7}$ | |
| 2º ensaio | Corpo de prova | 0,070 | 3850 | $6,50 \times 10^{-3}$ | $8,29 \times 10^{-1}$ | 0,89 | $4,48 \times 10^{-6}$ | $4,82 \times 10^{-6}$ |
| | Pino | 0,092 | | $8,20 \times 10^{-4}$ | $5,60 \times 10^{-2}$ | | $3,05 \times 10^{-7}$ | |

FONTE: autor, 2017.

5.1.1 Análise do desgaste dos pinos após ensaio tribológico

As imagens obtidas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Energia Dispersiva da região de desgaste dos pinos revestidos com TiNAl podem ser observadas Figura 5.4 e Figura 5.5 referentes ao primeiro ensaio e ao segundo ensaio.

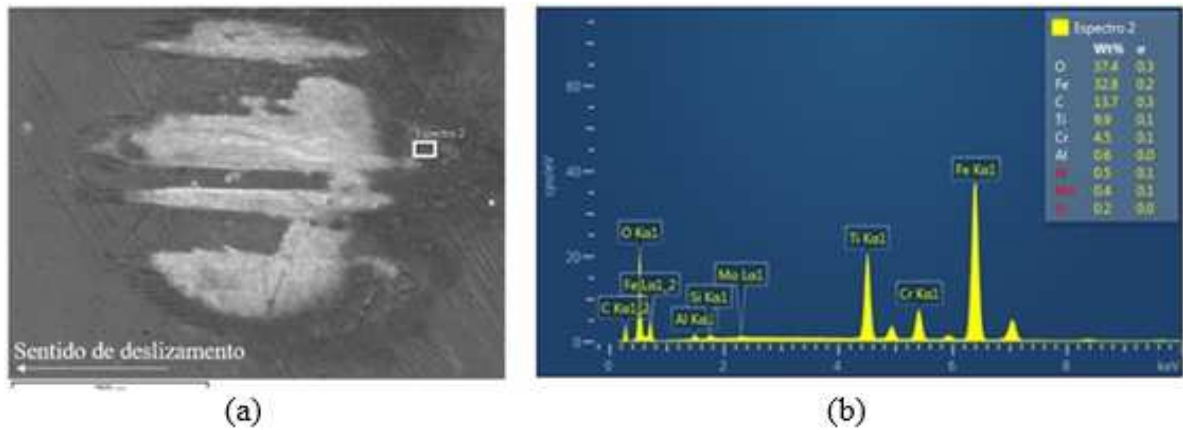


FIGURA 5.4 - Imagens referentes a análise por meio do MEV/EDS. (a) imagem do topo esférico do pino referente ao primeiro ensaio. (b) gráfico referente a análise por EDS.

FONTE: autor, 2017.

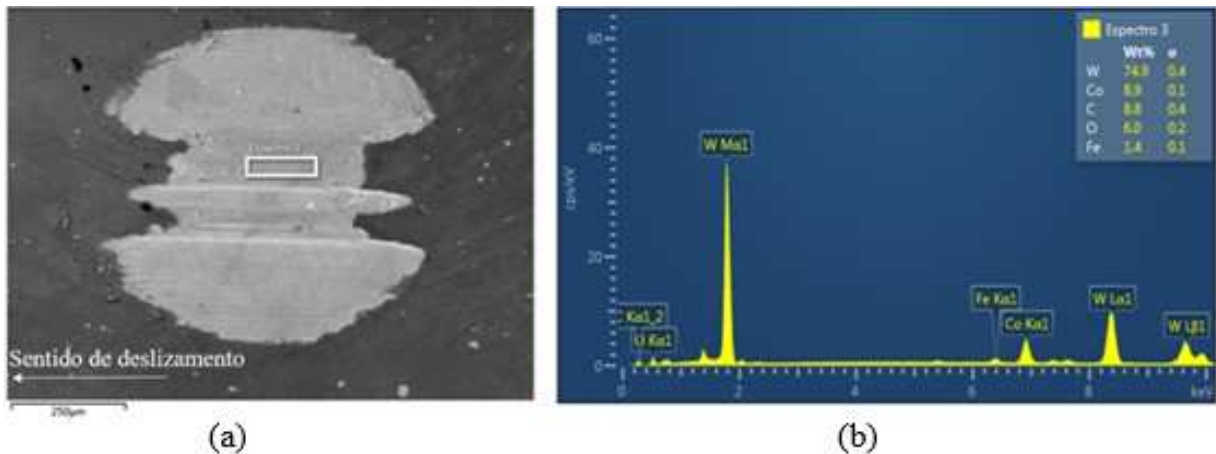


FIGURA 5.5 - Imagens referentes a análise por meio do MEV/EDS. (a) imagem do topo esférico do pino referente ao segundo ensaio. (b) gráfico referente a análise por EDS.

FONTE: autor, 2017.

As Figuras 5.4 (a) 5.4 (b) mostram, respectivamente, a região e o gráfico resultante da análise por meio de MEV e EDS do pino de metal duro revestido com TiNAl. Pelo gráfico de EDS da Figura 5.4 (a) e 5.4 (b) foi possível verificar a presença dos elementos químicos oxigênio, ferro, carbono, titânio, cromo e alumínio na superfície do pino. Os

elementos químicos titânio e alumínio são pertencentes ao revestimento de TiNAl, já os elementos químicos carbono e cromo são pertencente a matriz do aço AISI D2 e os elementos químicos ferro e oxigênio são possivelmente originados de óxido de ferro formado durante o ensaio de deslizamento. Nesse sentido, quando ocorre a quebra da junção entre a superfície do pino e o material AISI D2 a partícula do aço desliza entre a região de contato do pino com a superfície do disco, ocasionando a compressão da partícula do AISI D2 pelo pino na superfície do disco resultando em marcas de cisalhamento na superfície de deslizamento. De acordo com SINGH et al. (2015), os óxido de ferro formados durante o ensaio de deslizamento atuam como um filme lubrificante com baixa tensão de cisalhamento reduzindo o atrito entre a superfície do pino e a superfície de deslizamento do disco.

As Figuras 5.5 (a) e 5.5 (b) são resultante da análise por MEV e EDS, e respectivamente mostram o desgaste do revestimento de TiNAl que foi totalmente removido da região de contato do pino com o disco. A remoção do revestimento pode ser atribuída à aderência do aço AISI D2 no pino e pelo desgaste abrasivo a dois e três corpos devido à presença de partículas duras de carboneto de cromo entre a interface da superfície do pino com a superfície de deslizamento do disco. Além disso, foi realizado perfilometria por contato dos pinos de metal duro revestido com TiNAl com objetivo de quantificar a profundidade do desgaste no topo esférico dos pinos. A Figura 5.6 detalha a varredura da região do topo esférico dos pinos e a Figura 5.7 apresenta os perfis bidimensionais da região de desgaste dos pinos.

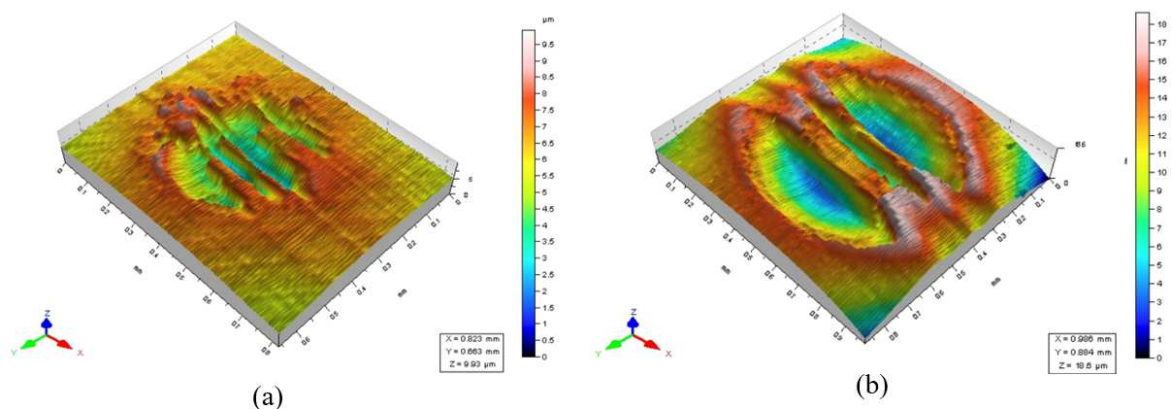


FIGURA 5.6 - Perfilometria dos pinos de metal duro revestidos com TiNAl. (a) primeiro ensaio. (b) segundo ensaio.

FONTE: autor, 2017.

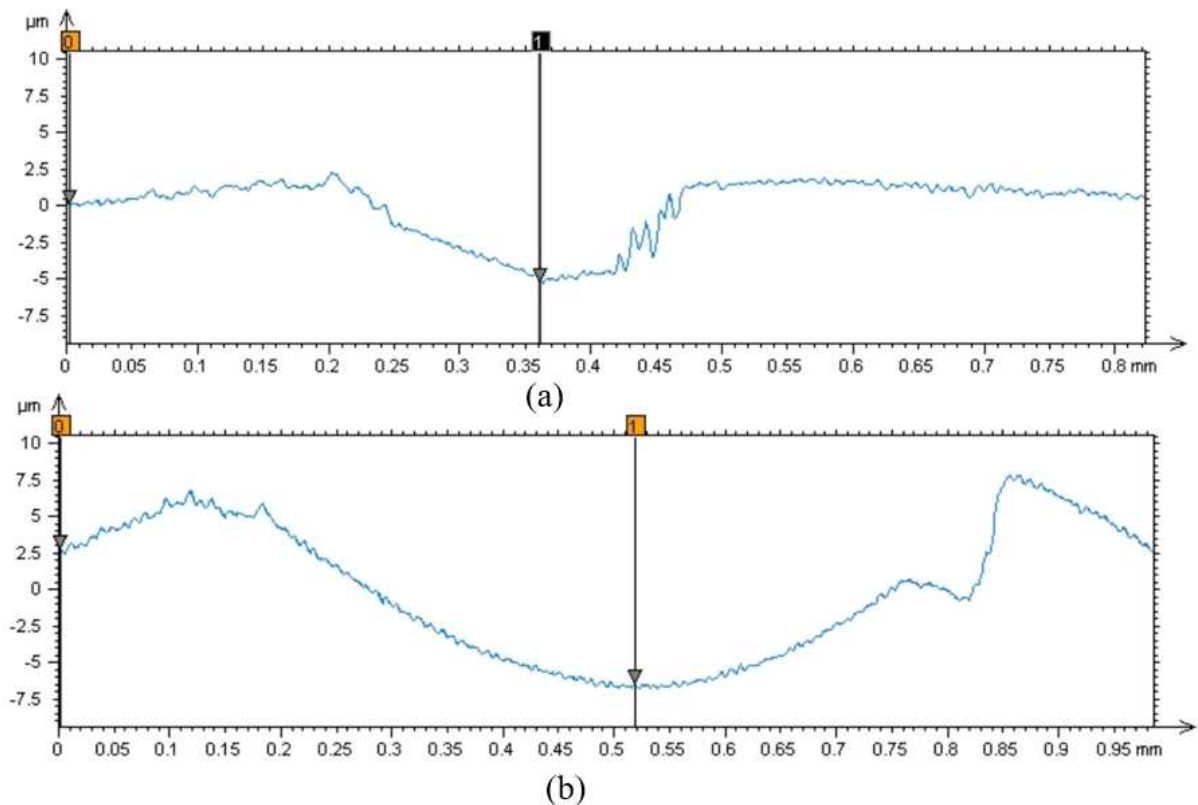


FIGURA 5.7 - Perfil 2d do topo esféricos dos pinos revestido com TiNAl. (a) pino referente ao primeiro ensaio com profundidade de desgaste de 5.41 μm . (b) pino referente ao segundo ensaio com profundidade de desgaste de 9.29 μm .

FONTE: autor, 2017.

O pino referente ao primeiro ensaio apresentou profundidade de desgaste de 5.41 μm e o pino do segundo ensaio apresentou profundidade de desgaste 9.29 μm . A maior profundidade de desgaste do pino do segundo ensaio pode estar relacionado com o coeficiente de atrito na interface do pino com a superfície de deslizamento e possivelmente também com a menor temperatura durante o segundo ensaio, evidenciando a menor formação do óxido de ferro que atua como lubrificante, que favoreceu o mecanismo de desgaste por abrasão na interface. Para avaliar, as suposições da menor formação de óxidos de ferro durante o segundo ensaio de deslizamento, foi realizado o mapeamento químico dos *debris* formados durante os ensaios. Pelas Figuras 5.8 (a) e 5.8 (b) nota-se visualmente pelas cores dos elementos químicos oxigênio, ferro e cromo que no primeiro ensaio Figura 5.8 (a) maior presença dos elementos químicos oxigênio e ferro em relação a Figura 5.8 (b) que sugere uma maior formação de óxido de ferro durante o primeiro ensaio.

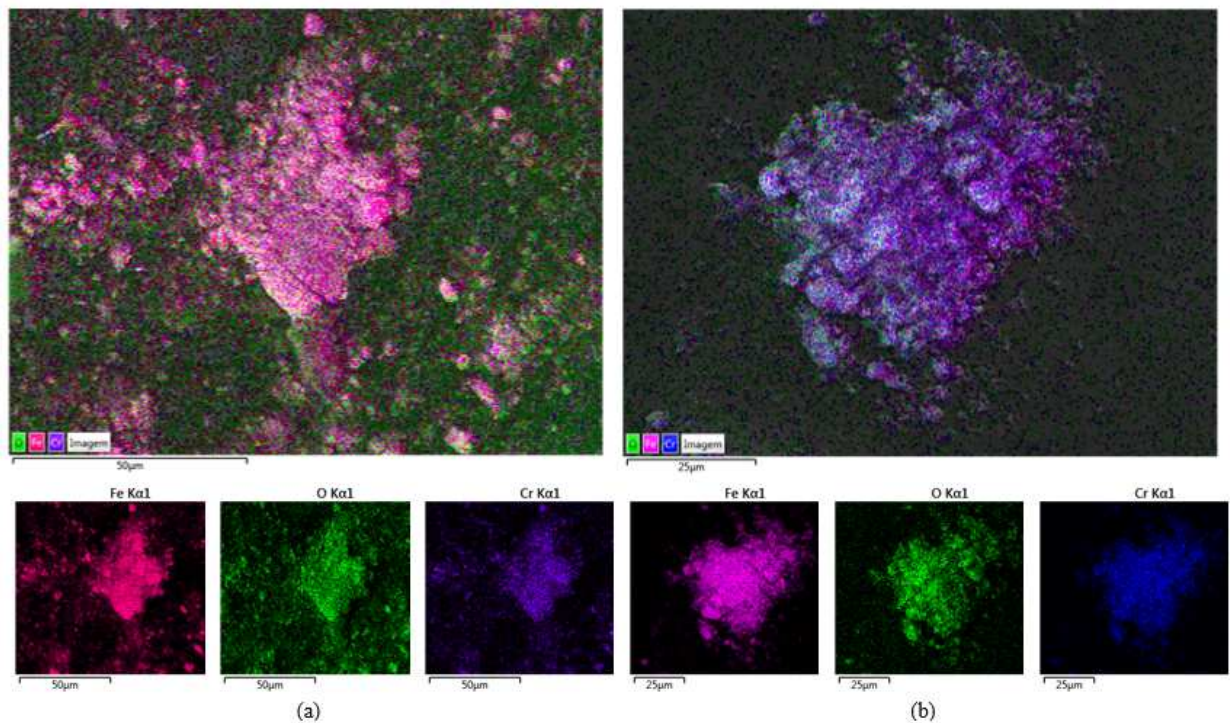


FIGURA 5.8 - Mapeamento químico por meio de EDS dos debris formados durante os ensaios de deslizamento. (a) mapeamento químico dos debris formados durante o primeiro ensaio. (b) mapeamento químico dos debris formados durante o segundo ensaio.

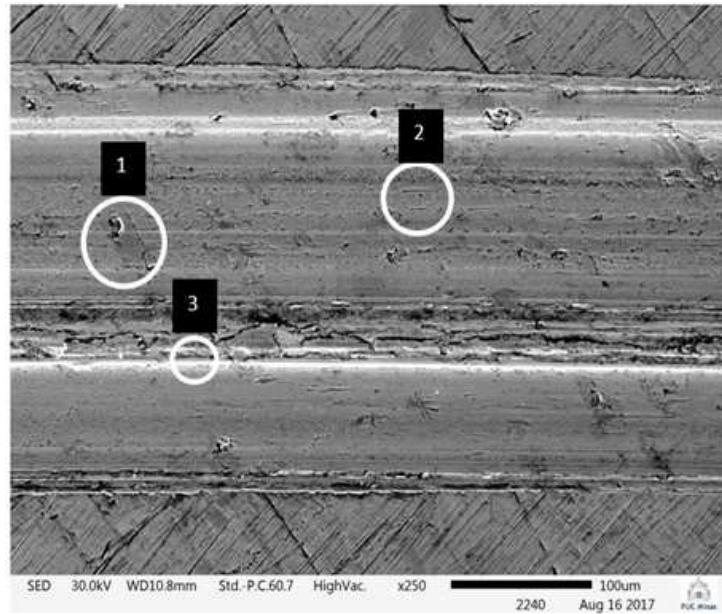
FONTE: autor, 2017.

Para verificar o mecanismo de desgaste por abrasão a três corpos, foram realizadas as análises por MEV e EDS da trilha de desgaste. As Figuras 5.9 (a) e 5.9 (b) detalham, a trilha de desgaste formada no disco após o ensaio de pino sobre disco, sendo destacados os pontos 1, 2, e 3 que sugerem, respectivamente:

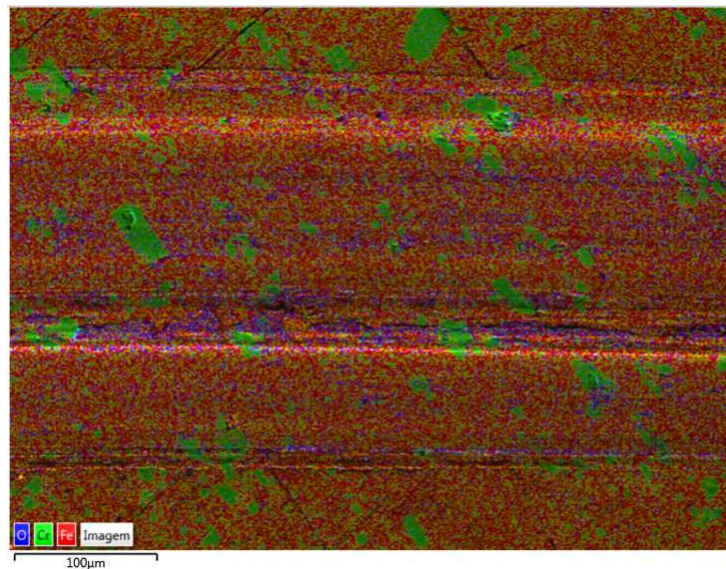
1. trinca na superfície de deslizamento sugerindo a remoção do carboneto de cromo. segundo TANG et al. (2013), a trinca podem iniciar devido à elevada dureza da superfície do aço AISI D2, que resulta na remoção da partícula ao redor da trinca por meio de delaminação na forma de partículas metálicas.

2. marcas de cisalhamento na superfície de deslizamento do disco resultantes do mecanismo de abrasão a três corpos. Os riscos são devidos à compressão das partículas encruadas do aço AISI D2 pelo pino contra a superfície de deslizamento, resultando na remoção do material por cisalhamento.

3. sulcamento devido o retorno elástico e a deformação plástica do material indicando o desgaste do pino por abrasão.



(a)



(b)

FIGURA 5.9 - Análise da trilha de desgaste resultante do primeiro ensaio de deslizamento. (a) imagem do mev. (b) EDS.

FONTE: autor, 2017.

O perfil da trilha de desgaste registrado pela varredura no perfilômetro, destacado na Figura 5.10, permite quantificar a profundidade da trilha formada pelo ensaio, elucidando uma possível deformação plástica lateral da superfície.

