

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS

**ANÁLISE DE SUPERFÍCIES FRESADAS POR DIFERENTES
ESTRATÉGIAS EM AÇO AISI H13 ENDURECIDO**

GERSON LUIZ NICOLA

Caxias do Sul
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
UCS - BICE - Processamento Técnico

N634a Nicola, Gerson Luiz

Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço
AISI H13 endurecido / Gerson Luiz Nicola. 2008.
xv, 119 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul,
Programa de Pós-Graduação em Materiais, 2008.

“Orientação: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann; Co-
orientação: Prof. Dr. Frank Patrick Missell.”

1. Usinagem – Estratégias. 2. Superfície - Textura. 3. Aço
endurecido. 4. Rugosidade. I. Título.

CDU: 621.7.04

Índice para o catálogo sistemático:

- | | |
|---------------------------|---------------|
| 1. Usinagem – Estratégias | 621.7.04 |
| 2. Superfície – Textura | 620.191 |
| 3. Aço endurecido | 669.14.018.25 |
| 4. Rugosidade | 620.191.35 |

Catalogação na fonte elaborada pela bibliotecária
Márcia Carvalho Rodrigues – CRB 10/1411

GERSON LUIZ NICOLA

ANÁLISE DE SUPERFÍCIES FRESADAS POR DIFERENTES ESTRATÉGIAS EM AÇO
AISI H13 ENDURECIDO.

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em
Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciências
dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

Co-orientador: Prof. Dr. Frank Patrick Missell

Caxias do Sul

2008

**“Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço endurecido
AISI H13 ”.**

Gerson Luiz Nicola

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, Área de Concentração: Processamento e Simulação de Materiais.

Caxias do Sul, 25 de abril de 2008.

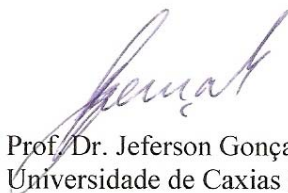
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Frank Patrick Missell
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Jeferson Gonçalves
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Cleiton Rodrigues Teixeira
Fundação Universidade Federal de Rio Grande

AGRADECIMENTOS

Aos amigos e orientadores Prof. Rodrigo Panosso Zeilmann e Prof. Frank Patrick Missell, pelo constante apoio e diretrizes essenciais.

Ao Sr. Wilson O. D'Agostini e Eng. Silvio Marcio Schio da empresa Arwi, distribuidor Sandvik Coromant do Brasil, pela colaboração em ceder as ferramentas de corte para a execução dos procedimentos experimentais.

À empresa TecnoHard e ao Prof. Gilmar Tonietto pelo auxílio no tratamento térmico dos corpos-de-prova.

Ao LTPE – Laboratório de Tecnologia e Pesquisa da Universidade de Caxias do Sul, pela viabilização do uso de equipamentos necessários para a realização dos ensaios e análises.

À Prof. Maria Cecília Salvadori do LFFUSP - Laboratório de Filmes Finos do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, e à Técnica do laboratório Fernanda de Sá Teixeira pelas análise de AFM – Microscopia de Força Atômica.

Ao DIMAT INMETRO RJ – Divisão de Metrologia de Materiais do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial do Rio de Janeiro, em especial à Taeko pelas imagens obtidas através de MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura e ao Cristiano pelas análise de rugosidade.

Ao Prof. Jeferson Gonçalves, pela ajuda no tratamento estatístico dos resultados experimentais.

Aos colegas Juliano Marcon Oliveira e Marcelo Evandro Tedesco, pela amizade e colaboração que ajudaram no trabalho e em especial ao amigo e colega Deives Roberto Baretta, pela força e ajuda na formatação da dissertação.

Aos bolsistas e membros do GUS - Grupo de Usinagem da Universidade de Caxias do Sul pela colaboração e apoio durante o trabalho.

À todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na realização deste trabalho.

Dedico esta dissertação:
Aos meus pais, Doracy (in memorium) e Zulmira, pelo incentivo durante toda a minha vida.
À Claudia, minha esposa, com amor, pelo apoio e compreensão.
À Mariana e Gabriel, meus filhos, com amor e carinho.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | IX |
| ÍNDICE DE TABELAS | XIII |
| ÍNDICE DE SÍMBOLOS E SIGLAS | XIV |
| RESUMO | XVI |
| ABSTRACT | XVII |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO | 1 |
| 1.2 OBJETIVOS | 2 |
| 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO | 2 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 INTRODUÇÃO | 4 |
| 2.2 PROCESSO DE USINAGEM | 4 |
| 2.2.1 <i>Mecânica de corte</i> | 4 |
| 2.2.2 <i>Processo de fresamento</i> | 5 |
| 2.2.3 <i>Geometrias e estratégias de corte</i> | 14 |
| 2.2.4 <i>Determinação dos parâmetros de corte</i> | 18 |
| 2.3 USINAGEM DE MATERIAIS ENDURECIDOS | 22 |
| 2.3.1 <i>Microestrutura</i> | 24 |
| 2.3.2 <i>Tratamento térmico</i> | 25 |
| 2.3.3 <i>Propriedades mecânicas do aço</i> | 27 |
| 2.4 CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES | 30 |
| 2.4.1 <i>Rugosidade</i> | 35 |
| 2.4.2 <i>Microscopia óptica</i> | 41 |
| 2.4.3 <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i> | 42 |
| 2.4.4 <i>Microscopia de força atômica (AFM)</i> | 44 |
| 2.4.5 <i>Outros métodos-tendências</i> | 46 |
| 3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL | 48 |
| 3.1 INTRODUÇÃO | 48 |
| 3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL | 48 |
| 3.2.1 <i>Variáveis de entrada</i> | 48 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2.2 | <i>Variáveis de saída</i> | 55 |
| 3.2.3 | <i>Máquina ferramenta</i> | 56 |
| 3.2.4 | <i>Equipamentos para análise qualitativa e quantitativa das texturas</i> | 56 |
| 3.3 | ENSAIOS PRELIMINARES | 60 |
| 3.3.1 | <i>Resultados ensaios preliminares</i> | 61 |
| 3.4 | ENSAIOS EFETIVOS | 65 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 69 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO..... | 69 |
| 4.2 | ANÁLISE DE RUGOSIDADE | 69 |
| 4.3 | ANÁLISE DE RUGOSIDADE (INMETRO)..... | 72 |
| 4.4 | ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE RUGOSIDADE..... | 75 |
| 4.5 | ANÁLISE DE TEXTURA ATRAVÉS DE MICROSCOPIA ÓPTICA..... | 76 |
| 4.6 | ANÁLISE DA TEXTURA ATRAVÉS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)..... | 79 |
| 4.7 | ANÁLISE DE TEXTURA ATRAVÉS DE MICROSCOPIA DE FORÇA ATÔMICA (AFM)..... | 82 |
| 5 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS | 87 |
| 5.1 | CONCLUSÕES GERAIS..... | 87 |
| 5.1.1 | <i>Conclusões relativas a influência da estratégia de corte na formação da textura</i> | 87 |
| 5.1.2 | <i>Conclusões relativas a medição de rugosidade</i> | 88 |
| 5.1.3 | <i>Conclusões relativas aos métodos utilizados na análise da textura</i> | 88 |
| 5.2 | SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS | 89 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 91 |
| | ANEXOS | 96 |
| | ANEXO 1 RUGOSIDADE ENSAIOS PRELIMINARES..... | 97 |
| | ANEXO 2 RUGOSIDADE ENSAIOS EFETIVOS..... | 99 |
| | ANEXO 3 ANÁLISE ESTATÍSTICA | 113 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1- MECANISMO DE CORTE EM REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA E FOTOGRAFIA [3]..... | 5 |
| FIGURA 2- MOVIMENTO DA FERRAMENTA EM CORTE ESTÁVEL (A) E NÃO-ESTÁVEL (B)[8]..... | 8 |
| FIGURA 3 – MOVIMENTO CONCORDANTE E DISCORDANTE DA FERRAMENTA [11]..... | 9 |
| FIGURA 4- SUPERFÍCIE USINADA COM FRESA DE TOPO ESFÉRICO E DETALHE DA SEÇÃO DE CORTE [14] | 10 |
| FIGURA 5– INTERVALOS DE INCREMENTO E AVANÇO NO ACABAMENTO | 11 |
| FIGURA 6- ESTRATÉGIAS DE CORTE: A) VERTICAL ASCENDENTE, B) VERTICAL DESCENDENTE, C) HORIZONTAL ASCENDENTE, E D) HORIZONTAL DESCENDENTE [30]..... | 18 |