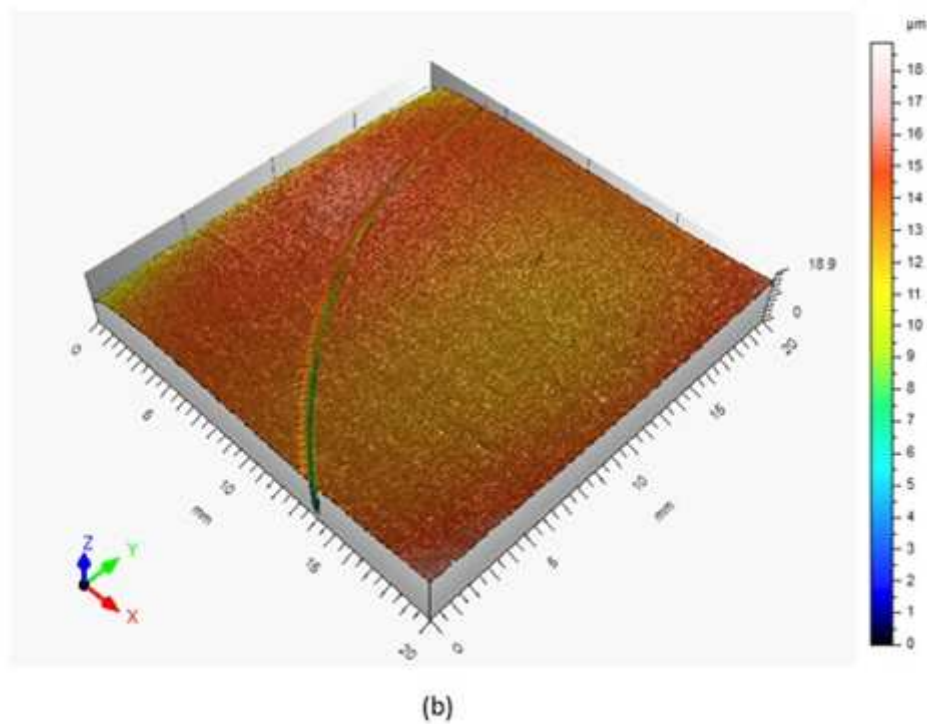
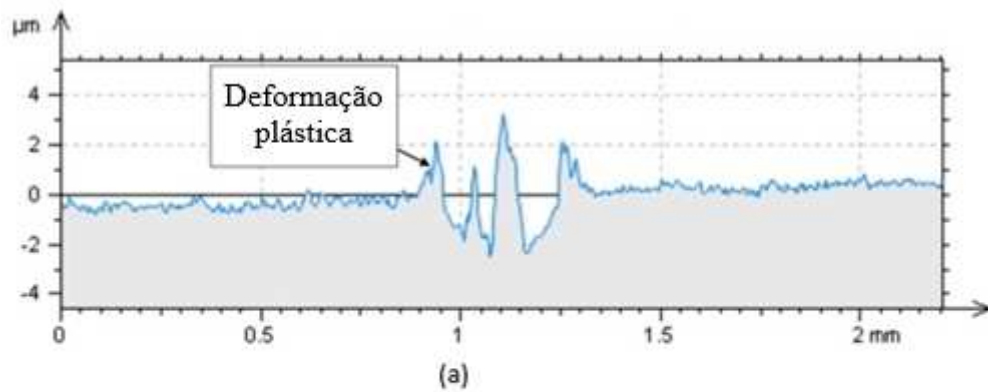


FIGURA 5.10 - (a) Perfil da trilha de desgaste realizada no perfilômetro por contato do ensaio 1. (b) Região de varredura no perfilômetro do ensaio 1

FONTE: autor, 2017.

5.1.2 Emissão acústica

Os resultados de emissão acústica foram processados por meio da função PSD para relacionar as frequências dominantes com os fenômenos que ocorrem durante o ensaio de pino sobre disco. Os resultados são apresentados nas Figura 5.11 (a) e 5.11 (b) e com a transformada de PSD nas faixas de frequências dominantes durante a fase estável dos ensaios, que foram da ordem de 100 e 200 kHz.

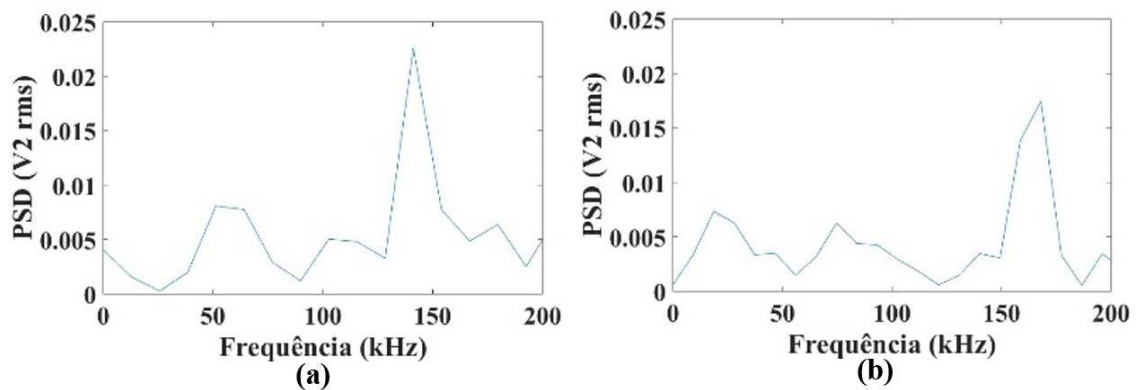


FIGURA 5.11 - Densidade espectral dos sinais de emissão acústica para os ensaios de deslizamento: (a) ensaio 1 e (b) ensaio 2.

FONTE: autor, 2017.

Segundo VICTOR et al. (2007), as faixas de frequências dominantes do desgaste por abrasão encontram-se entre 150 a 200 kHz. Durante os ensaios de pino sobre disco verificou-se o mecanismo de deformação plástica evidenciando o efeito de sulcamento do material que, conseqüentemente, desgasta os pinos e a superfície de deslizamento por abrasão. Notou-se picos de menor amplitude também entre a faixa de frequência de 50 a 100 kHz, que sugere aderência e arrastamento do material.

5.2 Ensaios de microfresamento

Antes de iniciar os ensaios de microfresamento, realizou-se a medição do raio de aresta da microfresa por meio do MEV e foi registrado um valor aproximado de $2,94 \mu\text{m}$. A mínima espessura do cavaco foi calculada pelo modelo proposto por SON et al. (2005), adotando um coeficiente de atrito médio de 0,75 e foi obtido um valor de aproximadamente $0,32 \mu\text{m}$ para a mínima espessura do cavaco conforme Eq. (3.1). Este procedimento foi realizado para minimizar o efeito de sulcamento do material durante os ensaios de microfresamento.

5.2.1 Forças de microfresamento

O comprimento de usinagem para cada canal microfresado foi estipulado em 9 mm. Como, cada corpo de prova possuía 43 canais, o comprimento de usinagem total foi de 387 mm. A partir disso, foi realizada a análise das forças estáticas nas direções das forças de

avanço, apoio e passiva em relação ao comprimento usinado, conforme a Figura 5.12. Observou-se que, à medida em que a ferramenta percorria um maior comprimento de usinagem, ocorreu um desgaste progressivo das microfresas que consequentemente afetaram a intensidade dos sinais de forças devido as mudanças na geometria das arestas de corte.

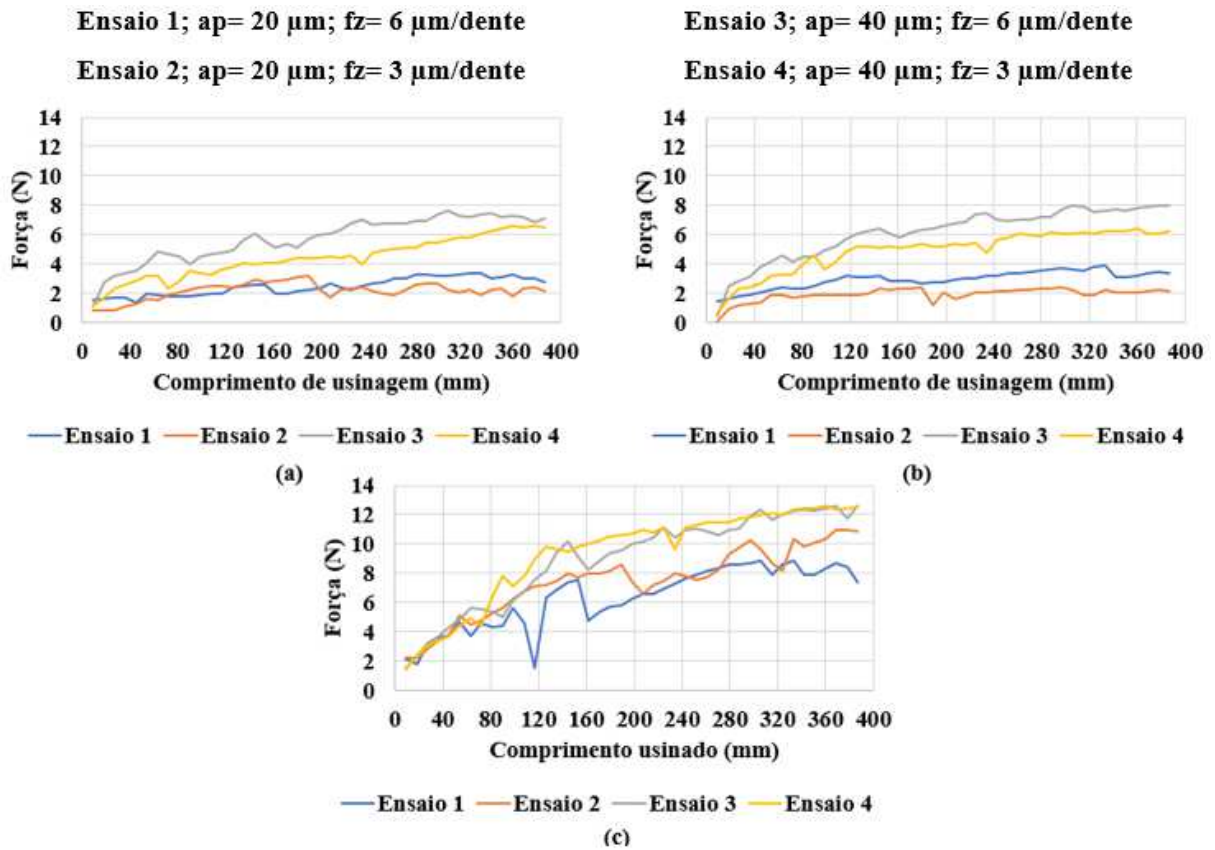


FIGURA 5.12 - Forças de microfresamento em função do comprimento usinado. (a) força de avanço, (b) força de apoio e (c) força passiva.

FONTE: autor, 2017.

Para verificar a influência do desgaste da ferramenta durante os ensaios de microfresamento, foram selecionados os canais de número 2 e 42 dos ensaios 1, 2, 3 e 4 com objetivo de avaliar o comportamento das forças estáticas para o início e fim de cada experimento. Para todos os ensaios, notou-se a tendência ao aumento das forças de usinagem na medida em que a ferramenta percorria um maior comprimento de usinagem provavelmente devido ao desgaste das arestas de corte. Desta forma, quando comparado a ferramenta ainda na condição nova, (canal 2) à ferramenta desgastada (canal 42), percebeu-se um crescimento progressivo da força passiva, evidenciando que o efeito de sulcamento do material é cada vez mais predominante ao longo dos ensaios em relação ao efeito de cisalhamento do material.

Além disso, foi analisado a influência dos parâmetros de entrada como profundidade de usinagem e avanço por dente sobre as forças de usinagem no início e fim dos ensaios realizados e pelos resultados obtidos, notou-se que para a profundidade de usinagem de 40 μm e avanço por dente de 6 μm , foram registrados os valores mais elevados das forças de avanço e apoio que, conseqüentemente, aceleraram o desgaste das arestas de corte e para comprovar essa tendência foram gerados os gráficos mostrados nas Figuras 5.13 e 5.14.

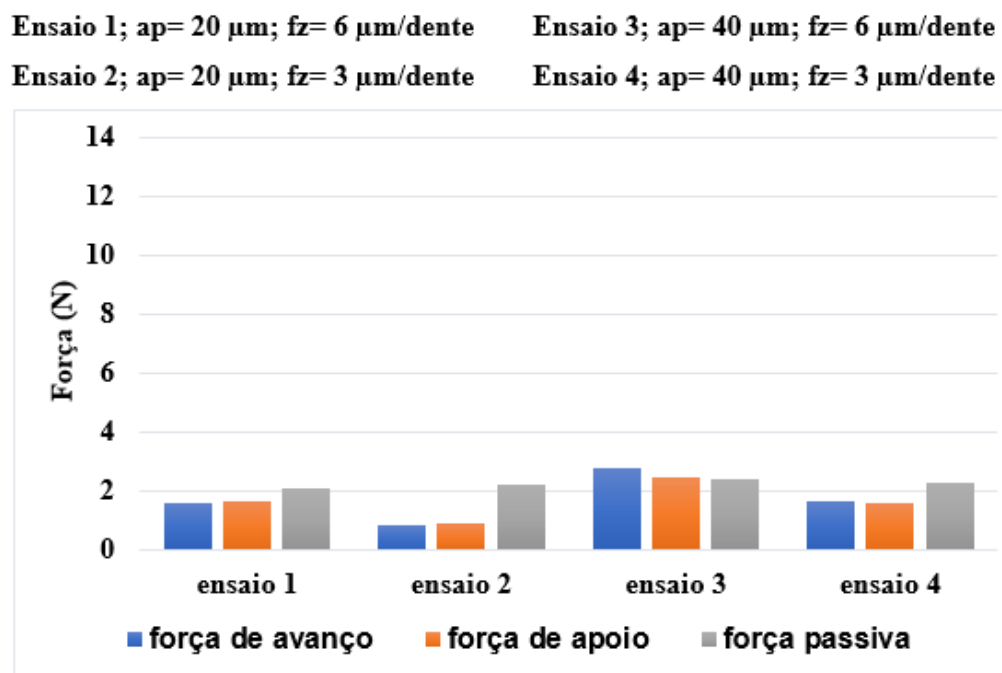


FIGURA 5.13 - Média das forças estáticas da microfresa na condição de início de vida referente ao canal 2.

FONTE: autor, 2017.

Para o canal 2, quando a ferramenta ainda estava na condição de início de vida (Figura 5.13), a magnitude das forças de usinagem apresentou valores entre 0 e 3 N e quando comparado o ensaio 1 com ensaio 2 com a mesma profundidade de usinagem (20 μm), notou-se que para maiores valores de avanço por dente (6 μm) resultaram em um aumento das forças de avanço e apoio. Quando comparado o ensaio 2 com o ensaio 4, as forças de avanço e apoio são mais elevadas para a condição com maior valor de profundidade de usinagem devido à maior remoção de material.

A Figura 5.14 detalha os resultados das forças de usinagem para o canal 42. Foi possível verificar que a magnitude das forças de usinagem apresentou valores entre 0 e 13 N e notou-se também que a força passiva apresentou um aumento significativo em relação à

ferramenta nova, fato esse verificado pela perda de material nas arestas de corte, ocorrendo um ângulo efetivo de saída mais negativo e um maior raio de aresta e de ponta que favorecem o efeito de sulcamento do material. Devido a mudança na razão entre o avanço por dente e o raio de aresta da ferramenta, a espessura do cavaco não deformado tornou-se maior em relação ao raio de aresta da ferramenta, resultando no sulcamento do material. O desgaste da ferramenta também criou uma área de contato maior que impôs maior resistência ao cisalhamento do material.

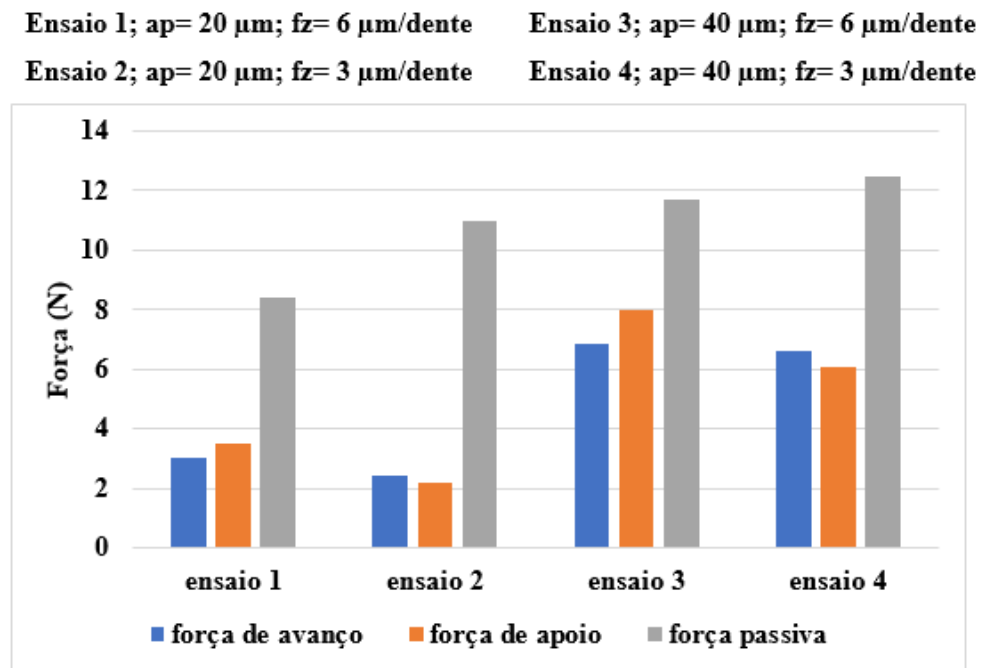


FIGURA 5.14 - Média das forças estáticas da microfresa na condição desgastada referente ao canal 42.

FONTE: autor, 2017.

Deste modo, verificou-se que tanto a profundidade de usinagem quanto o avanço por dente influenciaram no valor da força passiva, contudo, o parâmetro de maior relevância foi o avanço por dente, fato verificado pela relação entre o avanço por dente e o raio de aresta da ferramenta que influenciou a passagem do modo sulcamento para o modo de usinagem do material. O fenômeno de sulcamento do material causou o aumento da força específica de corte, especialmente na direção da força passiva. Logo, a força passiva elevou-se pela diminuição do avanço por dente, pois esta diminuiu as áreas de cisalhamento primário e secundário devido a menor deformação plástica do cavaco, levando a um menor volume de material removido por cisalhamento e a um fluxo maior de material que não se transformou em cavaco, que fluiu lateralmente na parede do canal.

5.2.2 Emissão acústica

Os sinais de emissão acústica foram processados por meio da função PSD para análise e identificação das faixas de frequências excitadoras dos mecanismos de cisalhamento, desgaste abrasivo e de aderência de material na aresta de corte da ferramenta. Foram avaliados e comparados os sinais de emissão acústica para as microfresas na condição de início de vida e desgastada para os ensaios 1, 2, 3 e 4. As Figura s5.15 (a) 5.15(b) mostra os sinais de PSD da ferramenta no início de vida e na condição desgastada para o ensaio 1, respectivamente.

Ensaio 1: $a_p = 20 \mu\text{m}$; $f_z = 6 \mu\text{m/dente}$

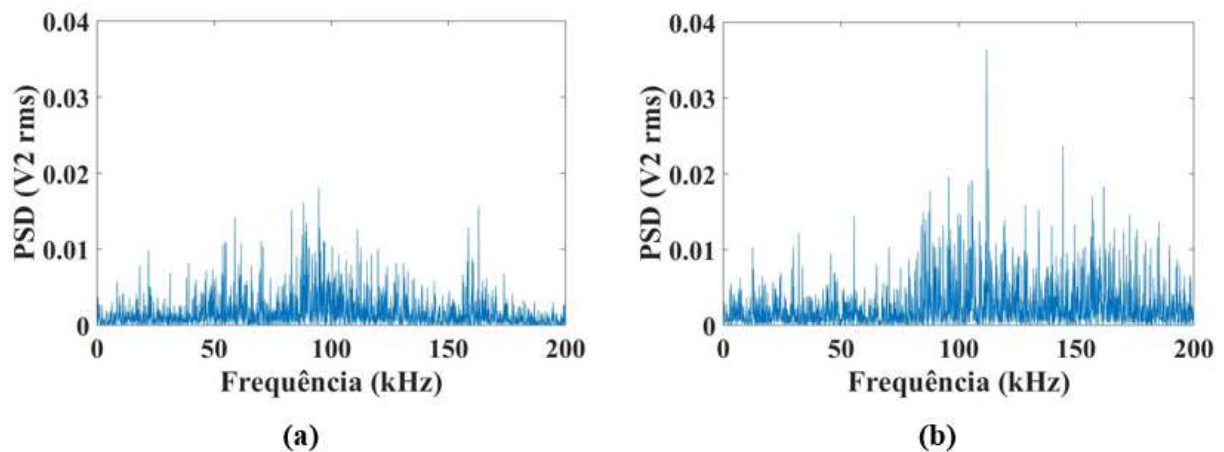


FIGURA 5.15 - Sinais de emissão acústica. (a) microfresa início de vida. (b) microfresa condição desgastada.

FONTE: autor, 2017.