| FIGURA 7 – FRESA EM POSIÇÃO DE ENGAJAMENTO: A) PLANO INCLINADO E TRAJETÓRIA DESCENDENTE, B) PLANO INCLINADO E TRAJETÓRIA ASCENDENTE, E C) PLANO NORMAL [33]..... | 20 |
| FIGURA 8-TOPOGRAFIA SIMULADA DE SUPERFÍCIE USINADA COM FRESA ESFÉRICA [13]E FOTOGRAFIA DE TEXTURA | 21 |
| FIGURA 9 - TOPOGRAFIA SIMULADA COM VARIAÇÃO DE RELAÇÃO A_E / F_Z : A) $A_E / F_Z \neq 1$; B) $A_E / F_Z = 1$ [35] | 21 |
| FIGURA 10– (A) AUSTENITA ($Fe\gamma$ - CFC), (B) FERRITA ($Fe\alpha$ – CCC), (C) MARTENSITA (CÉLULA TETRAGONAL DE CORPO CENTRADO) [39]..... | 24 |
| FIGURA 11– EXEMPLO DE MICROESTRUTURA MARTENSÍTICA (1000X)[40]..... | 25 |
| FIGURA 12 - REARRANJO ATÔMICO ACOMPANHADO DE MOVIMENTO DE DISCORDÂNCIA [39] | 27 |
| FIGURA 13 - DUREZA HR_B : A) PENETRADOR DE FORMA ESFÉRICA; B) INDENTAÇÃO | 29 |
| FIGURA 14 – DUREZA HR_C : A) PENETRADOR EM FORMA DE CONE; B) INDENTAÇÃO..... | 29 |
| FIGURA 15 – DUREZA HV: A) PENETRADOR EM FORMA DE PIRÂMIDE; B) INDENTAÇÃO | 30 |
| FIGURA 16– TOPOGRAFIA E CAMADAS SUPERFICIAIS DE UMA PEÇA USINADA [45]..... | 31 |
| FIGURA 17 - EXEMPLOS DE PERFIS GEOMÉTRICO, REAL E EFETIVO [44]..... | 31 |
| FIGURA 18 - SEÇÃO SIMULADA DA SUPERFÍCIE DE UMA PEÇA COM SUAS CAMADAS INFERIORES [49] | 33 |
| FIGURA 19 – COMPOSIÇÃO DA SUPERFÍCIE: A) REPRESENTAÇÃO; B) COMPONENTES BÁSICOS SOBREPOSTOS [51].. | 34 |
| FIGURA 20 - DIREÇÃO DE MEDIÇÃO: A) SULCOS ORDENADOS; B) SULCOS NÃO-ORDENADOS [32] | 35 |
| FIGURA 21 - PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE RUGOSÍMETROS COM APALPADOR MECÂNICO..... | 36 |
| FIGURA 22 – COMPRIMENTO TOTAL DE AVALIAÇÃO L_M E COMPRIMENTO DE AMOSTRAGEM L_E [56]..... | 37 |
| FIGURA 23 – PARÂMETRO R_A : A) PERFIL REAL; B) PERFIL COM VALORES ABSOLUTOS; C) LINHA VALOR R_A [56].. | 39 |
| FIGURA 24 – SUPERFÍCIES COM VALORES SIMILARES DE R_A E DIFERENTES PARA R_z E R_y [50]..... | 40 |
| FIGURA 25 - PARÂMETRO DE RUGOSIDADE R_z [56]..... | 40 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 26- PARÂMETRO DE RUGOSIDADE R_v [56] | 41 |
| FIGURA 27- EXEMPLO DE IMAGEM OBTIDA POR MICROSCOPIA ÓPTICA E CÂMERA CCD [58] | 42 |
| FIGURA 28- EXEMPLO IMAGEM OBTIDA POR MEV [58] | 43 |
| FIGURA 29- ELEMENTOS BÁSICOS DE UM MEV [TENTARDINI, 2000] | 44 |
| FIGURA 30- ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM MICROSCÓPIO DE FORÇA ATÔMICA [44] | 45 |
| FIGURA 31- EXEMPLO DE IMAGEM OBTIDA POR AFM [IFUSP 2005] | 46 |
| FIGURA 32- PLANO INCLINADO A 60° E DIFERENTES TRAJETÓRIAS DE CORTE. | 49 |
| FIGURA 33- MICRO-ESTRUTURA DO MATERIAL: A) ANTES DO TRATAMENTO TÉRMICO ; B) APÓS TRATAMENTO TÉRMICO | 51 |
| FIGURA 34- CORPO-DE-PROVA COM INDICAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DE DUREZA..... | 52 |
| FIGURA 35- FIXAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA: A) DISPOSITIVO DE PLANO INCLINADO; B) CP ASSENTADO NO DISPOSITIVO; C) CP FIXADO NA MORSA MECÂNICA..... | 52 |
| A FIGURA 36- HASTE DA FERRAMENTA E O INSERTO INTERCAMBIÁVEL [SANDVIK, 2005]..... | 54 |
| FIGURA 37- FOTOS DO INSERTO: A) JUNTO À HASTE; B) DETALHE DO GUME; C) TOPO COM OS DOIS GUMES | 54 |
| FIGURA 38- FOTOGRAFIA DA FIXAÇÃO DA FERRAMENTA COM DETALHE PARA O BALANÇO DA FERRAMENTA | 54 |
| FIGURA 39- MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE COM AS POSIÇÕES DE APALPAMENTO NAS DIREÇÕES DO AVANÇO (F_z) E INCREMENTO LATERAL (A_E): A) ESTRATÉGIAS HORIZONTAIS; B) ESTRATÉGIAS VERTICAIS..... | 55 |
| FIGURA 40- FOTOGRAFIA DA MÁQUINA-FERRAMENTA DYNA MYTE DM4500 | 56 |
| FIGURA 41- FOTOGRAFIA DO RUGOSÍMETRO MITUTOYO SJ-301 | 57 |
| FIGURA 42- FOTOGRAFIA DO MICROSCÓPIO NIKON EPIHOT 200..... | 57 |
| FIGURA 43- FOTOGRAFIA DO MICROSCÓPIO DE FORÇA ATÔMICA (LFF-USP) | 58 |
| FIGURA 44- FOTOGRAFIAS DOS EQUIPAMENTO: A) DEKTAK 6M COMPLETO; B)MESA DO EQUIPAMENTO COM O DIPOSITIVO ÓPTICO E C) TELA COM POSICIONAMENTO DO APALPADOR SOBRE A AMOSTRA (INMETRO) | 59 |