Segundo MARINESCU et al. (2008) os sinais de emissão acústica de excitação da usinagem encontra-se na faixa de 70 a 115 kHz e comparando as Figuras 5.15 (a) e 5.15(b), foi possível notar que os sinais de PSD da ferramenta no início de vida e na condição desgastada situam-se na faixa de excitação de usinagem, porém na condição desgastada os sinais de PSD apresentaram maiores amplitudes em relação a ferramenta no início de vida. FERRER et al. (2010) afirmaram que a faixa de frequência responsável pelos mecanismos de aderência e arrastamento de material está entre 25 a 110 kHz, o que justificou as maiores amplitudes na faixa de 25 a 110 kHz para a ferramenta na condição desgastada, pois durante o microfresamento, houve aderência do aço nas arestas de corte da ferramenta, que exigiu uma maior quantidade de energia para remover o cavaco por cisalhamento. Já para as frequências na faixa de 150 a 200 kHz, VICTOR et al. (2007) afirmaram que acontece o mecanismo de deformação plástica, fato esse que indica que na ferramenta na condição desgastada ocorreu

maior efeito de sulcamento do material devido ao desgaste por abrasão das arestas de corte da ferramenta.

Para o ensaio 2, mostrado na Figura 5.16, quando comparada a ferramenta no início de vida e na condição desgastada, nota-se que na condição desgastada houve maior densidade de picos na faixa de frequência de 150 a 200 kHz e menor densidade na faixa de excitação dos sinais de usinagem correspondentes de 70 a 115 kHz, sugerindo maior deformação plástica e abrasão devido ao efeito do sulcamento. Além disso, quando comparados os sinais de PSD do ensaio 2 com ensaio 1, constatou-se que o ensaio 2 apresentou maior valor de amplitude de sinal PSD indicando a influência da razão entre o avanço por dente e o raio de aresta da ferramenta. Já que para o ensaio com menor avanço por dente foi necessária maior quantidade de energia para remover o cavaco por cisalhamento sugerindo o efeito de sulcamento do material.

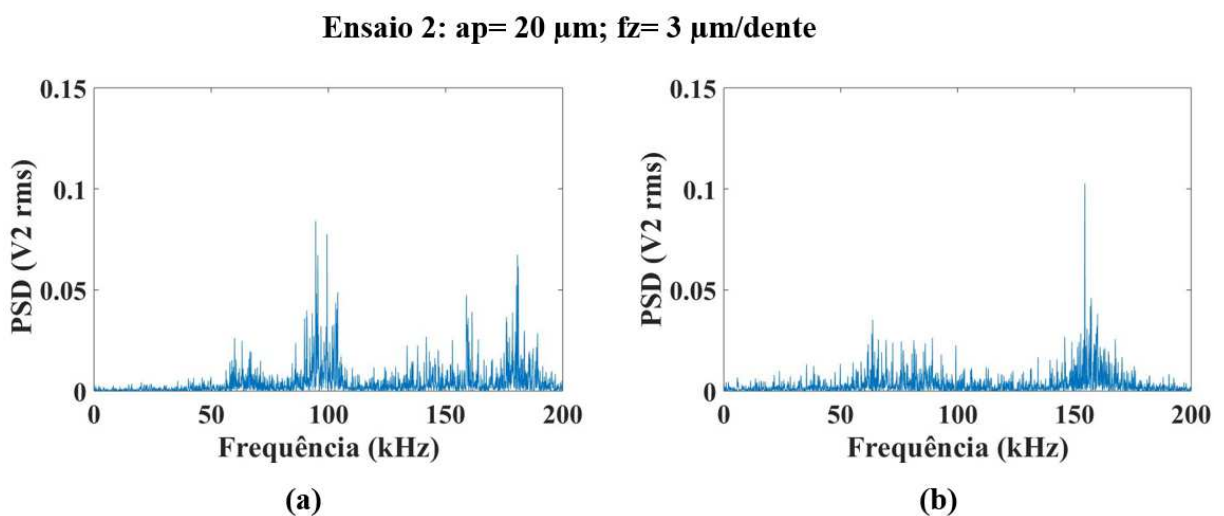


FIGURA 5.16 -. Sinais de emissão acústica. (a) microfresa início de vida e (b) microfresa condição desgastada.

FONTE: autor, 2017.

A Figura 5.17 detalha os resultados referentes ao ensaio 3 e nota-se uma tendência de quando comparado com os ensaios 1 e 2 em que a condição de fim de vida da ferramenta os sinais de emissão acústica foram mais intensos que os sinais em início de vida. Além disso, a amplitude dos sinais PSD no ensaio 3 foi maior em relação aos ensaios 1 e 2 devido a maior profundidade de usinagem e avanço por dente.

Ensaio 3: $ap= 40 \mu\text{m}$; $fz= 6 \mu\text{m/dente}$

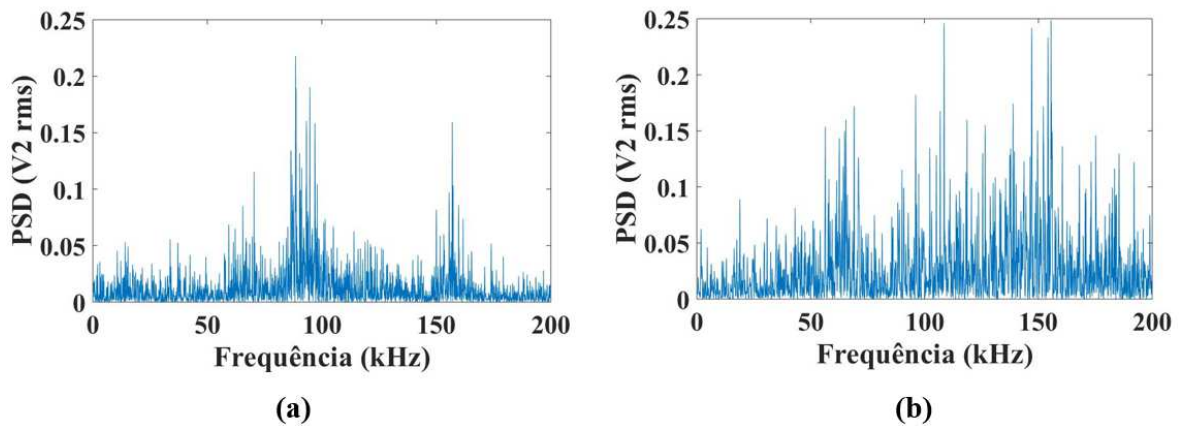


FIGURA 5.17 - Ensaio 3 sinais de emissão acústica. (a) microfresa início de vida. (b) microfresa condição desgastada.

FONTE: autor, 2017.

O ensaio 4, apresentado na Figura 5.18, registrou uma maior intensidade de sinais PSD de emissão acústica quando comparado aos demais. A justificativa está relacionada com a profundidade de usinagem e o avanço por dente. Na condição da ferramenta no final de vida nota-se uma maior amplitude de sinais PSD na faixa de 150 a 200 kHz que caracterizou a deformação plástica e o retorno elástico do material e nesta condição, tem-se o ângulo de saída efetivo mais negativo, elucidando o efeito de sulcamento.

Ensaio 4: $ap= 40 \mu\text{m}$; $fz= 3 \mu\text{m/dente}$

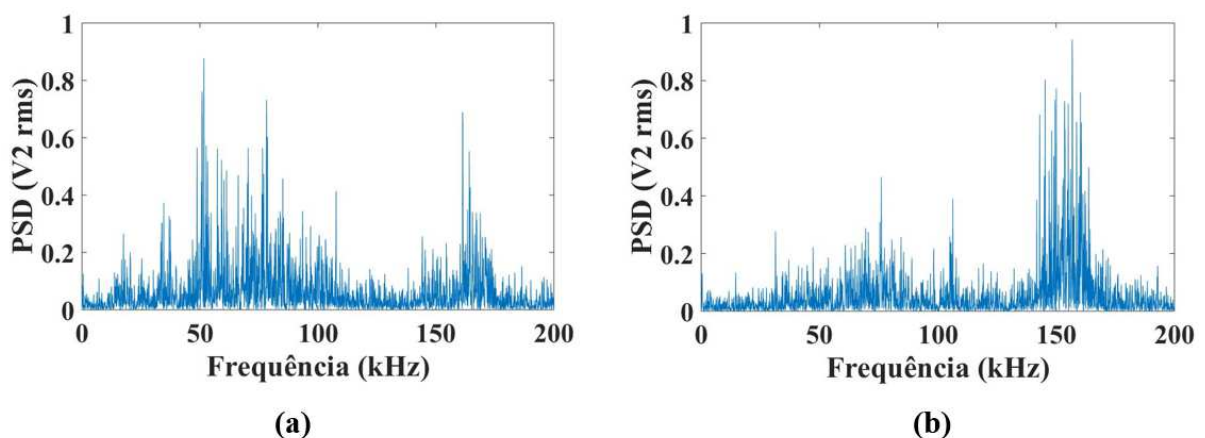


FIGURA 5.18 - Sinais de emissão acústica. (a) microfresa início de vida. (b) microfresa condição desgastada.

FONTE: autor, 2017.

Portanto, quando se comparou os sinais de emissão acústica PSD para a ferramenta no início de vida com a ferramenta desgastada, notou-se que os sinais foram mais intensos para a ferramenta desgastada, sugerindo que o revestimento de TiNAl foi removido por aderência e

abrasão, ocasionado mudanças na interface ferramenta peça. Com a remoção do revestimento de TiNAl o substrato de metal duro entrou em contato com o aço AISI D2, aumentando o coeficiente de atrito na interface ferramenta-peça devido a maior área de contato e, além disso, com a remoção do revestimento da aresta de corte ocorreu a mudança do raio de aresta da ferramenta, tornando o ângulo de saída efetivo mais negativo e caracterizando o efeito de sulcamento do material.

5.2.3 Rugosidade

Para cada ensaio foram realizadas cinco varreduras com o perfilômetro nos canais microfresados de números 2, 12, 22, 32 e 42 para obter a média dos valores de rugosidade no sentido de avanço da microfresa. Foram avaliados os parâmetros R_a , R_t , R_z e R_q , apresentados na Figura 5.19.

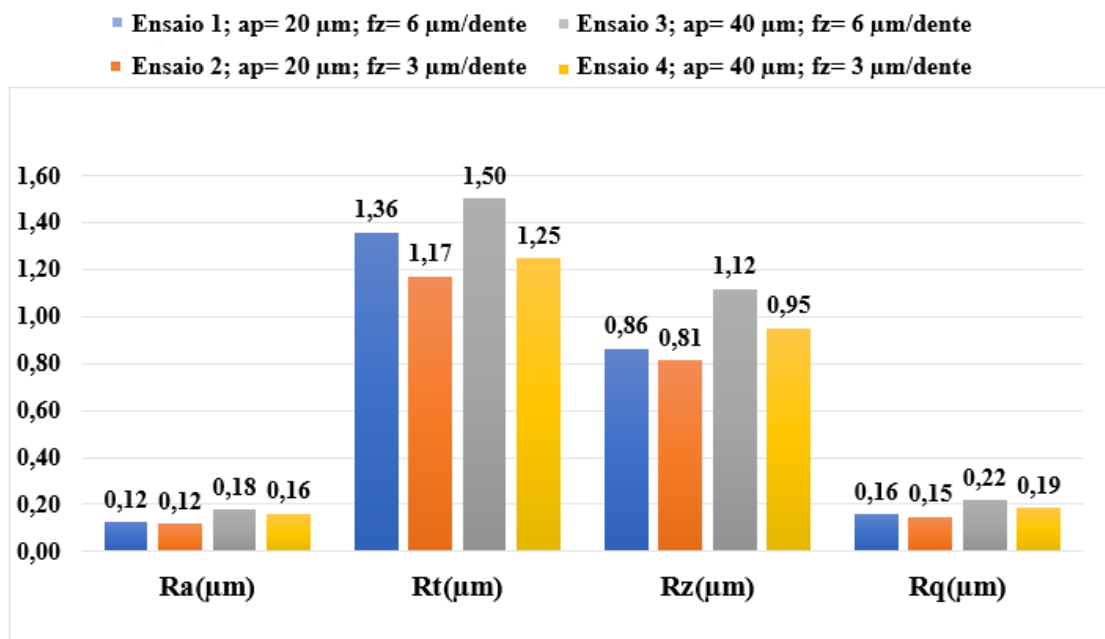


FIGURA 5.19 - Valores de rugosidade R_a , R_t , R_z e R_q obtidos para os ensaios 1, 2, 3 e 4.

FONTE: autor, 2017.

Notou-se pela Figura 5.19 que os menores valores de rugosidade R_a , R_t , R_z e R_q registrados durante o microfresamento do aço AISI D2 temperado e revenido foram referentes aos menores valores de avanço por dente e profundidade de usinagem, que correspondem ao ensaio 2 ($a_p=20\ \mu\text{m}$; $f_z=3\ \mu\text{m/dente}$) e os maiores valores de rugosidade foram encontrados para o ensaio 3 ($a_p=40\ \mu\text{m}$ e $f_z=6\ \mu\text{m/dente}$). Com o aumento do avanço por dente e da

profundidade de usinagem ocorreu elevação das forças de usinagem que afetaram a qualidade superficial, proveniente ao desgaste progressivo das arestas de corte que alteram o raio de aresta e de ponta da ferramenta. A fim de verificar este comportamento foram selecionados o canal 2 (18 mm de comprimento usinado) e o canal 42 (378 mm de comprimento usinado) e detalhados os perfis de rugosidade na Figura 5.20.

Ensaio 1; $ap= 20 \mu\text{m}$; $fz= 6 \mu\text{m/dente}$ **Ensaio 3; $ap= 40 \mu\text{m}$; $fz= 6 \mu\text{m/dente}$**

Ensaio 2; $ap= 20 \mu\text{m}$; $fz= 3 \mu\text{m/dente}$ **Ensaio 4; $ap= 40 \mu\text{m}$; $fz= 3 \mu\text{m/dente}$**

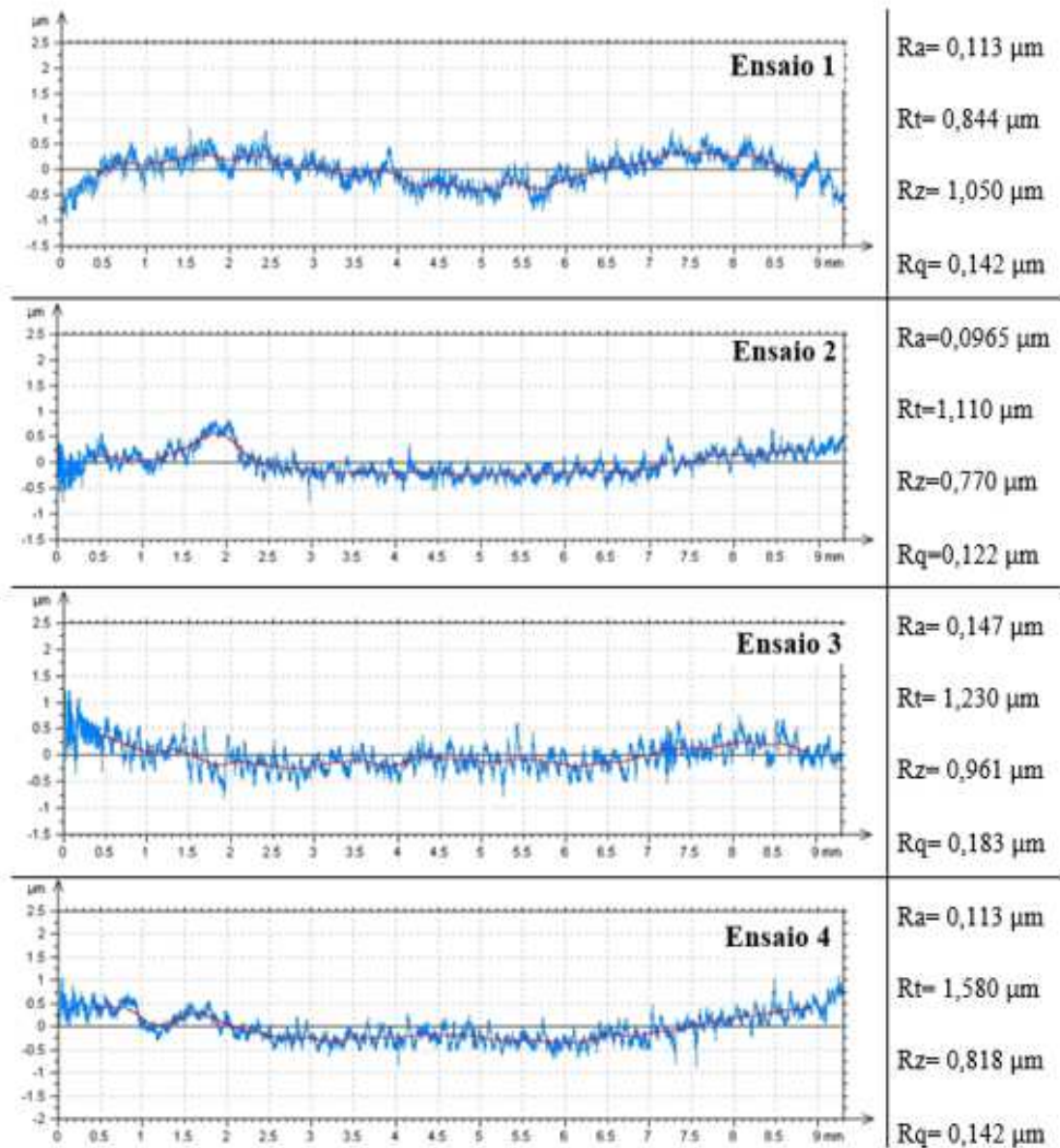


FIGURA 5.20 - Perfis de rugosidade e de ondulação canal 2 para os ensaios 1, 2, 3 e 4.

FONTE: autor, 2017.

Quando avalia-se os perfis de rugosidade referentes à Figura 5.20, nota-se que o ensaio 3 ($ap= 40 \mu\text{m}$; $fz= 6 \mu\text{m/dente}$) apresenta os maiores valores de rugosidade, pois a baixa rigidez da microfresa associada com as forças de usinagem ocasionaram uma maior deformação da ferramenta que contribui para o aumento das vibrações mecânicas que deterioram a qualidade superficial do canal. Além disso, decidiu-se também avaliar o perfil de ondulação da superfície por meio dos parâmetros W_a (valor médio aritmético de ondulação) e W_t (valor máximo de ondulação) para investigar a influência das condições de corte na ondulação da superfície microfresada. A Figura 5.21 mostra que para o canal 2, em todos os ensaios realizados a condição referente ao ensaio 3 apresentou os menores valores de ondulação média e de ondulação máxima quando comparado aos demais.

Ensaio 1; $ap= 20 \mu\text{m}$; $fz= 6 \mu\text{m/dente}$ **Ensaio 3; $ap= 40 \mu\text{m}$; $fz= 6 \mu\text{m/dente}$**
Ensaio 2; $ap= 20 \mu\text{m}$; $fz= 3 \mu\text{m/dente}$ **Ensaio 4; $ap= 40 \mu\text{m}$; $fz= 3 \mu\text{m/dente}$**

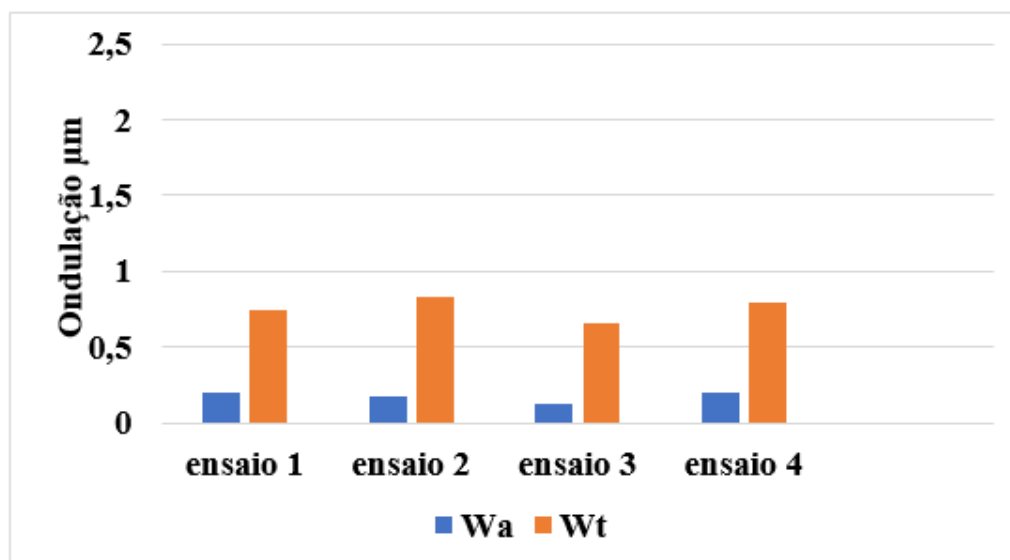


FIGURA 5.21 - Gráfico de ondulação média e máxima para a ferramenta no início de vida canal 2.