| FIGURA 45- FOTOGRAFIA MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA FEI QUANTA 200 (INMETRO)..... | 59 |
| FIGURA 46- CORPOS-DE-PROVA UTILIZADOS NOS ENSAIOS PRELIMINARES E AS REGIÕES USINADAS EM CADA CONDIÇÃO: A) ESTRATÉGIA HORIZONTAL; B) ESTRATÉGIA VERTICAL | 61 |
| FIGURA 47- GRÁFICO COM VALORES DE RUGOSIDADE OBTIDOS COM A CONDIÇÃO A..... | 62 |
| FIGURA 48- GRÁFICO COM VALORES DE RUGOSIDADE OBTIDOS COM A CONDIÇÃO B | 62 |
| FIGURA 49- GRÁFICO COM VALORES DE RUGOSIDADE OBTIDOS COM A CONDIÇÃO C | 62 |
| FIGURA 50- GRÁFICO COM VALORES DE RUGOSIDADE OBTIDOS COM A CONDIÇÃO D..... | 62 |
| FIGURA 51- FOTOGRAFIAS DA TEXTURA DAS SUPERFÍCIES USINADAS NA CONDIÇÃO A, MAGNIFICAÇÃO DE 200 x 63 | |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 52- FOTOGRAFIAS DA TEXTURA DAS SUPERFÍCIES USINADAS NA CONDIÇÃO B, MAGNIFICAÇÃO DE 200 X 64 | |
| FIGURA 53- FOTOGRAFIAS DA TEXTURA DAS SUPERFÍCIES USINADAS NA CONDIÇÃO C, MAGNIFICAÇÃO DE 200 X 64 | |
| FIGURA 54- FOTOGRAFIAS DA TEXTURA DAS SUPERFÍCIES USINADAS NA CONDIÇÃO D, MAGNIFICAÇÃO DE 200 X 64 | |
| FIGURA 55- CORPOS-DE-PROVA DOS ENSAIOS COM E AS REGIÕES USINADAS EM CADA CONDIÇÃO: A) ESTRATÉGIA HORIZONTAL; B) ESTRATÉGIA VERTICAL..... | 66 |
| FIGURA 56- FOTOGRAFIA DA VERIFICAÇÃO DO BATIMENTO DA FERRAMENTA | 67 |
| FIGURA 57- FOTOGRAFIA DA FERRAMENTA E CP DURANTE A EXECUÇÃO DO ENSAIO NA ESTRATÉGIA VERTICAL ASCENDENTE (VS)..... | 68 |
| FIGURA 58- GRÁFICO COM VALORES DE RUGOSIDADE MEDIDOS NO CP 2 (1º ENSAIO) | 70 |
| FIGURA 59- GRÁFICO COM VALORES DE RUGOSIDADE MEDIDOS NO CP 3 (RÉPLICA 1)..... | 70 |
| FIGURA 60- GRÁFICO COM VALORES DE RUGOSIDADE MEDIDOS NO CP 4 (RÉPLICA 2)..... | 70 |
| FIGURA 61- REGIÃO DE CONTATO DA FRESA COM O PLANO INCLINADO | 71 |
| FIGURA 62- GRÁFICO COM VALORES DE RUGOSIDADE (INMETRO)..... | 73 |
| FIGURA 63- GRÁFICO DO PERFIL DE RUGOSIDADE, ESTRATÉGIA HS..... | 74 |
| FIGURA 64- GRÁFICO DO PERFIL DE RUGOSIDADE, ESTRATÉGIA HD..... | 74 |
| FIGURA 65- GRÁFICO DO PERFIL DE RUGOSIDADE, ESTRATÉGIA VS..... | 74 |
| FIGURA 66- GRÁFICO DO PERFIL DE RUGOSIDADE, ESTRATÉGIA VD..... | 74 |
| FIGURA 67- FOTOGRAFIAS DA TEXTURA ESTRATÉGIA HS, COM MAGNIFICAÇÃO DE 50, 100 E 200 X..... | 77 |
| FIGURA 68- FOTOGRAFIAS DA TEXTURA ESTRATÉGIA HD, COM MAGNIFICAÇÃO DE 50, 100 E 200 X | 77 |
| FIGURA 69- FOTOGRAFIAS DA TEXTURA ESTRATÉGIA VS, COM MAGNIFICAÇÃO DE 50, 100 E 200 X..... | 78 |
| FIGURA 70- FOTOGRAFIAS DA TEXTURA ESTRATÉGIA VD, COM MAGNIFICAÇÃO DE 50, 100 E 200 X | 78 |
| FIGURA 71- IMAGENS OBTIDAS DE MEV, ESTRATÉGIA HS COM MAGNIFICAÇÃO DE 50, 100, 200 E 500 X..... | 79 |
| FIGURA 72- IMAGENS OBTIDAS DE MEV, ESTRATÉGIA HD COM MAGNIFICAÇÃO DE 50, 100, 200 E 500 X..... | 80 |
| FIGURA 73- IMAGENS OBTIDAS DE MEV, ESTRATÉGIA VS COM MAGNIFICAÇÃO DE 50, 100 E 500 X | 80 |
| FIGURA 74- IMAGENS OBTIDAS DE MEV, ESTRATÉGIA VD COM MAGNIFICAÇÃO DE 50, 100, 200 E 500 X..... | 81 |
| FIGURA 75- IMAGENS AFM COM TOPOGRAFIA 2D E 3D, NA ESTRATÉGIA HS..... | 83 |
| FIGURA 76- IMAGENS AFM COM TOPOGRAFIA 2D E 3D, NA ESTRATÉGIA HD | 84 |
| FIGURA 77- IMAGENS AFM COM TOPOGRAFIA 2D E 3D, NA ESTRATÉGIA VS | 85 |
| FIGURA 78- IMAGENS AFM COM TOPOGRAFIA 2D E 3D, NA ESTRATÉGIA VD | 85 |
| FIGURA 79- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP2, ESTRATÉGIA HS NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 101 |
| FIGURA 80- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP2, ESTRATÉGIA HD NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 102 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 81- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP2, ESTRATÉGIA VS NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 103 |
| FIGURA 82- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP2, ESTRATÉGIA VD NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 104 |