FONTE: autor, 2017.

Para o canal 42 (comprimento usinado de 378 mm) foi realizado o mesmo procedimento da análise do canal 2. Porém, com o objetivo de verificar a influência do desgaste da ferramenta na qualidade superficial microfresada, foi gerado os perfis de rugosidade do canal 42, conforme demonstrados na Figura 5.22.

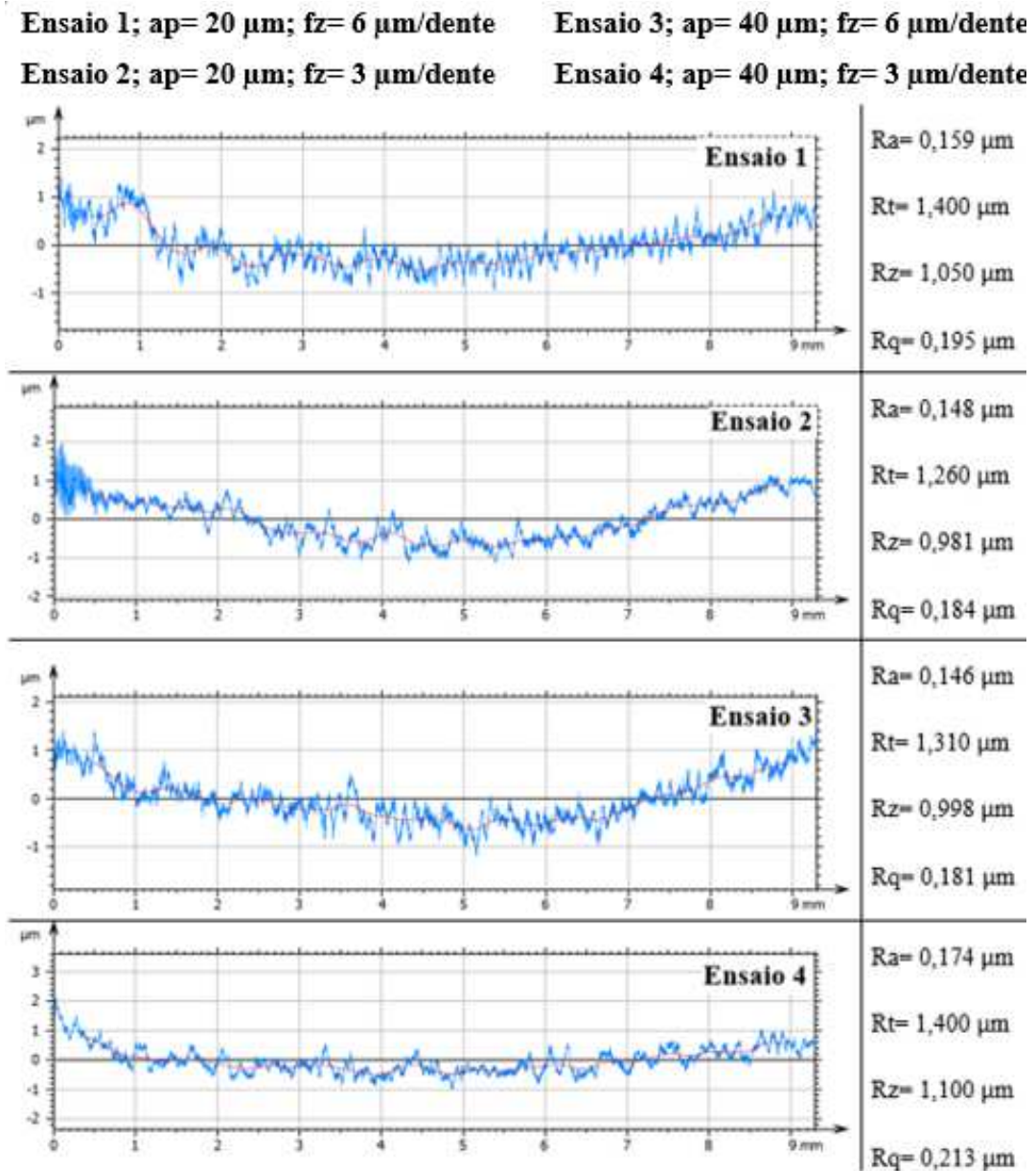


FIGURA 5.22 - Perfis de rugosidade e de ondulação canal 42 para os ensaios 1, 2, 3 e 4

FONTE: autor, 2017.

Quando comparados os perfis de rugosidades entre o canal 2 e 42, notou-se o aumento dos valores dos parâmetros de rugosidade R_a , R_t , R_z e R_q para o canal 42, fato relacionado com o aumento das forças de usinagem, principalmente, a força passiva, ou seja, o aumento do desgaste da aresta de corte da ferramenta afetou de maneira significativa a rugosidade do canal. O aumento das forças atuantes na microfresa também proporciona a deflexão da ferramenta, ocasionando erros de forma na superfície devido ao corte irregular da ferramenta. Este fato pode ser comprovado quando se compara os valores de ondulação média e máxima do canal 2 (Figura 5.21) com o canal 42, (Figura 5.23). Nota-se a influência do

desgaste da ferramenta na qualidade da superfície microfresada que apresentou a mesma tendência para todos os ensaios realizados.

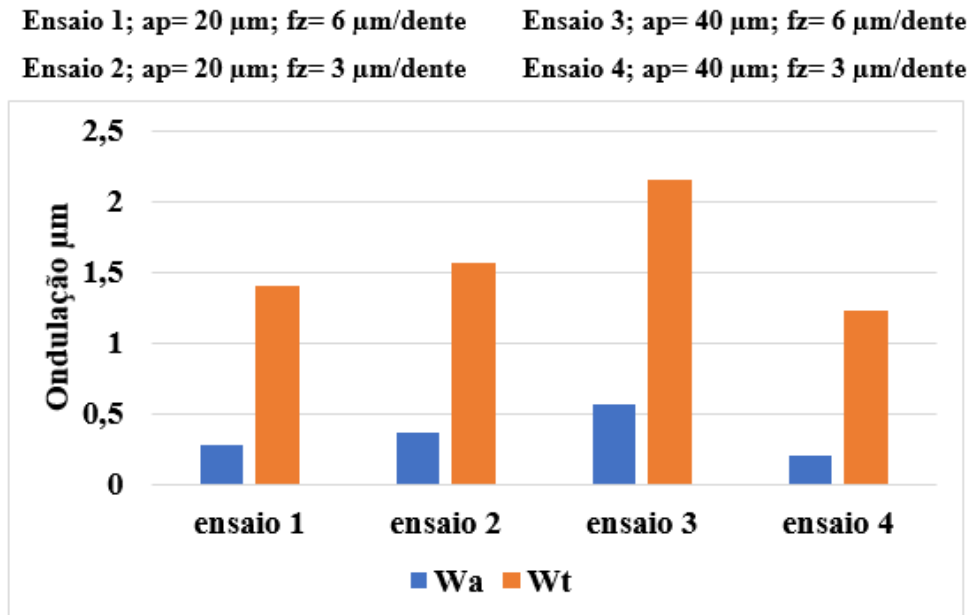


FIGURA 5.23 - Gráfico de ondulação média e máxima para a ferramenta na condição desgastada canal 42.

FONTE: autor, 2017.

Por fim, foi verificado por meio do microscópio eletrônico de varredura a integridade da superfície usinada, e notando-se uma tendência de regiões de sulcamento do material na lateral do canal para todos os ensaios realizados. A Figura 5.24 ilustra a região de sulcamento do canal 2 referente as condições do ensaio 3.

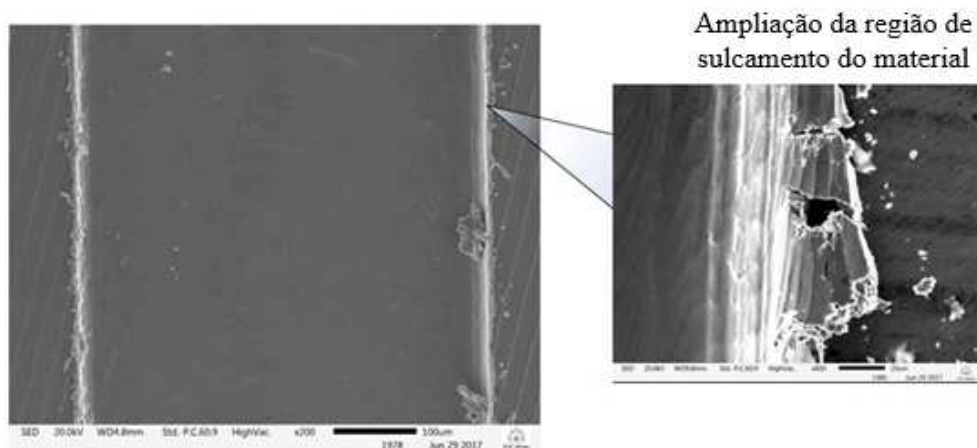


FIGURA 5.24 - Imagem do MEV da região de sulcamento do canal 2 referente ao ensaio 3.

FONTE: autor, 2017.

O efeito do sulcamento na lateral do canal é consequência da espessura do material não deformado ser menor que a mínima espessura do cavaco, dificultando a remoção

do cavaco por cisalhamento. Desta forma, para o fresamento frontal, a espessura do cavaco no início e no final do corte são teoricamente zero, favorecendo o efeito do sulcamento e prejudicando a qualidade superficial da superfície da peça. Este tipo de mecanismo influencia a rugosidade e pode levar à formação de trincas. Quando a espessura do cavaco não deformado é menor que a mínima espessura do cavaco, as trincas podem ocorrer devido as elevadas tensões aplicadas na superfície da peça pela microfresa que deformam o material plasticamente não provocando a remoção do cavaco por cisalhamento e sim o deslizamento da superfície de folga da ferramenta contra superfície do canal que provocou aderência do aço AISI D2 na superfície da microfresa. Com a evolução do contato da partícula do aço AISI D2 aderida na ferramenta com a superfície do canal, a partícula foi endurecida por encruamento e consequentemente se rompeu da microfresa, removendo gradativamente o revestimento de TiNAl e o substrato de metal duro causando mudanças na geometria da aresta de corte da ferramenta. Como consequência, o ângulo de saída efetivo tornou-se cada vez mais negativo e impondo maior sulcamento na região próximo a parede do canal pelo aumento do atrito entre a ferramenta e a peça. Para entender melhor o comportamento do efeito do sulcamento do material, é apresentado na Figura 5.25 o modelo proposto por STACHOWIAK et al. (1993), no qual as partículas aderidas na superfície da ferramenta são encruadas e, consequentemente, atuam como um abrasivo contra a superfície do canal da peça formando sulcos e possíveis trincas.

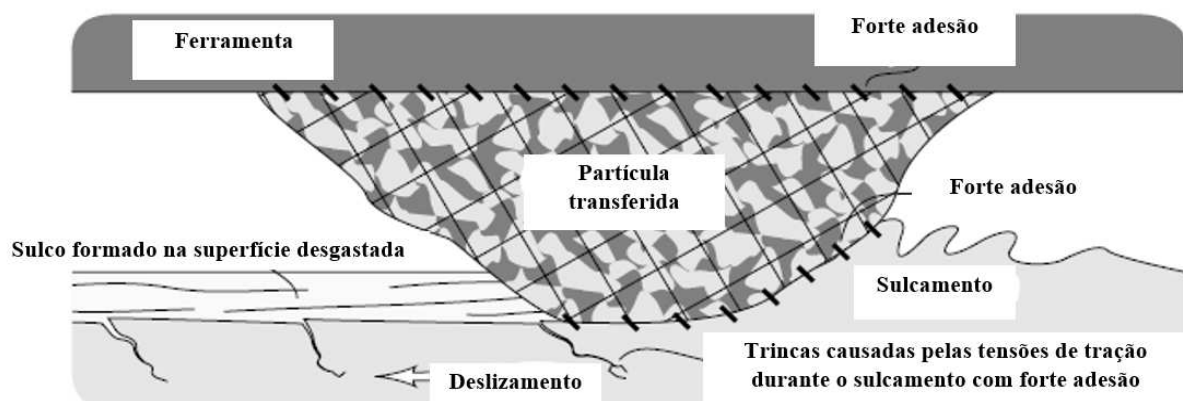


FIGURA 5.25 - Modelo proposto por Stachowiak e Batchelor para o efeito de sulcamento do material.

FONTE: Stachowiak et al. (1993).

5.2.4 Formação de rebarba

A formação de rebarba durante o microfresamento depende principalmente das características do material da peça, das condições de corte e do desgaste da microfresa. Para

caracterizar as rebarbas após os ensaios de microfresamento, foram utilizados um perfilômetro por contato e um microscópio eletrônico de varredura. Os resultados serão apresentados na seguinte ordem altura de rebarba, largura de rebarba e volume de rebarba. Porém, antes será apresentado as rebarbas encontradas na entrada do canal, meio do canal e na saída do canal para os ensaios 1, 2, 3 e 4, conforme ilustrado na Figura 5.26.

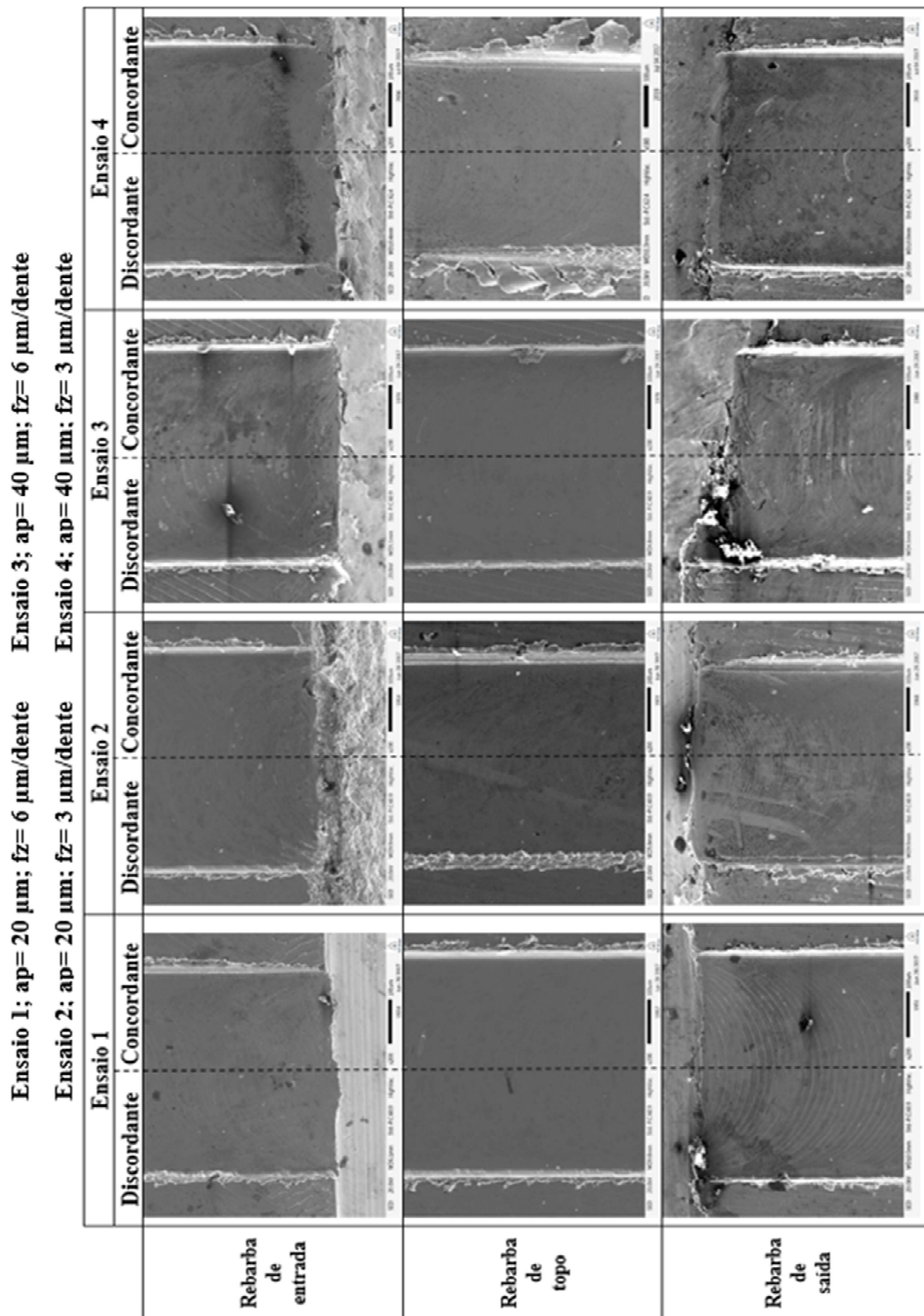


FIGURA 5.26 - Rebarbas encontradas na entrada, topo e saída do canal 42 para os ensaios 1, 2, 3 e 4.

FONTE: autor, 2017

De acordo com as imagens da Figura 5.26, observa-se que a rebarba na entrada e na saída do canal foram mínimas. As rebarbas de topo foram significativas sendo a rebarba no sentido concordante de corte maior que a rebarba no sentido discordante.

5.2.4.1 Altura de rebarba

A altura de rebarba foi medida por meio de cinco varreduras correspondentes ao perfil bidimensional extraído da superfície de varredura do perfilômetro referente aos 43 canais microfresados e realizada a média aritmética dos cinco valores, com objetivo de comparar a altura de rebarba para todas as condições correspondentes aos ensaios 1, 2, 3 e 4. A fim de avaliar a altura de rebarba no sentido de corte concordante e discordante foram selecionados cinco canais de números 2, 12, 22, 32 e 42. Por fim, foram gerados histogramas que representam a densidade de rebarbas/mm² em função da altura de rebarba formada durante o microfresamento. Para o melhor entendimento do comportamento da altura de rebarba para os ensaios 1, 2, 3 e 4 os resultados serão apresentados na forma de gráfico na Figura 5.27.

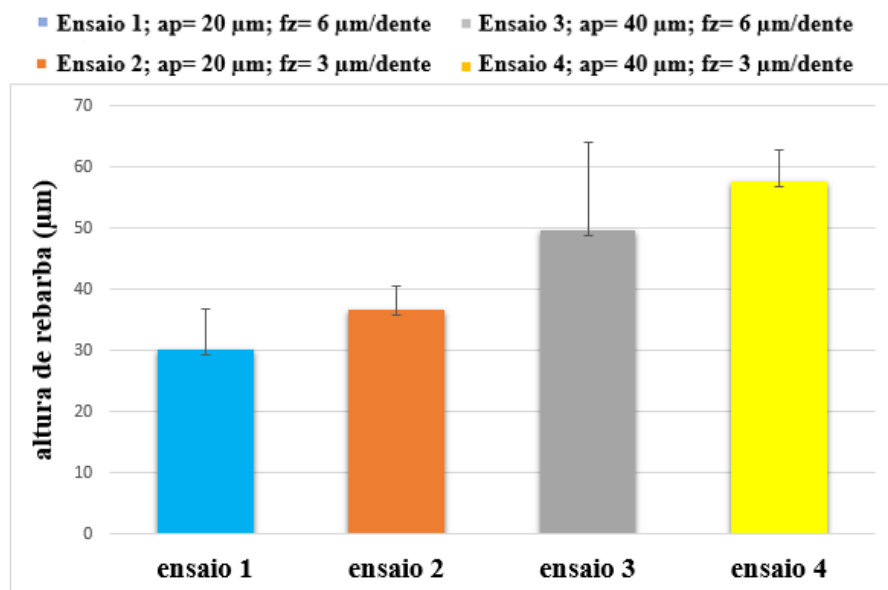


FIGURA 5.27 - Altura de rebarba para os ensaios 1, 2, 3, 4.

FONTE: autor, 2017.

De acordo com a Figura 5.27, o ensaio 4 ($f_z= 3\mu\text{m/dente}$ e $ap=40\mu\text{m}$) registrou a maior altura de rebarba (valor médio de $57,76\mu\text{m}$) quando comparado com os ensaios 1, 2 e 3, sendo possível notar que houve uma influência do avanço por dente na altura de rebarba, Desta forma para os maiores valores de avanço por dente ($f_z= 6\mu\text{m/dente}$) que corresponde aos

ensaios 1 e 3 a razão entre o avanço por dente e o raio de aresta é superior aos ensaios 2 e 4 ($f_z=3 \mu\text{m}/\text{dente}$) o que resulta na maior remoção do cavaco por cisalhamento. Além disso, para os ensaios 2 e 4 com menores valores de avanço por dente ($f_z=3 \mu\text{m}/\text{dente}$) a microfresa permanece em um maior tempo em contato com a parede do canal, onde ocorrem a recuperação elástica do material e o efeito de sulcamento aumentando o atrito e o desgaste da ferramenta por abrasão. Quando comparado o ensaio 1 com o ensaio 2, que possuem a mesma profundidade de usinagem ($a_p=20 \mu\text{m}$) e diferentes valores de avanço por dente ficou evidente que para o ensaio 2 apresentando um menor valor de avanço por dente ($f_z=3 \mu\text{m}/\text{dente}$) ocorreu uma maior altura de rebarba em relação ao ensaio 1 o que se repete para os ensaios 3 e 4. A justificativa dos maiores valores de altura de rebarba terem ocorrido para a profundidade de usinagem $40 \mu\text{m}$ está relacionada com a maior área de remoção de material o que exige maiores forças de usinagem para remover o cavaco por cisalhamento, ocasionando o desgaste acelerado da aresta de corte resultando em um maior ângulo de saída e aumento do efeito do sulcamento do material, produzindo maior quantidades de rebarbas, o que corrobora as afirmações de FILIZ et al. (2007). Portanto, para validar este comportamento foi realizada análise dimensional das microfresas após os ensaios de microfresamento no microscópio eletrônico de varredura após a usinagem dos 43 canais, apresentados na Figura 5.28.

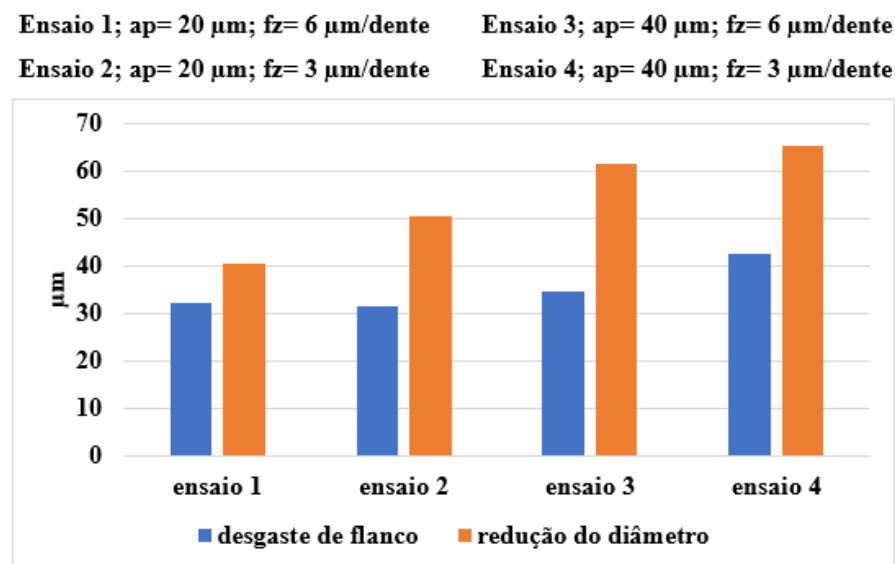


FIGURA 5.28 - Desgaste de flanco e redução do diâmetro após o microfresamento dos 43 canais.

FONTE: autor, 2017.

Para o ensaio 3 e 4 ocorreu uma maior redução do diâmetro da ferramenta devido ao desgaste abrasivo da microfresa que, conseqüentemente, ocasionou a remoção do

revestimento de TiNAl da ferramenta. A Figura 5.29 apresenta as imagens obtidas por meio do MEV para o desgaste das microfresas referentes aos ensaios 1, 2, 3 e 4.

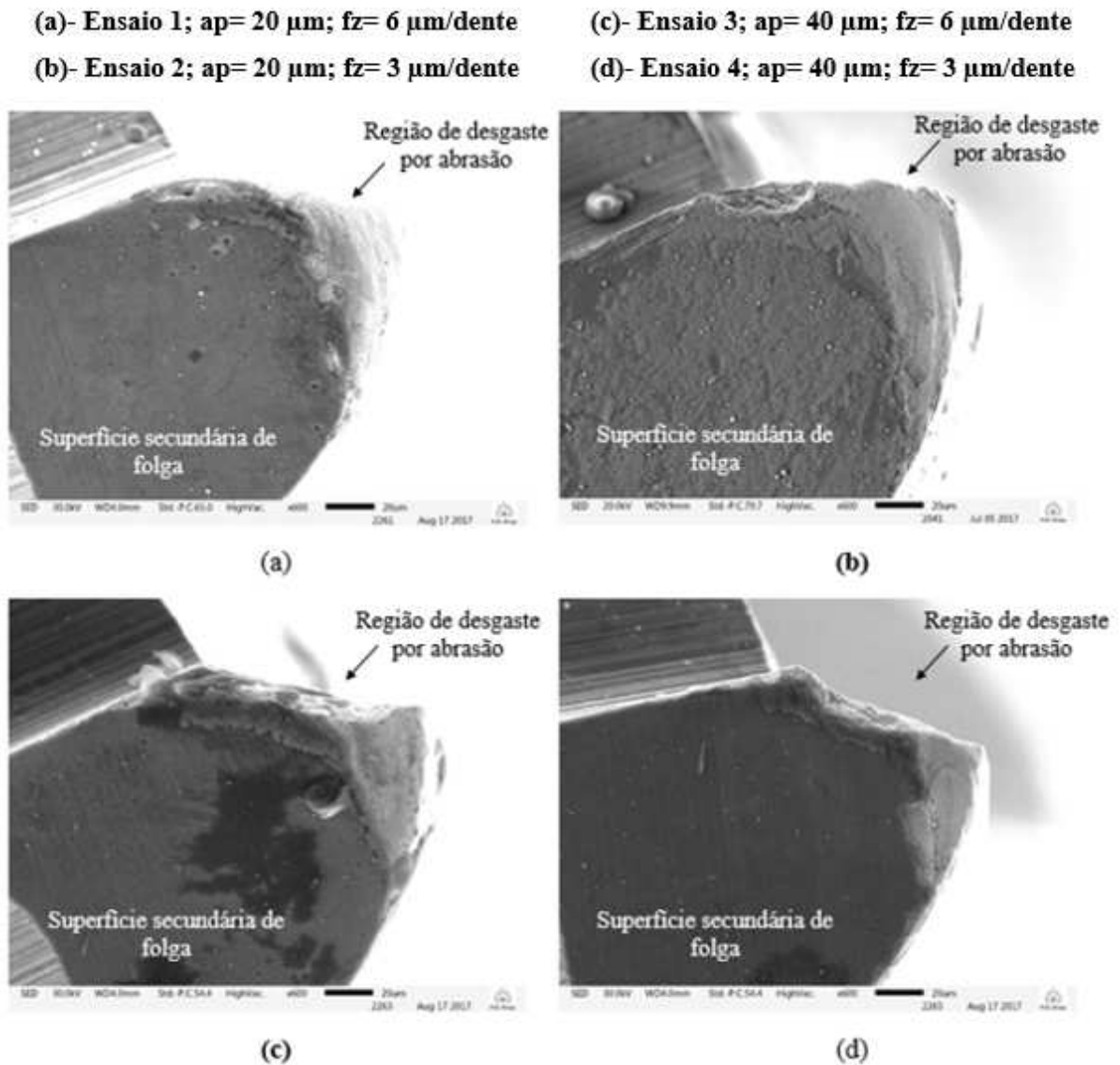


FIGURA 5.29 - Desgaste das microfresas após o microfresamento dos 43 canais.

FONTE: autor, 2017.

Nos ensaios de microfresamento aconteceu algo semelhante aos ensaios de pino sobre disco, onde houve aderência do material da peça de trabalho na superfície de folga da microfresa que formaria uma possível aresta postiça. Esta análise segue o seguinte raciocínio; após as arestas de corte da ferramenta efetuarem seu primeiro percurso de usinagem, uma porção de material fica aderido à superfície da microfresa, conforme detalhado na Figura 5.30. No próximo percurso de usinagem das arestas de corte, o material aderido entra em contato com o material da peça, sofrendo encruamento e ocasionando o aumento da temperatura devido

ao atrito do material aderido na interface ferramenta peça, e como consequência, tem-se que após o encruamento do material aderido ocorre o seu despreendimento da superfície da ferramenta com arrancamento de material da aresta de corte. Isso, seria um problema para o microfresamento pois as arestas de corte ficariam com geometrias diferentes o que ocasionaria maiores esforços de corte somente em uma aresta de corte provocando a deflexão da ferramenta e aumento da força na direção perpendicular a direção de avanço (força de apoio). Além disso, como o desgaste da ferramenta haveria uma maior deformação plástica retorno elástico, e maior fluxo lateral de material contribuindo para a formação de rebarbas.

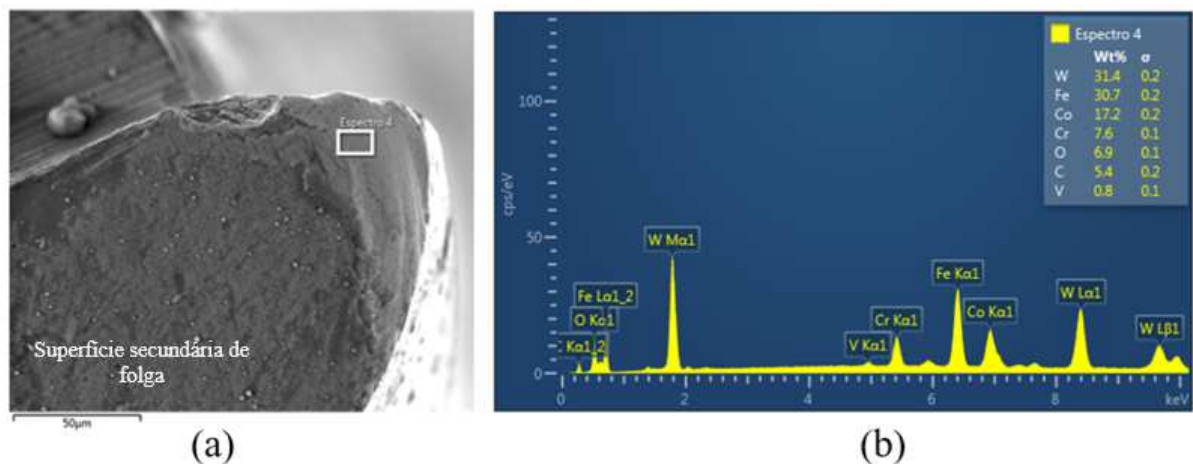


FIGURA 5.30 - EDS da ferramenta do ensaio 2. (a) imagem do MEV com a delimitação da região de desgaste. (b) análise semi quantitativa dos elementos químico do espectro 4.

FONTE: autor, 2017.

5.2.4.2 Sentido de corte

O sentido de corte concordante apresentou maiores valores de altura de rebarba em relação ao sentido de corte discordante para todos os ensaios realizados neste trabalho, de modo que os resultados estão em concordância com os resultados verificados por ARAMCHAROEN et al. (2009). A Figura 5.31 detalha os valores de altura de rebarba em função do comprimento usinado dos canais 2, 12, 22, 32 e 42 para os ensaios 1, 2, 3 e 4. A justificativa para maior altura de rebarba ter acontecido para o sentido concordante de corte está relacionada com a quantidade de material plasticamente deformado gerado à frente da aresta de corte, que quando deslocado na direção da força de avanço e de corte rompe por fratura na parte superior do canal deixando para trás uma pequena quantidade de material não removido (rebarba), MATHAI et al. (2012).

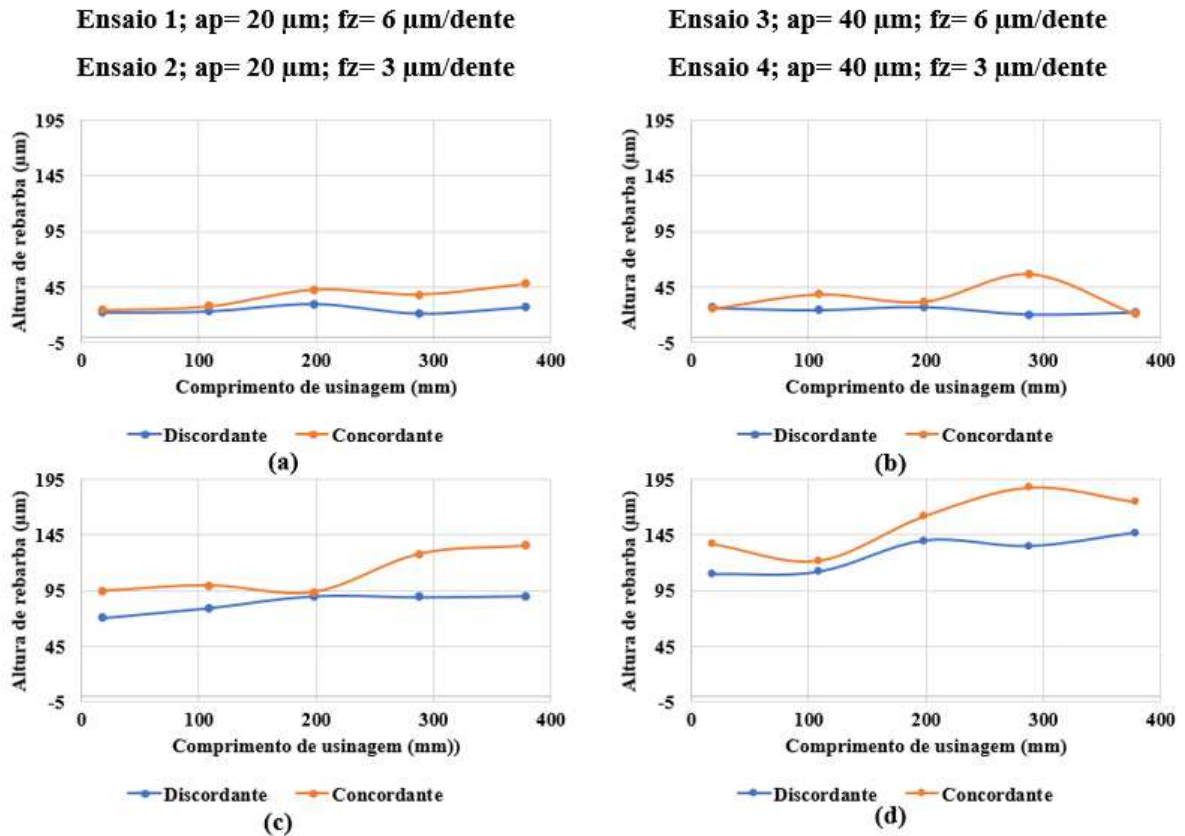


FIGURA 5.31 -. Altura da rebarba no sentido concordante e discordante. (a) ensaio 1. (b) ensaio 2. (c) ensaio 3. (d) ensaio 4.

FONTE: autor, 2017.

5.2.4.3 Densidade de rebarba

Apesar dos histogramas da Figura 5.32 não estarem na mesma escala devido à impossibilidade de alterá-las no *software Hommelmap 6.2* onde foram gerados, é possível observar que para os ensaios 1 e 2 (profundidade de usinagem de $20 \mu\text{m}$), observou-se que na condição de menor avanço por dente (ensaio 2) prevaleceu uma maior altura de rebarba e densidade de rebarbas/ mm^2 para uma mesma área de varredura do perfilômetro, reafirmando, a influência da razão entre o avanço por dente e o raio de aresta. Para maiores valores de avanço por dente, o material da peça foi removido com maior facilidade por cisalhamento, resultando em menor altura de rebarba, ou seja, quando comparado os ensaios 3 e 4 com a mesma profundidade de usinagem de $40 \mu\text{m}$. Quando comparado os ensaios 1, 2, 3 e 4 nota-se que nos ensaios com profundidade de usinagem de $40 \mu\text{m}$, as alturas de rebarbas foram maiores em relação aos ensaios com profundidade de usinagem de $20 \mu\text{m}$, confirmando a influência da profundidade de usinagem na altura de rebarba devido a maior área de remoção de material que eleva as forças de usinagem e conseqüentemente aumentou o desgaste da ferramenta. Ressalta-

se que a análise pelos histogramas consiste de uma ferramenta importante para identificar a distribuição das alturas de rebarbas para cada condição e somente pela análise da densidade de rebarbas/mm² não foi possível identificar uma tendência para o comportamento da densidade de rebarba em função dos parâmetros de entrada. A justificativa para tal situação está no comportamento do ensaio 4, onde se esperava maior densidade de rebarbas e acabou sendo a condição que gerou menor densidade de rebarbas/mm², fato esse que não foi possível justificar neste trabalho.

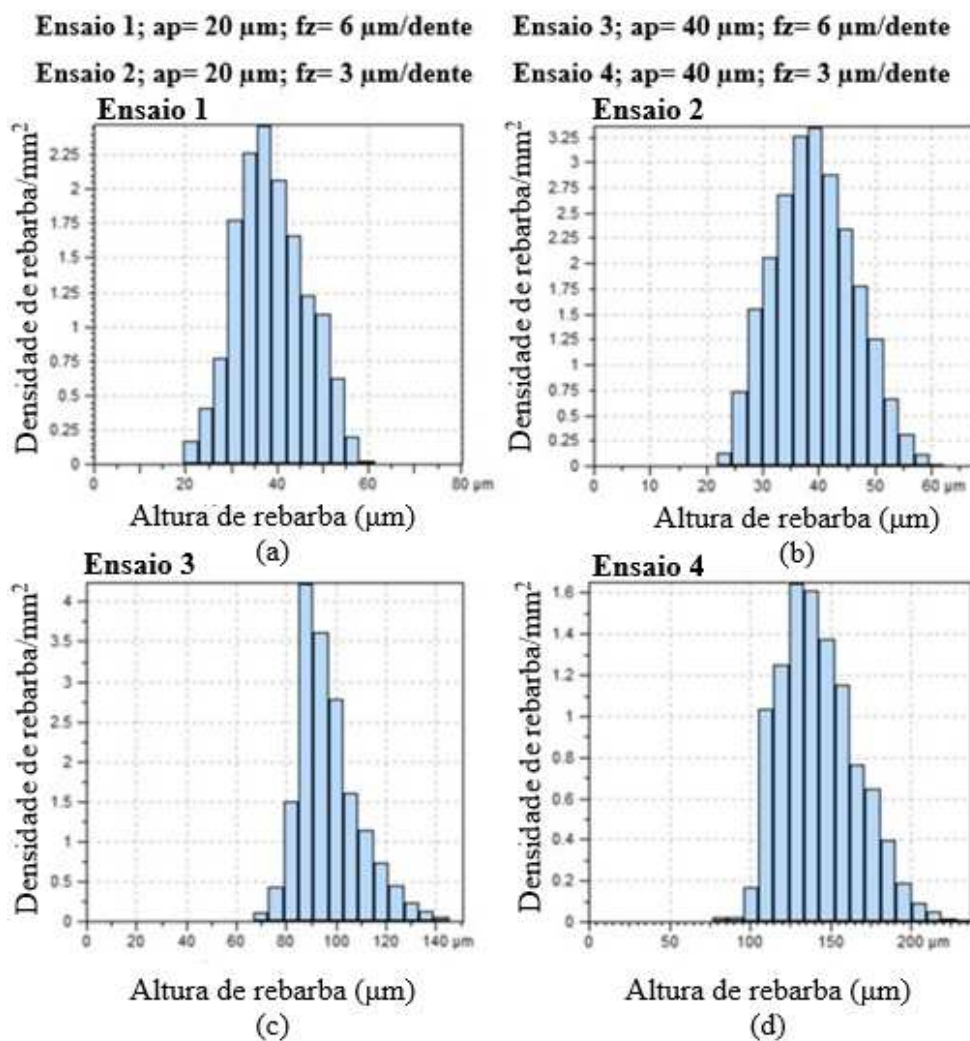


FIGURA 5.32 - Histograma da altura de rebarba (a) ensaio 1. (b) ensaio 2. (c) ensaio 3. (d) ensaio 4.

FONTE: autor, 2017.