| FIGURA 83- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP3, ESTRATÉGIA HS NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 105 |
| FIGURA 84- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP3, ESTRATÉGIA HD NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 106 |
| FIGURA 85- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP3, ESTRATÉGIA VS NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 107 |
| FIGURA 86- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP3, ESTRATÉGIA VD NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 108 |
| FIGURA 87- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP4, ESTRATÉGIA HS NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 109 |
| FIGURA 88- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP4, ESTRATÉGIA HD NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 110 |
| FIGURA 89- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP4, ESTRATÉGIA VS NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 111 |
| FIGURA 90- GRÁFICOS DE RUGOSIDADE E PERFIL PARA O CP4, ESTRATÉGIA VD NAS DIREÇÕES DO A_E E F_Z | 112 |
| FIGURA 91- GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL DE RESÍDUOS PARA O PARÂMETRO R_A | 115 |
| FIGURA 92- GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL DE RESÍDUOS PARA O PARÂMETRO R_Y | 115 |
| FIGURA 93- GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL DE RESÍDUOS PARA O PARÂMETRO R_Z | 116 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| TABELA 1 - DESVIO DE FORMA EM SUPERFÍCIES TÉCNICAS SEGUNDO A NORMA [DIN 4760][46]..... | 32 |
| TABELA 2 – COMPRIMENTO TOTAL DE AVALIAÇÃO E DE AMOSTRAGEM PARA R_A , CONFORME NORMA DIN [57]... 38 | 38 |
| TABELA 3 – COMPRIMENTO TOTAL DE AVALIAÇÃO E DE AMOSTRAGEM PARA R_z , CONFORME NORMA DIN [57]... 38 | 38 |
| TABELA 4 - VALORES TÍPICOS DE RUGOSIDADE MÉDIA PARA SUPERFÍCIES DE ENGENHARIA [52]..... | 39 |
| TABELA 5- COMPOSIÇÃO QUÍMICA PERCENTUAL DO AÇO AISI H13 | 50 |
| TABELA 6– VALORES DE DUREZA MEDIDOS NOS CORPOS-DE-PROVA | 52 |
| TABELA 7- FERRAMENTA DE CORTE UTILIZADA NOS ENSAIOS | 53 |
| TABELA 8- PARÂMETROS DE CORTE EMPREGADOS NOS ENSAIOS PRELIMINARES | 60 |
| TABELA 9- PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS NOS ENSAIOS EFETIVOS | 65 |
| TABELA 10- RAIOS EFETIVOS DE CONTATO DA FERRAMENTA COM O CP..... | 66 |
| TABELA 11- SEQÜÊNCIA DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS | 67 |
| TABELA 12- VALORES DE RUGOSIDADE | 72 |
| TABELA 13- RUGOSIDADE MÉDIA OBTIDA NOS ENSAIOS PRELIMINARES | 98 |
| TABELA 14- RUGOSIDADE MÉDIA OBTIDA NOS ENSAIOS EFETIVOS..... | 100 |
| TABELA 15- TABELA DE DADOS DE RUGOSIDADE R_A PARA TRATAMENTO ESTATÍSTICO | 114 |
| TABELA 16- TABELA DE DADOS DE RUGOSIDADE R_y PARA TRATAMENTO ESTATÍSTICO | 114 |
| TABELA 17- TABELA DE DADOS DE RUGOSIDADE R_z PARA TRATAMENTO ESTATÍSTICO..... | 115 |
| TABELA 18- GRANDEZAS E RESULTADOS ANOVA PARA O PARÂMETRO R_A NA DIREÇÃO DE F_z | 116 |
| TABELA 19- GRANDEZAS E RESULTADOS ANOVA PARA O PARÂMETRO R_A NA DIREÇÃO DE A_E | 116 |
| TABELA 20- GRANDEZAS E RESULTADOS ANOVA PARA O PARÂMETRO R_y NA DIREÇÃO DE F_z | 116 |
| TABELA 21- GRANDEZAS E RESULTADOS ANOVA PARA O PARÂMETRO R_y NA DIREÇÃO DE A_E | 117 |
| TABELA 22- GRANDEZAS E RESULTADOS ANOVA PARA O PARÂMETRO R_z NA DIREÇÃO DE F_z | 117 |
| TABELA 23- GRANDEZAS E RESULTADOS ANOVA PARA O PARÂMETRO R_z NA DIREÇÃO DE A_E | 117 |
| TABELA 24- VALORES DE MDS PARA O PARÂMETRO R_A NA DIREÇÃO DE F_z | 117 |
| TABELA 25- VALORES DE MDS PARA O PARÂMETRO R_A NA DIREÇÃO DE A_E | 118 |
| TABELA 26- VALORES DE MDS PARA O PARÂMETRO R_y NA DIREÇÃO DE F_z | 118 |
| TABELA 27- VALORES DE MDS PARA O PARÂMETRO R_y NA DIREÇÃO DE A_E | 118 |
| TABELA 28- VALORES DE MDS PARA O PARÂMETRO R_z NA DIREÇÃO DE F_z | 118 |
| TABELA 29- VALORES DE MDS PARA O PARÂMETRO R_z NA DIREÇÃO DE A_E | 119 |