5.2.4.3 Largura de rebarba e volume de rebarba

A Figura 5.33 apresenta os valores médios da largura de rebarba obtidos por meio de microscopia eletrônica de varredura referentes aos ensaios 1, 2, 3 e 4. Ao analisar as dimensões da largura de rebarba, foi constatado que para o sentido de corte concordante a

largura de rebarba prevaleceu maior em relação ao sentido de corte discordante para todos os ensaios realizados. A justificativa está relacionada com a quantidade de material deformado plasticamente à frente da aresta de corte, ou seja, quando o material deformado é deslocado na direção da força de avanço e de corte rompe por fratura na parte superior do canal deixando para trás uma pequena quantidade de material não removido. Dessa forma, é possível verificar também por meio da Figura 5.33 a influência do avanço por dente e profundidade de usinagem nas dimensões da largura de rebarba: para menores valores de avanço por dente, a ferramenta permanece mais tempo em contato com o material da peça, o que acelera seu desgaste produzindo maiores rebarbas. Além disso, a relação entre o avanço por dente e o raio de aresta decresce, aumentando a compressão e o atrito da ferramenta com o material do canal, diminuindo a formação de cavaco por cisalhamento elevando a quantidade de rebarbas. Já para maiores valores de profundidade de usinagem, notou-se que as dimensões da largura da rebarba crescem devido à maior área de contato da ferramenta com o canal, ocasionando maiores forças de usinagem e quantidade de rebarbas.

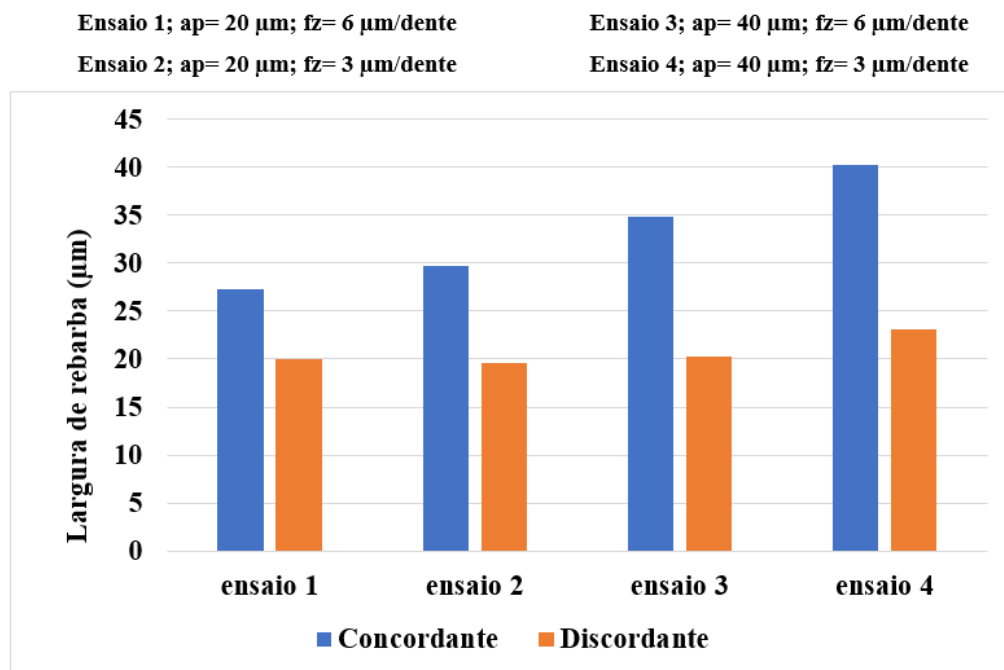


FIGURA 5.33 - Largura de rebarba em função do sentido de corte para os ensaio 1, 2, 3 e 4.

FONTE: autor, 2017.

Os resultados da caracterização do volume de rebarba são mostrados na Figura 5.34. Nota-se a influência do avanço por dente e profundidade de usinagem no volume de rebarbas formadas durante os ensaios de microfresamento, ou seja, confirmou-se as hipóteses

anteriores que menores valores de avanço por dente e para os maiores valores de profundidade de usinagem, propiciam maiores alturas e larguras de rebarbas.

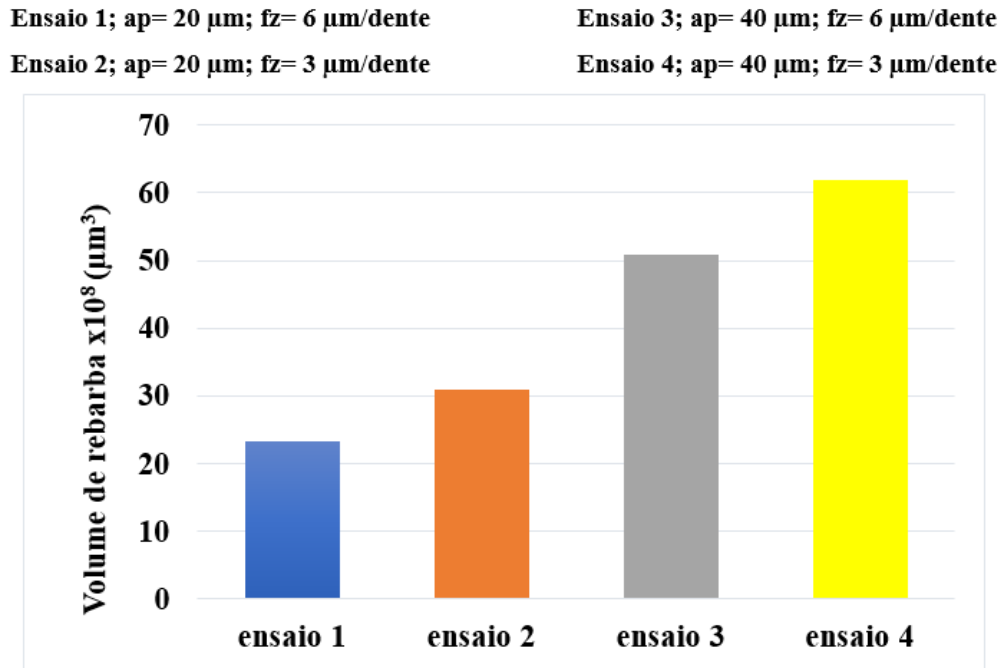


FIGURA 5.34 - Volume de rebarba para os ensaios 1, 2, 3 e 4.

FONTE: autor, 2017.

Após a análise da altura, largura, densidade e volume de rebarba avaliou-se a influência do avanço por dente e profundidade de usinagem nas dimensões das rebarbas. Além disso, o ensaio 4 foi que apresentou maiores dimensões de rebarbas, as quais são prejudiciais para a qualidade do produto final, dada a dificuldade de remoção. A condição que apresentou menores dimensões de rebarbas foi o ensaio 1 com maior valor de avanço por dente e menor valor de profundidade de usinagem em relação aos ensaios 2, 3 e 4. A partir dos resultados obtidos referentes as dimensões das rebarbas para o ensaio 1, optou-se por realizar um novo ensaio com valor de avanço por dente de 13,20 $\mu\text{m}/\text{dente}$ e profundidade de usinagem de 17 μm com objetivo de investigar a influência do desgaste da ferramenta nas forças de usinagem, emissão acústica e na formação de rebarbas.

5.3. Desgaste da ferramenta

O monitoramento da evolução do desgaste da ferramenta durante o microfresamento para condição com profundidade de usinagem de 17 μm e avanço por dente

de 13,20 $\mu\text{m}/\text{dente}$ foi realizado por meio dos sinais de forças do dinamômetro e emissão acústica. Além disso, o monitoramento dos sinais de forças e emissão acústica foram realizados para cada canal microfresado adotando como critério de fim de vida, o desgaste da ferramenta até fratura. A Figura 5.35 detalha o aumento gradual das forças de usinagem em função do comprimento usinado para a força de avanço, apoio e passiva.

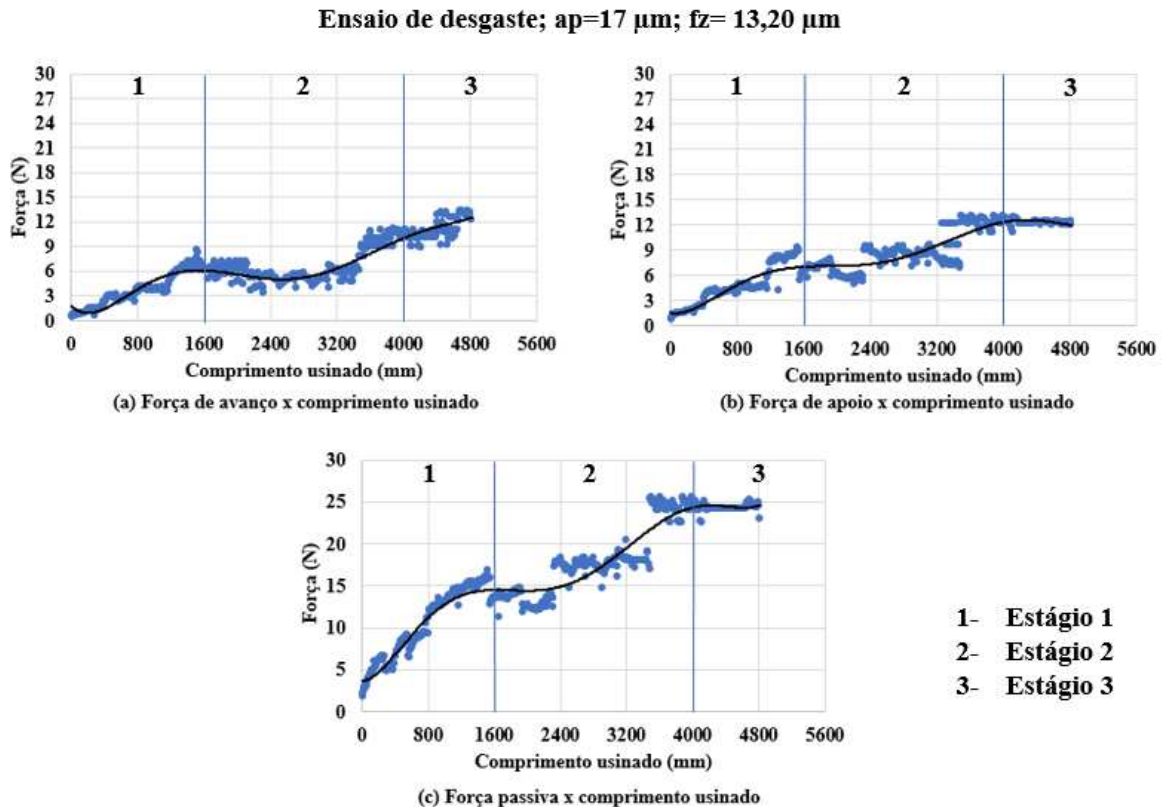


FIGURA 5.35 - Forças de usinagem em função do comprimento usinado para o ensaio de desgaste de ferramenta. (a) força de avanço, (b) força de apoio e (c) força passiva.

FONTE: autor, 2017.

O aumento gradual das forças foi relacionado com o desgaste contínuo e progressivo da microfresa provavelmente a aderência do aço AISI D2 na superfície principal e secundária de folga da ferramenta, que obstruem o contato da aresta de corte com a superfície do canal. Dessa forma, como consequência há aumento das forças de usinagem pelo maior atrito na interface ferramenta-peça, corroborando o desgaste da ferramenta pelos mecanismos de abrasão e adesão. De acordo com a Figura 5.35, observou-se que a fratura da ferramenta aconteceu para o comprimento de usinagem de 4815 mm para forças de avanço de 12 N, apoio de 12 N e passiva de 23 N. Notou-se maior valor da força passiva em relação às forças de avanço e apoio, fato que pode ser atribuído ao sulcamento do material nas regiões próximas da

parede do canal. Além disso, os maiores valores registrados para a força passiva podem também estar relacionados com a deflexão axial da ferramenta, que ocasionam a compressão da microfresa contra a superfície usinada que conseqüentemente aumentaria a força passiva. Quando comparados os resultados das forças de avanço e apoio ao longo do ensaio, foi possível verificar que no estágio 2 da curva de desgaste da ferramenta, a força de apoio em alguns momentos foi superior a força de avanço, fato causado provavelmente pela deflexão axial e radial da microfresa devido ao desgaste desigual das arestas de corte.

Foi realizada a transformada PSD para os sinais de emissão acústica e analisado as intensidades dos sinais e as faixas de frequências para a microfresa no estágio 1, 2 e 3. Para o estágio 3, verificou-se conforme detalhado na Figura 5.36 (c), que a intensidade dos picos é aproximadamente três vezes maior que nos estágios 1 e 2, a justificativa para esse fato pode ser atribuída a intensidade dos sinais de emissão acústica, que podem estar relacionados com a taxa de desgaste da ferramenta. Já no estágio 3, a microfresa estava na fase de desgaste acelerado, onde foi possível a remoção do revestimento de TiNAl e mudanças na geometria da aresta de corte. Sendo assim, foi necessária maior quantidade de energia para remoção do material por cisalhamento. Para as faixas de frequência do estágio 1, correspondente a Figura 5.36 (a), notou-se que no início da operação de microfresamento as faixas de frequência de maiores amplitudes encontrou-se entre 100 a 250 kHz onde o revestimento de TiNAl cumpriu seu papel de minimizar o desgaste na interface ferramenta peça favorecendo o cisalhamento do material e para o estágio 2, conforme detalha Figura 5.36 (b) percebeu-se faixas de frequências entre 100 a 250 kHz e faixas de frequência de 50 a 100 kHz que diminuíram de maneira significativa em relação ao estágio 1. Dessa forma, a densidade de picos para 150 kHz aumentou sugerindo uma remoção do revestimento e o desgaste da ferramenta por abrasão. Já para o estágio 3, sendo observado pela Figura 5.36 (c), verificou-se faixas de frequências entre 100 a 250 kHz, porém com o aumento da densidade de picos entre 150 a 200 kHz, indicou uma completa remoção do revestimento das arestas de corte.

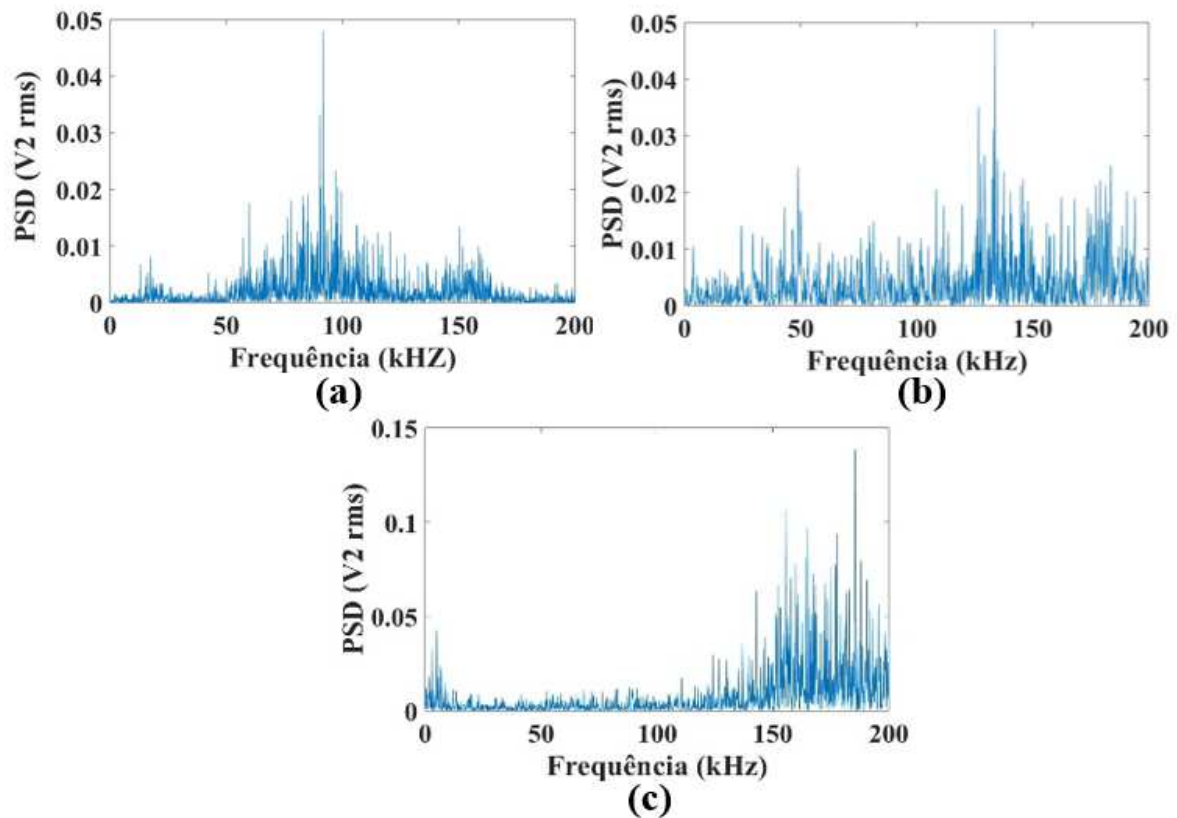


FIGURA 5.36 - Densidade espectral dos sinais de emissão acústica para os estágios 1, 2 e 3 do ensaio de desgaste. (a) estágio 1. (b) estágio 2. (c) estágio 3.

FONTE: autor, 2017.

Avaliou-se a rugosidade, ondulação e altura de rebarba para os estágios 1, 2 e 3 da curva de desgaste da ferramenta e os resultados referentes a rugosidade são apresentados na Figura 5.37. Os resultados de rugosidade R_a , R_t , R_z e R_q provenientes do ensaio de desgaste mostraram que a ferramenta na condição desgastada (estágio 3) gerou superfícies com maiores valores de rugosidade e notou-se que no estágio 3 houve um maior desvio geométrico em relação aos estágios 1 e 2. Também, foram avaliados os parâmetros de ondulação W_a e W_t (Figura 5.38) para os três estágios da curva de desgaste da ferramenta, sendo os maiores valores de ondulação obtidos referentes ao estágio 3, isso sugere uma deflexão axial e radial da microfresa que conseqüentemente refletiu em maiores vibrações da ferramenta, ocasionando maiores forças de usinagem e maiores erros geométricos na superfície usinada. Nesse sentido, a deflexão da microfresa devido a sua baixa rigidez justifica os maiores valores de rugosidade e ondulação obtidos para o estágio 3 da curva de desgaste da ferramenta.

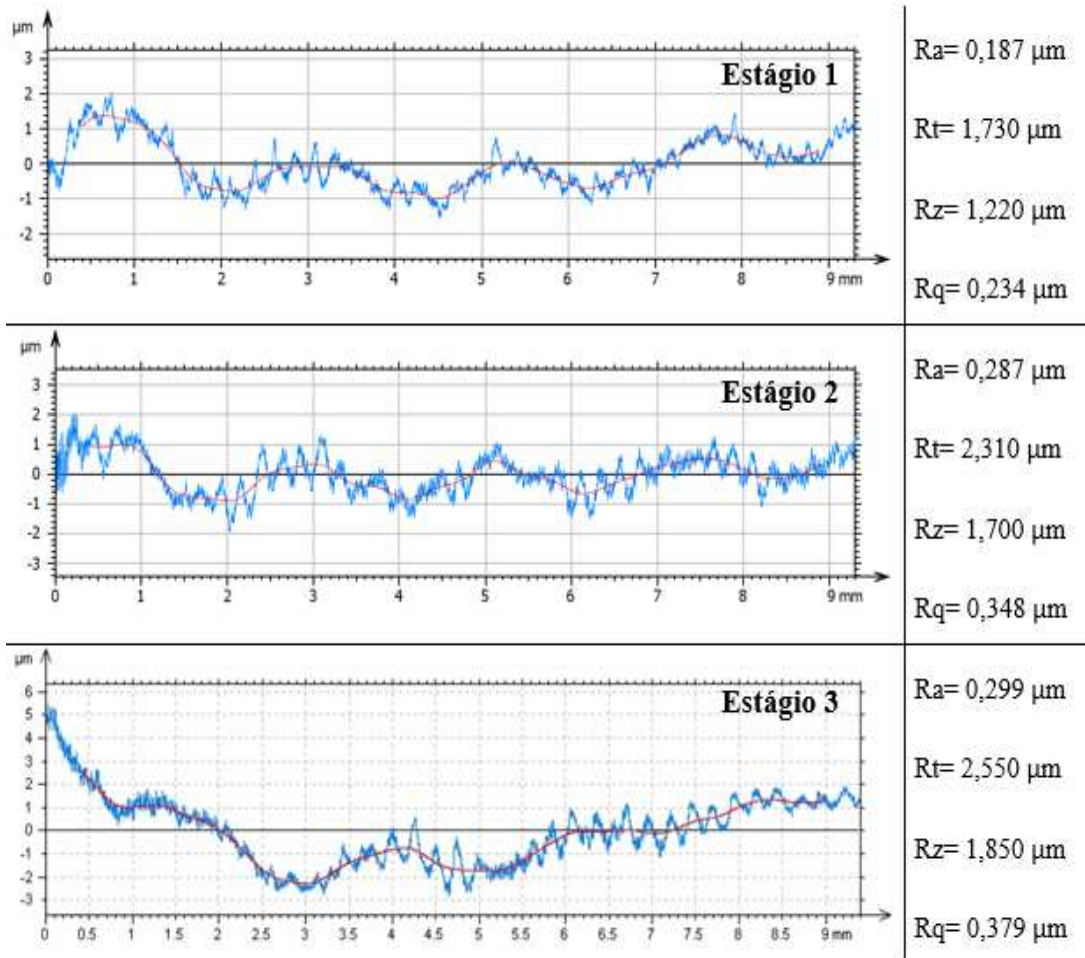


FIGURA 5.37 - Perfis de rugosidade e ondulação dos estágios 1, 2 e 3 da curva de desgaste da ferramenta.

FONTE: autor, 2017.

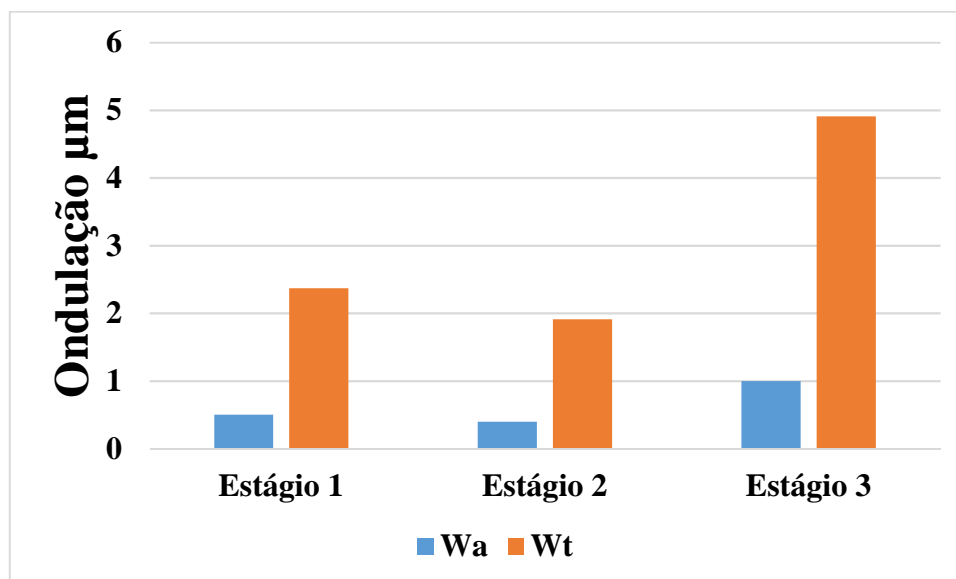


FIGURA 5.38 - Gráfico de ondulação média e máxima para os estágios 1, 2 e 3 do ensaio de desgaste.

FONTE: autor, 2017.

Para a formação das rebarbas, como observado pela Figura 5.39, a maior altura de rebarba foi formada no sentido concordante de corte, o que segue uma tendência para todos os ensaios realizados neste trabalho. Além disso, a Figura 5.39 (a) mostra a perfilometria da região de fratura da microfresa no estágio 3 da curva de desgaste da ferramenta e a Figura 5.39 (b) apresenta a imagem do microscópio eletrônico de varredura da mesma região de fratura da ferramenta é possível notar a presença de rebarba primária e regiões de sulcamento com a presença de possíveis micro-trincas, sugerindo aderência do AISI D2 na superfície principal e secundária de folga da ferramenta e este material aderido quando encruado atuaria com um abrasivo sulcando o material, formando possíveis trincas na superfície do canal.

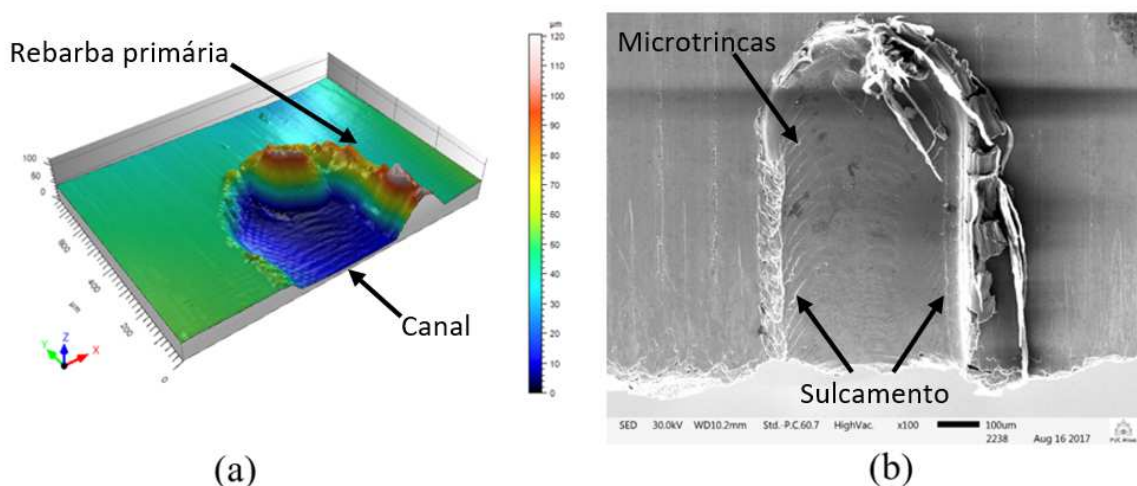


FIGURA 5.39 - Imagens da perfilometria e do MEV da região de fratura da microfresa. (a) perfilometria. (b) MEV. FONTE: autor, 2017.

Por fim, foi avaliado a densidade de rebarbas/mm² em função da altura de rebarba para os estágios 1, 2 e 3 do ensaio de desgaste. Foi possível observar que conforme detalhado pela Figura 5.40, que no estágio 3, decorreu as maiores alturas de rebarbas quando comparado com o estágio 1 e 2. Dessa forma, sugere-se que no estágio 3 a formação do cavaco por cisalhamento deixa de ser predominante, pois a espessura mínima para formar o cavaco diminuiu devido as mudanças na geometria das arestas de corte da ferramenta tornando o raio de aresta e de ponta cada vez maiores e conseqüentemente há uma maior formação de rebarbas devido ao sulcamento excessivo do material na região de formação do cavaco. Sendo assim, o material que não foi removido por cisalhamento transformou-se em rebarba sendo empurrado pela aresta de corte da ferramenta para as laterais do canal. Portanto, o estágio 1 é a região da curva de desgaste mais favorável para o mecanismo de formação do cavaco por cisalhamento,

ou seja, nesta região o cavaco é formado majoritariamente por cisalhamento com uma parcela de menor expressão de sulcamento do material.

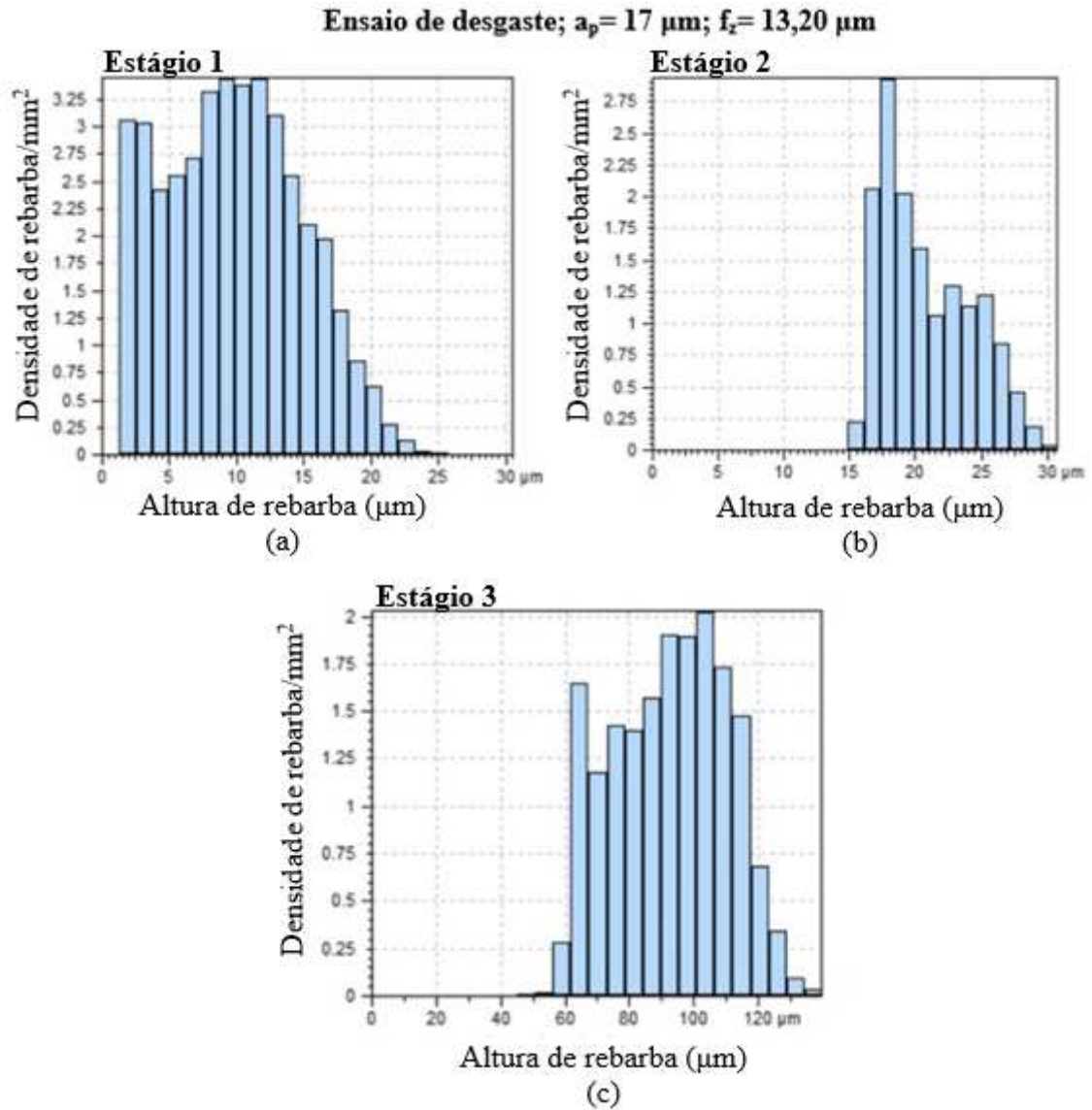


FIGURA 5.40 - Histograma da contagem de picos. (a) estágio 1. (b) estágio 2. (c) estágio 3.

FONTE: autor, 2017.

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo são mencionadas as conclusões retiradas desta pesquisa, que teve como objetivo analisar a rugosidade e a formação de rebarba após os ensaios de microfresamento no aço AISI D2 temperado e revenido. Nesse sentido pode-se concluir que:

Ensaio pino sobre disco

- Em relação ao comportamento do ensaio pino sobre disco, a temperatura pode ter afetado de maneira significativa os resultados do coeficiente de atrito. Dessa forma, o comportamento oscilatório do coeficiente de atrito do par tribológico metal duro revestido com TiNAl foi decorrente da presença de oxigênio na superfície de deslizamento que conseqüentemente formou óxido de ferro que atuou como lubrificante na interface do par tribológico.
- Por meio da análise do MEV/EDS foi possível identificar os mecanismos de desgaste atuantes e notou-se a presença de adesão, abrasão de dois e três corpos no pino e nas superfícies de deslizamento.

Forças durante o microfresamento

- Foi observado no gráfico obtido para as forças de avanço, apoio e passiva em função do comprimento usinado que a profundidade de usinagem e o avanço por dente foram significativos para a remoção do cavaco por cisalhamento, sendo, o avanço por dente o parâmetro mais significativo para a força passiva evidenciando maior sulcamento do material.

Emissão acústica

- Quando comparada a intensidade dos sinais de emissão acústica da ferramenta no início de vida e na condição desgastada verificou-se que as amplitudes dos sinais de emissão acústica são mais intensas na condição desgastada sugerindo maior sulcamento do material.

Rugosidade

- A ferramenta no início de vida não teve influência na ondulação da superfície. Já a ferramenta na condição desgastada afetou a ondulação devido ao desgaste das arestas de corte.
- O sulcamento na região lateral do canal durante o microfresamento frontal foi proveniente da espessura zero no início e no final do corte.

Rebarba

- A rebarba na entrada e na saída do canal foram mínimas em comparação com as rebarbas de topo. Dessa forma, as rebarbas de topo no sentido concordante foram que apresentaram tamanho mais expressivo de altura e largura de rebarba.
- O maior desgaste da ferramenta ocasionou maior altura e largura de rebarba.

Desgaste da ferramenta

- O gráfico obtido para o desgaste em função do comprimento usinado apresentou um comportamento semelhante com a curva de desgaste de ferramentas da literatura. Além disso, o mecanismo mais evidente de desgaste foi adesão e abrasão.
- Para emissão acústica foram identificados faixas de frequência de deformação plástica do material no estágio 3 sugerindo maior sulcamento do material para a ferramenta na condição mais desgastada.
- A rugosidade e ondulação foram afetadas pela deflexão da ferramenta que ocasionou maiores vibrações.
- Em relação a rebarba, notou-se a mudança na altura da rebarba durante o ensaio de desgaste, ou seja, a altura de rebarba foi influenciada pelo desgaste da aresta de corte que aumentou o sulcamento na lateral do canal.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados neste trabalho representam uma investigação limitada à análise de alguns parâmetros pré-selecionados. Contudo, para dar continuidade a essa linha de pesquisa, é proposto:

- realizar ensaios de microfresamento com diferentes velocidades de corte para avaliar a influência da velocidade de corte na rugosidade, formação de rebarba e no desgaste da ferramenta de corte.
- utilizar fluido de corte durante o microfresamento e investigar a evolução do desgaste da ferramenta durante os ensaios, avaliando a influência do fluido na qualidade superficial dos canais microusinados.
- investigar a influência da trajetória trocoidal durante o microfresamento do aço AISI D2, já que é uma trajetória conhecida na literatura por reduzir os esforços de corte durante o fresamento convencional de aços endurecidos. Assim, poderia trazer benefícios como menores valores de rugosidade, desgaste da ferramenta e altura de rebarba.
- realizar ensaios de tração com emissão acústica para determinar as frequências dominantes da deformação do aço AISI D2 temperado e revenido.
- medir a temperatura durante os ensaios de microfresamento do aço AISI D2 para avaliar a influência da temperatura na qualidade superficial.
- realizar faixas distintas de revenimento para obter diferentes tamanhos de grão e verificar a influência do tamanho do grão na qualidade superficial e no desgaste da microfresa.

8. ABSTRACT

The production of industrialized products is responsible for most of the job posts in the globalized world. Thus, there is a large demand for miniaturization of components and therefore, the micromilling arises as an alternative to manufacture micro die for the large-scale production of microcomponents which are applied in the aeronautic, automotive, electronics and medical industries. The relevance in the study of the AISI D2 steel micromilling in the quenched and tempered condition is due to the problems found out in the micro die surface quality due to of the slopes (undulations) and burrs formation on the micromachined surfaces, which require an additional surface finishing which is impossible in the most condition due to the high costs and accuracy restriction on the manufactured part. The aim of this work is to evaluate the effect of the feed rate and depth of cutting in the milling operation of channels in AISI D2 steel in the hardened condition, in terms of the machined surface quality, burr formation and wear tools in the dry cutting. The analysis was carried out by monitoring of machining forces signals, acoustic emission and the surface characterization by scanning electronic microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and contact profiling. The results indicate that, for all tests carried out, the wear tool has significant influence in the surface roughness and in the formation of burr due to the material ploughing phenomenon and to the tool deflection which caused mechanical vibrations that are detrimental to the surface quality. The depth of cutting and feed rate were significant for the chip removal by shearing stress, being the feed rate the most significant parameter for the material ploughing effect.

Key words: micromilling; AISI D2; wear; roughness; burr.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Air Turbine Spindles. Disponível em:

<< <http://www.airturbinetools.com/spindles/specs/650bt40.html>>> acesso em 24/dez/2017

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, v. 33, n. 4, p. 402–407, 2009.

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 & Manufacture*. v. 48. p. 1578-1584. Elsevier, 2008.

ASTM G99-05 Standard test method for wear testing with pin-on-disk apparatus. ASTM International, West Conshohocken, United States, 2010.

AURICH, J. C., DORNFELD, D., ARRAZOLA, P. J., FRANKE, V., LEITZ, L., MIN, S. Burrs – analysis, control and removal. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. v.58. p.519-542. Elsevier, 2010.

BAJPAI, V.; KUSHWAHA, A. K.; SINGH, R. K. Burr Formation and Surface Quality in High Speed Micromilling of Titanium Alloy (Ti6Al4V). *Volume 2: Systems; Micro and Nano Technologies; Sustainable Manufacturing*. v. 2. 2013.

BIERMANN, D.; KAHNIS, P. Analysis and simulation of size effects in micromilling. *Production Engineering*. v. 4. p. 25–34. 2010.

BIERMANN, D.; STEINER, M. Analysis of micro burr formation in austenitic stainless steel X5CrNi18-10. *Procedia CIRP*. v. 3. p. 97–102, 2012.

BLAU, P. J. *Friction science and technology : from concepts to applications*. 2 ed. CRC Press, 2009.

BOURNE, K. A.; Jun, M. B. G.; Kapoor, S, G.; Devor, R. E.; An Acoustic Emission-Based Method for Determining Contact Between a Tool and Workpiece at the Microscale. *Journal of*

Manufacturing Science and Engineering, v. 130. p. 3110101-3110108. 2008.

CÂMARA, M. A. et al. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. *Journal of Materials Science and Technology*. v. 28. p. 673–685. 2012.

CARDOSO, P.; DAVIM, J. P. A brief review on micromachining of materials. *Reviews on Advanced Materials Science*. v. 30. p. 98–102. 2012.

CARDOSO, P.; DAVIM, J. P. Optimization of surface roughness in micromilling. *Materials and Manufacturing Processes*. v. 25. p. 1115–1119. 2010.

CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 46. p. 313–332. 2006.

CHEN, M. J.; Ni, H. B.; Wang, J. Z.; Jiang, Y. Research on the modeling of burr formation process in micro-ball end milling operation on Ti-6Al-4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v. 62. p. 901–912. 2012.

CHEN, X.; LI, B. Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v. 33. p. 968–976. 2007.

CHENG, K.; HUO, D. *Micro-Cutting: fundamentals and applications*. USA: Wiley. 2013. 366. p. ISBN 978-0-470-97287-8

CHERN, G. L.; Wu, Y. J. E.; Cheng, J. C.; Yao, J. C. Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM. *Precision Engineering*. v. 31. p. 122–129. 2007.

CHRISTIAN, G.; OHTSU, M. *Acoustic Emission Testing*. 1. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008.

COPPEL, R.; Abellan-Nebot, J. V.; Siller, H. R.; Rodriguez, C. A. Adaptive control optimization in micro-milling of hardened steels—evaluation of optimization approaches.

International Journal of Advanced Manufacturing Technology. v. 84. p. 2219–2238. 2016.

DAVIM, J. P. Machining of Hard Materials. 1 Ed., London.: Springer, 2011.

DAVOUDINEJAD, A.; Tosello, G.; Parenti, P.; Annoni, M. 3D Finite Element Simulation of Micro End-Milling by Considering the Effect of Tool Run-Out. p. 1–20. 2017.

OLIVEIRA, F. B. D.; Rodrigues, A. R.; Coelho, R.T.; Souza, A. F. D. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. International Journal of Machine Tools and Manufacture. v. 89. p. 39–54. 2015.

DENKANA, B.; Hoffmeister, H. W.; Reichstein, M.; Illenseer, S. Process development in machining of micro guideways. Microsystem Technologies. v. 10. p. 257–260. 2004.

DIMOV, S. Micromilling strategies: optimization issues. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , Part B : Journal of Engineering Manufacture. v. 218. p. 731–736. 2004.

DING, X.; Jarfors, A. E. W.; Lim, G. C.; Shaw, K. C.; Liu, Y. C.; Tang, L. J. A study of the cutting performance of poly-crystalline oxygen free copper with single crystalline diamond micro-tools. Precision Engineering. v. 36. p. 141–152. 2012.

ELKASEER, A.; Dimov, S.S.; Pham, D. T.; Popov, K. P.; Olejnik, L.; Rosochowski, A. Material microstructure effects in micro-endmilling of Cu99.9E. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. v. 231. p. 2000-2020. 2016.

FERRER, C.; Orozco, M. P. J. Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples. Tribology International. v. 43. p. 1–6. 2010.

FILIZ, S.; Conley, C. M.; Wasserman, B. M.; Ozdoganlar, O. B. An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills. International Journal of Machine Tools and Manufacture. v. 47. p. 1088–1100. 2007.