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E SIGLAS

| | |
|-----------------|--|
| a_e | Incremento ou passo lateral; penetração de trabalho; engajamento [mm] |
| a_p | Profundidade de corte; penetração passiva; ou profundidade de corte axial [mm] |
| AFM | Microscópio de força atômica (<i>Atomic Force Microscope</i>) |
| ANOVA | Análise de variância (<i>analysis of variance</i>) |
| AISI | <i>American Iron and Steel Institute</i> |
| C | Centro da fresa de ponta esférica |
| CAD | Projeto auxiliado por computador (<i>Computer Aided Design</i>) |
| CAE | Engenharia auxiliada por computador (<i>Computer Aided Engineering</i>) |
| CAM | Manufatura auxiliada por computador (<i>Computer Aided Manufacturing</i>) |
| CNC | Controle Numérico Computadorizado |
| CP | Corpo-de-prova |
| d | Diâmetro [mm] |
| d_e | Diâmetro efetivo [mm] |
| $d_{ef. médio}$ | Diâmetro efetivo médio [mm] |
| DIN | Norma DIN (<i>Deutsches Institut für Normung</i>) |
| E | Ponta da fresa de ponta esférica |
| F | Avanço de máquina [mm/min] |
| F | Tabela de distribuição de probabilidade |
| f | Avanço [mm] |
| f_z | Avanço por gume [mm] |
| F_0 | Valor de probabilidade calculado |
| H_0 | Hipótese nula |
| H_1 | Hipótese alternativa |
| HD | Horizontal descendo |
| HRc | Dureza rockwell c |
| HS | Horizontal Subindo |
| HV10 | Dureza Vickers com carga de 10 Kgf |
| ISO | Norma ISO (<i>International Standard Organization</i>) |
| L_e | Comprimento da amostragem (<i>cut-off</i>) [mm] |
| L_m | Comprimento total na medição de rugosidade ($5 \times L_e$) [mm] |
| MD | Metal-duro |
| MDS | Mínima diferença significativa |
| MEV | Microscópio eletrônico de varredura |
| n | Frequência; rotações por minuto [rpm] |

| | |
|-------------|---|
| NX4 | Versão do software CAD/CAM |
| PVD | Deposição física de vapor (<i>Physical Vapor Deposition</i>) |
| R | Raio [mm] |
| R_a | Rugosidade média |
| R_y | Rugosidade máxima entre os cinco comprimentos de amostragem (L_e) |
| R_z | Rugosidade máxima média entre os cinco comprimentos de amostragem (L_e) |
| TiAlN | Nítreto de titânio/alumínio |
| TiAlCN | Carbonitreto de titânio/alumínio |
| UGS | Unigraphics Solutions |
| v_c | Velocidade de corte [m/min] |
| v_f | Velocidade de avanço; avanço de mesa da máquina [mm/min] |
| VD | Vertical descendo |
| VS | Vertical subindo |
| X | Eixo X de um sistema de coordenadas cartesiano |
| Y | Eixo Y de um sistema de coordenadas cartesiano |
| Z | Eixo Z de um sistema de coordenadas cartesiano |
| z | Número de gumes |
| σ | Desvio padrão da amostra |
| λ_c | Comprimento da amostragem (<i>cut-off</i>) [mm] |
| θ | Ângulo [°] |
| δ | Ângulo de inclinação [°] |

RESUMO

NICOLA, Gerson Luiz. Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço AISI H13 endurecido, 2008, 119p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) Programa de Pós-Graduação em Materiais, UCS, Caxias do Sul.

Na usinagem de acabamento de superfícies complexas de forma livre, comumente empregada na fabricação de moldes e matrizes, o conhecimento das condições de corte e estratégias adequadas para o fresamento de material endurecido podem proporcionar a obtenção de superfícies de melhor qualidade e controle dimensional, além de uma redução significativa nos tempos e custos de fabricação. O objetivo deste trabalho é analisar a formação da textura no fresamento de materiais endurecidos, através da avaliação quantitativa e qualitativa, quanto a rugosidade, regularidade e formação da superfície. Para estudar este fenômeno foi empregada uma ferramenta de ponta esférica com inserto intercambiável. Os experimentos foram realizados utilizando-se corpos-de-prova de aço AISI H13 na dureza de 54 HR_C, posicionados a uma inclinação de 60°, empregando-se condições de corte fixas e quatro diferentes estratégias de usinagem, com trajetórias de corte horizontal e vertical, ascendente ou descendente em relação ao plano inclinado. Para sua caracterização, as superfícies usinadas foram submetidas à medição de rugosidade e métodos distintos para a visualização e obtenção de imagens da textura, sendo eles: microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia de força atômica (AFM). Foi possível constatar através dos valores de rugosidade e imagens topográficas das superfícies usinadas que as texturas resultantes mostram nitidamente a influência da estratégia de corte empregada, caracterizando-se distintamente. As texturas analisadas revelam um padrão uniforme e repetitivo, com exceção à estratégia vertical ascendente (VS), que originou uma textura irregular e indefinida, onde as marcas de passagem da ferramenta não se apresentam nítidas. Para esta condição observou-se na superfície usinada a presença de material deformado e aderido, apresentando a maior rugosidade, sendo que as menores rugosidades foram medidos para a estratégia vertical descendente (VD).

Palavras-chave: Estratégias de usinagem, Textura de superfície, Rugosidade, Aço endurecido

ABSTRACT

NICOLA, Gerson Luiz. Analysis of milling surfaces by different cutting path strategies in hardened AISI H13 steel, 2008, 119p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) Programa de Pós-Graduação em Materiais, UCS, Caxias do Sul.

In the final milling process of free form surfaces, commonly employed in the production of molds and dies, the knowledge of the cutting conditions and a strategy for choosing adequate processing routes in the milling of hardened materials can provide superior surface quality and dimensional control and a significant reduction in the manufacturing times and costs. The objective of this work is to understand the texture formation in the milling of hardened materials, through the quantitative and qualitative evaluation of the surface roughness, as well as the formation and the regularity of the surfaces. The tool used in these experiments was an interchangeable insert tungsten carbide, ball nose end mill. AISI H13 steel with a final hardness of 54 HR_C was used throughout the experimental work. The workpiece was fixed on a device with an inclination of 60 degrees. The same cutting conditions were used for all the tests and four cutting strategies were considered, as defined by the trajectory of the tool, upward and downward, in the horizontal and vertical directions. To characterize the machined surfaces, the roughness was measured and other different methods for the visualization of the surface texture were employed, such as, the optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM). It was possible to observe, through the values of roughness and the topographic images of the machined areas, that the resulting textures clearly show the influence of the cutting strategy employed, distinctly characterized. The textures analyzed show a consistent and repetitive pattern, except the vertical upward strategy (VS) that resulted in an irregular and undefined texture, where the tool marks are unclear. For this condition the presence of plastically deformed material and accretions were observed in the machined surface, with presented the highest roughness value. The lowest roughness values were measured for the downward vertical strategy (VD).

Keywords: Cutting path, Surface texture, Roughness, Hardened steel

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa do trabalho

O progresso e os avanços tecnológicos acerca de projetos de moldes e matrizes, ferramentas de corte, máquinas-ferramenta e sistemas computacionais dedicados ao projeto e manufatura (CAD/CAM - *Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing*), têm tornado a usinagem de materiais endurecidos uma prática que oferece vantagens no processo e no resultado final do produto usinado, proporcionando ganho em qualidade superficial e controle dimensional. Uma das expectativas em relação à usinagem de aço endurecido, na produção de moldes e matrizes, é gerar superfícies precisas e de alta qualidade que aliadas à redução dos tempos de fabricação proporcione um alívio para o setor de operações de acabamento manuais. É possível reduzir retrabalhos, a exemplo de polimento, em superfícies endurecidas submetidas ao processo de fresamento [1].

A pesquisa da usinagem de acabamento de aços temperados está relacionada com o desenvolvimento das estratégias de usinagem aplicadas. A vantagem competitiva é evidenciada pela precisão dimensional alcançada e pela melhoria da integridade superficial, objetivando a diminuição ou até mesmo a eliminação do acabamento manual [2].

No processo de usinagem de acabamento em geometrias complexas de formas livres (*free-forms*), a textura superficial resultante e sua caracterização são importantes para a obtenção de superfícies de melhor qualidade. O tipo e a qualidade da textura dependem de inúmeros parâmetros, dentre eles, a natureza do material e sua microestrutura e o processo de fabricação empregado. O conhecimento das condições e a escolha de processos adequados proporcionam uma redução significativa nos tempos de fabricação. As máquinas equipadas com controle numérico computadorizado (CNC) têm os movimentos relativos peça-ferramenta e suas estratégias, definidos por um programador. O conhecimento da melhor

estratégia de usinagem para uma condição específica, bem como a caracterização da superfície obtida são de grande valia para os programadores na fase de definição do processo. A escolha das estratégias corretas de fresamento para a programação CNC exerce grande influência sobre o resultado da usinagem, tanto qualitativa quanto econômica [1].

Este trabalho propõe um estudo para um melhor entendimento do comportamento da formação da superfície do material aço AISI H13 endurecido, quando submetido a um processo de fabricação de fresamento de acabamento. O processo origina uma textura superficial que depende da natureza e propriedades do material e das variáveis do processo de usinagem.

1.2 Objetivos

O trabalho proposto tem por objetivo geral a análise da textura superficial de um aço endurecido, após ser submetido a um processo de fresamento de acabamento.