FRIEDRICH, C. R.; KULKARNI, V. P. Effect of workpiece springback on micromilling forces. Microsystem Technologies, v. 10, n. 6–7, p. 472–477, 2004.

GERMAIN, D.; Fromentin, G.; Poulachon, G. From large-scale to micromachining: A review of force prediction models. *Journal of Manufacturing Processes*. v. 15. p. 389–401. 2013.

JACKSON, M. J.; Novakov, T.; Silva, M. B. D.; Machado, A. R. Predicting chip and non-chip formation when micromachining Ti-6Al-4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v. 91. p. 955-985. 2017.

JEMIELNIAK, K.; ARRAZOLA, P. J. Application of AE and cutting force signals in tool condition monitoring in micro-milling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. v. 1. p. 97–102. 2008.

JIN, X.; ALTINTAS, Y. Prediction of micro-milling forces with finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 212. p. 542–552. 2012.

KANG, I. S.; Kim, J. S.; Kim, J. H.; Kang, M. C.; Seo, Y. W. A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 187–188. p. 250–255. 2007.

KOÇ, M.; ÖZEL, T. *Micro-manufacturing: design and manufacturing of micro-products*. USA: John Wiley & Sons. 2011. 388 p. ISBN 978-0-470-55644-3

KOO, J.; Park, K. H.; Kim, Y. J.; Kim, J. S. Investigation on the Correlation between Micro Burrs and AE Signal Characteristics in Micro-Scale Milling Process A . Experimental method and cutting conditions Spindle speed Feed per tooth Experimental setup. p. 327–330. 2017.

LAI, X.; Li, H.; LI, C.; Lin, Z.; Ni, J. Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 48. p. 1–14, 2008.

LEE, K.; DORNFELD, D. A. Micro-burr formation and minimization through process control. *Precision Engineering*. v. 29. p. 246–252. 2005.

LEKKALA, R.; Bajpai, V.; Singh, R. K.; Joshi, S. S. Characterization and modeling of burr

formation in micro-end milling. *Precision Engineering*. v. 35. p. 625–637, 2011.

LI, H.; Lai, X.; Li, C.; Feng, J.; Ni, J. Modelling and experimental analysis of the effects of tool wear, minimum chip thickness and micro tool geometry on the surface roughness in micro-end-milling. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. v. 18. n. 2. p. 25006. 2007.

LI, P.; OOSTERLING, J. A. J.; HOOGSTRATE, A. M. Design of micro square endmills for hard milling applications. v.59. p. 859–870. 2011.

LIANG, S. Y.; DORNFELD, D. A. Tool Wear Detection Using Time Series Analysis of Acoustic Emission. *Journal of Engineering for Industry*. v. 111. p. 199. 1989.

LIPTAI, R. G.; HARRIS, D. O.; ENGLE, R. B.; TATRO, C. A. Acoustic emission techniques research. *Proceedings of the Symposium on Advanced Experimental Techniques in the Mechanics of Materials*. San Antonio, Texas. 1970

LLANOS, I.; Agirre, A.; Urreta, H.; Thepsonthi, T. Micromilling high aspect ratio features using tungsten carbide tools. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 228. p. 1350–1358. 2014.

MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., da Silva, M. B.; *Teoria da Usinagem dos Materiais*, Editora Blucher, 2009, 384p.

MALEKIAN, M.; Mostofa, M.G.; Park, S.S.; Jun, M.B. G. Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 212. p. 553–559. 2012.

MARINESCU, I.; AXINTE, D. A. A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 48. p. 1148–1160. 2008.

MATHAI, G. Effect of Machining Parameters on Burr Size of Micromilled Foils. *Proceedings of the 7th International Conference on MicroManufacturing*, p. 216–223. 2012.

MIAN, A. J. Size Effect in Micromachining. 2005. 209f. Tese (Doutorado) - School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering - USA, THE UNIVERSITY OF MANCHESTER .

MIAN, A. J.; DRIVER, N.; MATIVENGA, P. T. Identification of factors that dominate size effect in micro-machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 51. p. 383–394. 2011.

PÉREZ, H.; Vizán, A.; Hernandez, J. C.; Guzmán, M. Estimation of cutting forces in micromilling through the determination of specific cutting pressures. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 190. p. 18–22. 2007.

POPOV, K. B.; Dimov, S. S.; Pham, D. T.; Minev, R. M.; Rosochowski, A.; Olejnik, L. Micromilling: material microstructure effects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. v. 220. p. 1807–1813. 2006.

PORTO, A. J. V.(Org.). *Usinagem de ultraprecisão*. São Carlos, S.P. RiMa, FAPESP, 2004. 293p.

PRAKASH, M.; KANTHABABU, M. In-process tool condition monitoring using acoustic emission sensor in microendmilling. *Machining Science and Technology*. v. 17. p. 209–227, 2013.

PRAKASH, M.; KANTHABABU, M.; RAJURKAR, K. P. Investigations on the effects of tool wear on chip formation mechanism and chip morphology using acoustic emission signal in the microendmilling of aluminum alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v. 77. p. 1499–1511. 2015.

SCHALLER, T.; Bohn, L.; Mayer, J.; Schubert, K. Microstructure grooves with a width of less than 50 μm cut with ground hard metal micro end mills. *Precision Engineering*. v. 23. p. 229–235. 1999.

SHAW, M. C. *Metal Cutting Principles*. Second Edi ed. Arizona State University: OXFORD UNIVERSITY PRESS. v. 80. 2005.

SHIZUKA, H.; Okuda, K.; Nunobiki, M.; Inada, Y. Study on Surface Roughness in Micro End Milling of Mold Material. *Advanced Materials Research*. v. 325. p. 594–599. 2011.

SIMONEAU, A.; NG, E.; ELBESTAWI, M. A. Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 46. p. 467–481. 2006.

SINGH, K.; KHATIRKAR, R. K.; SAPATE, S. G. Microstructure evolution and abrasive wear behavior of D2 steel. *Wear*. v. 328–329. p. 206–216. 2015.

SON, S. M.; LIM, H. S.; AHN, J. H. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 45. p. 529–535. 2005.

SREDANOVIC, B.; Lakic, G. G.; Davorin, K.; Kopac, J. Analysis of Micro-Milling of Hardened Tool Steel. *Key Engineering Materials*, v. 686. p. 57–62, 2016.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. *Engineering tribology*, Butterworth-Heinemann, 2005, 832p.

SUN, H.; Gao, D.; Zhao, Z.; Tang, X. An approach to in-process surface texture condition monitoring. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. v. 48. p. 254–262. 2017.

TANG, L.; Gao, C.; Huang, J.; Zhang, H.; Chang, W.; Dry sliding friction and wear behaviour of hardened AISI D2 tool steel with different hardness levels. *Tribology International*. v. 66. p. 165–173. 2013.

UCUN, IRFAN.; ASLANTAS, K.; BEDIR, F. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy. *Wear*. v. 300. p. 8–19, 2013.

URBIKAIN, G.; ARTETXE, E.; LACALLE, L. N. L. Numerical simulation of milling forces with barrel-shaped tools considering runout and tool inclination angles. *Applied Mathematical*

Modelling. v. 47. p. 619–636. 2017.

VENKATESH, V.; Swain, N.; Srinivas, G.; Kumar, P.; Barshilia, H. C. Review on the machining characteristics and research prospects of conventional microscale machining operations. *Materials and Manufacturing Processes*. v. 32. p. 235–262. 2017.

VICTOR, B.; Kudryavtsev, E.; Sarychev, G.; Schavelin, V. *Acoustic Emission in Friction*. 1 ed, Oxford: Elsevier Science, 2007.

WANG, J.; Gong, Y.; Abba, G.; Antoine, J. F.; Shi, J. Chip formation analysis in micromilling operation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v. 45. p. 430–447. 2009.

WANG, W.; KWEON, S. H.; YANG, S. H. A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniaturized machine tool. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 162–163. p. 702–708. 2005.

WEULE, H.; HÜNTRUP, V.; TRITSCHLER, H. Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. v. 50. p. 61–64. 2001.

WU, X.; Li, L.; He, N.; Yao, C.; Zhao, M. Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting. *Precision Engineering*. v. 45. p. 359–364. 2016.

WU, X.; LI, L.; HE, N. Investigation on the burr formation mechanism in micro cutting. *Precision Engineering*. v. 47. p. 191–196. 2017.

ZHOU, L.; Peng, F. Y.; Yan, R.; Yao, P.F.; Yang, C.C. Analytical modeling and experimental validation of micro end-milling cutting forces considering edge radius and material strengthening effects. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 97. p. 29–41. 2015.

ANEXOS

Anexo A -Desenho do corpo de prova dos ensaios de microfresamento

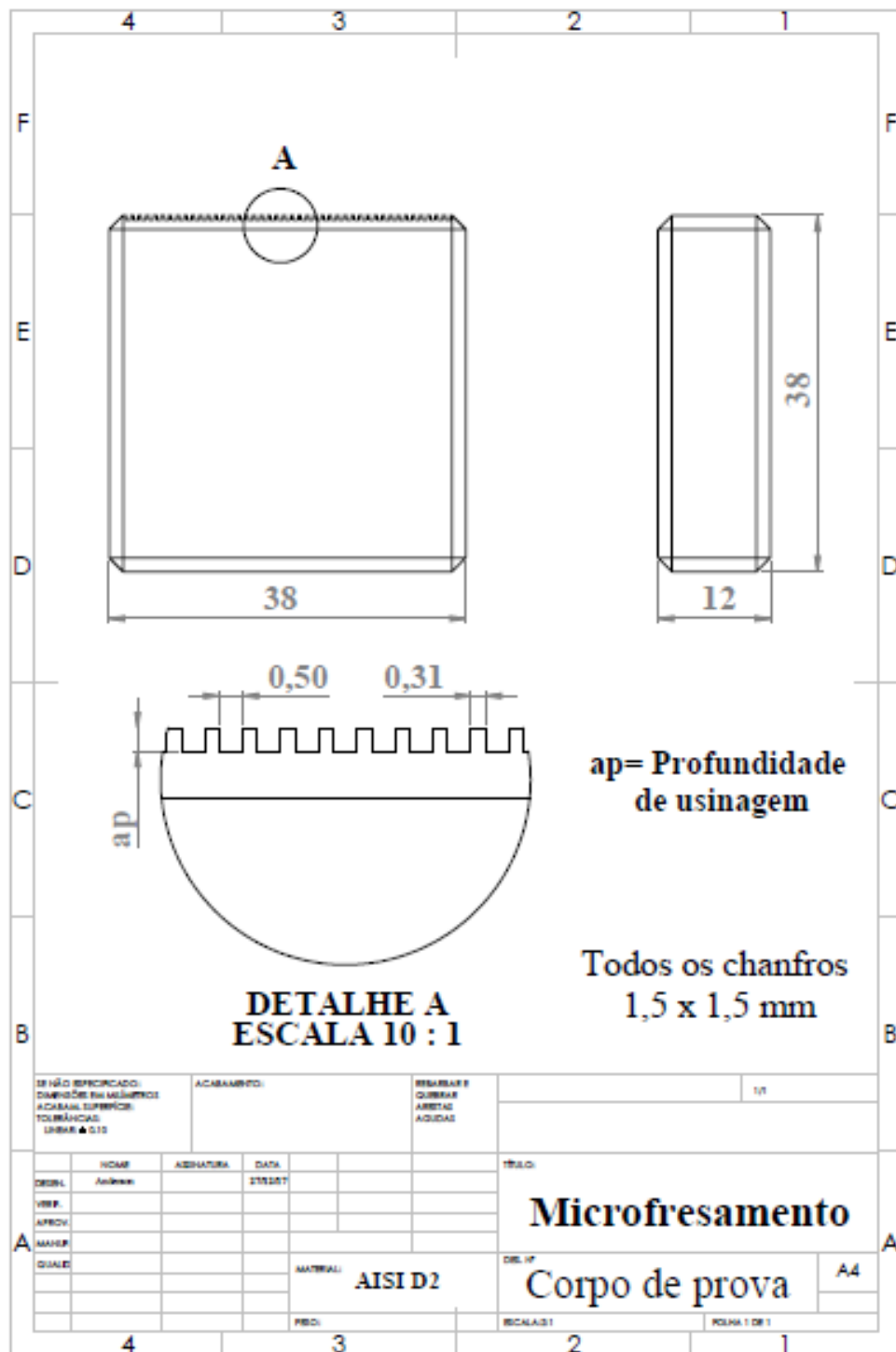


FIGURA A – Desenho técnico do corpo de prova.

FONTE: autor, 2017.

ANEXO B- Imagens do MEV dos cavacos dos ensaios 1, 2, 3, e 4

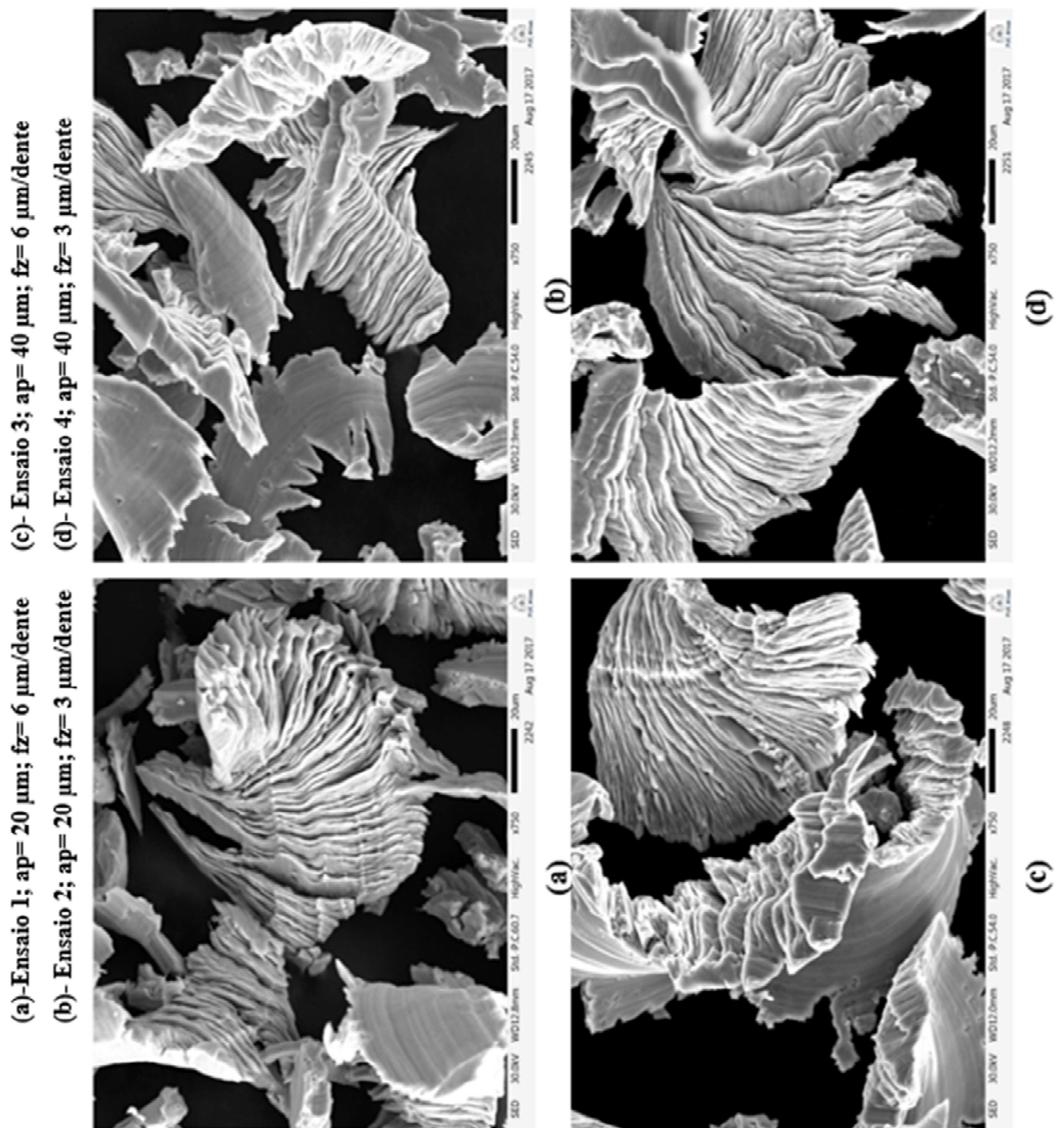


FIGURA B – |Imagens do MEV dos cavacos. (a) Cavacos do Ensaio 1. (b) Cavacos do Ensaio 2. (c) Cavacos do Ensaio 3. (d) Cavacos do Ensaio 4.

FONTE: autor, 2017.

ANEXO C - Imagens do MEV das microfresas dos ensaios 1, 2, 3 e 4.

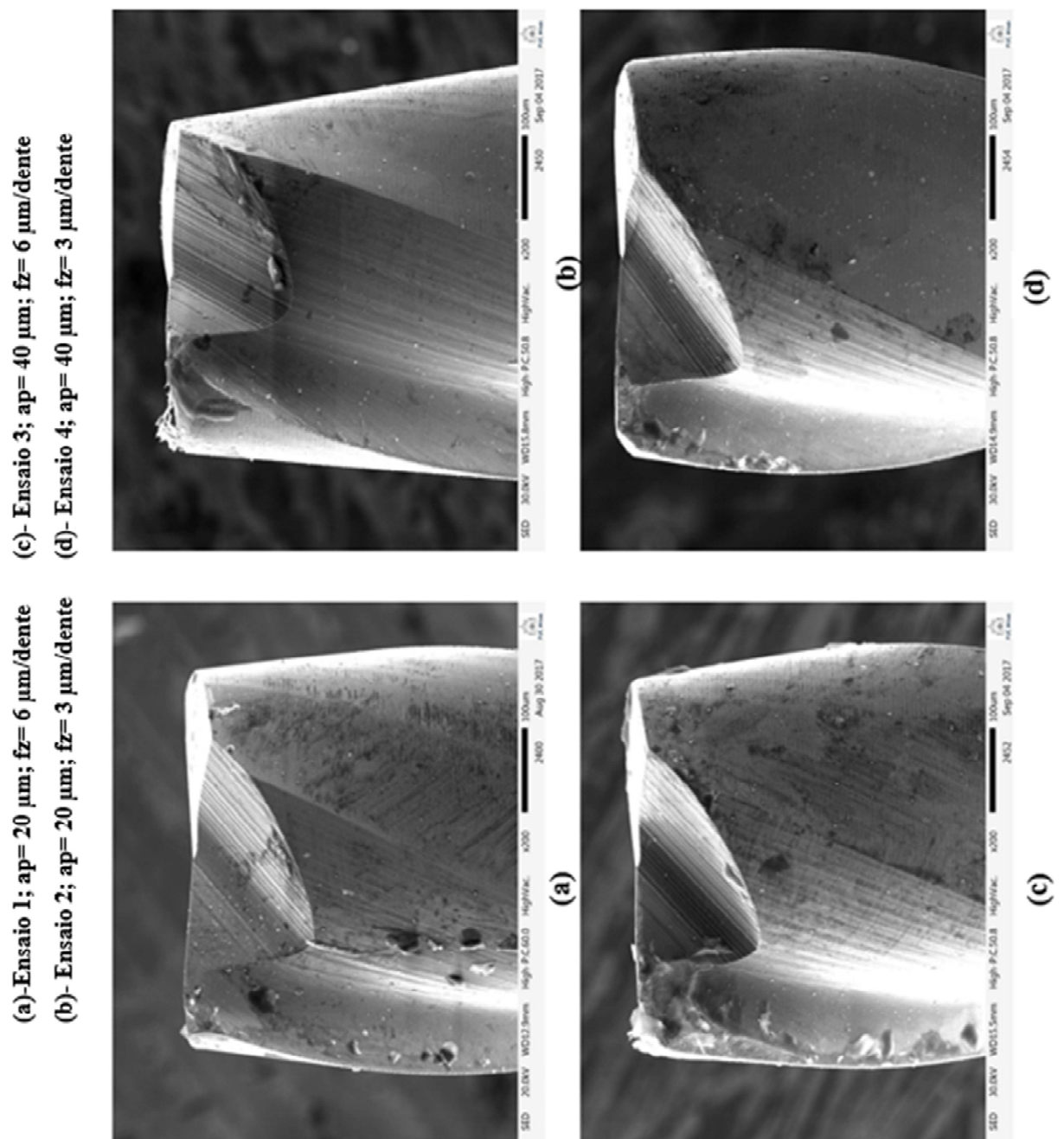


FIGURA C – [Imagens do MEV das microfresas.do (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3. (d) Ensaio 4.

FONTE: autor, 2017.