Para alcançar o objetivo geral, delinear-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a fotografia das texturas visualmente, considerando as superfícies obtidas por diferentes estratégias de fresamento (*tool path*).
- Quantificar as texturas por intermédio de alguns parâmetros de rugosidade, representativos em relação a microgeometria.
- Analisar a formação da superfície, considerando a mecânica de corte, possíveis deformações, microtrincas e adesões no material.

1.3 Estrutura do trabalho

Para atender aos objetivos propostos, esse trabalho foi constituído com uma revisão bibliográfica (Capítulo 2) sobre os seguintes temas: Obtenção de superfícies por usinagem, Materiais endurecidos e Caracterização de superfícies. O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento experimental realizado, com o planejamento dos ensaios definindo as

variáveis envolvidas e a execução dos mesmos. No Capítulo 4, serão discutidos os resultados obtidos, relacionando as texturas obtidas, analisando-se qualitativa e quantitativamente, através das técnicas de análise adotadas: medição de rugosidade, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia de força atômica (AFM). E, por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais e específicas desse trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica realizada para dar apoio ao entendimento dos conceitos envolvidos nesse trabalho. São apresentados os conceitos de usinagem por fresamento para a obtenção de superfícies, materiais endurecidos e caracterização de superfícies através das técnicas empregadas neste trabalho.

2.2 Processo de usinagem

O termo usinagem aplica-se a todos os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco. Cavaco é a porção de material da peça retirada pela ferramenta e se caracteriza por apresentar forma irregular [3]. A usinagem tem por objetivo conferir forma, dimensões e acabamento em um material bruto através da ação de uma ferramenta pela remoção controlada de cavaco [4].

2.2.1 Mecânica de corte

O mecanismo de remoção de material e formação da superfície é ilustrado na Figura 1, onde a representação mostra uma deformação plástica contínua dividida em regiões [3]. A configuração estrutural na peça (a) passa, por cisalhamento (zona de cisalhamento), para a configuração estrutural do cavaco (b). Na usinagem de aços endurecidos pode ocorrer uma deformação plástica na região de cisalhamento que leva à separação do material. Se o material tem, no entanto, uma capacidade de deformação maior, então a separação só ocorre imediatamente à frente do gume, na região (e). A solicitação de tração, simultânea à aplicação de uma pressão vertical sobre a ferramenta e em combinação com as temperaturas elevadas, leva a deformação nas superfícies de corte do cavaco (c) e da peça (d) [3].

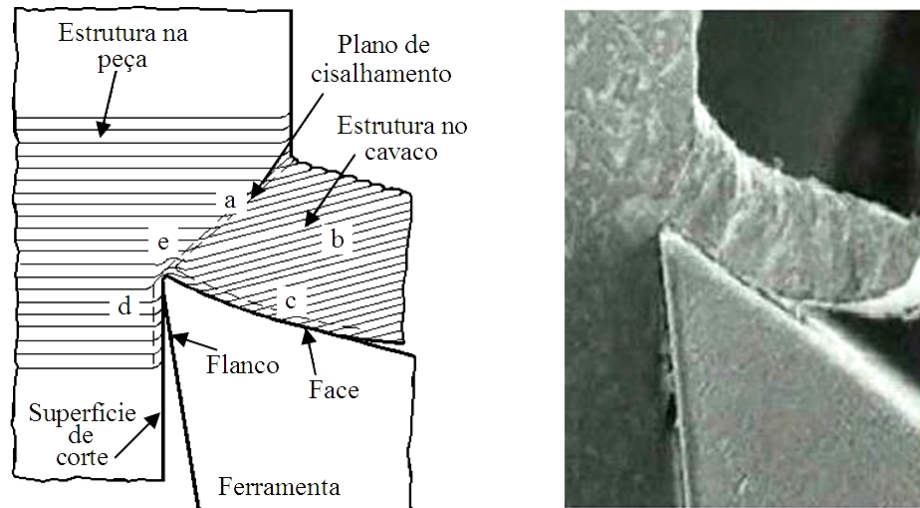


Figura 1- Mecanismo de corte em representação esquemática e fotografia [3]

2.2.2 Processo de fresamento

O fresamento, dentre as operações de usinagem existentes, é a mais utilizada para a geração de cavidades em moldes e matrizes. Isto se deve ao fato de que a fresa pode se apresentar sob as mais variadas formas dando à operação de fresamento uma maior versatilidade na geração de superfícies [5].

No fresamento, o processo de remoção de cavaco ocorre com o movimento circular de uma ferramenta de corte de geometria definida, denominada fresa, com um ou mais gumes, gerando superfícies [3]. A remoção de material da peça se realiza de modo intermitente, pela rotação da ferramenta em torno de seu eixo, efetuando o movimento de corte, onde ocorre a remoção de material por apenas uma volta em combinação com o movimento de avanço da peça realizado pela máquina [6]. O movimento efetivo, resultante dos movimentos de corte e avanço realizados simultaneamente, permitem a remoção contínua de material. A espessura do cavaco varia constantemente ao longo do corte, devido ao movimento combinado de rotação da fresa e avanço.

2.2.2.1 Grandezas do fresamento

Conforme Stemmer [6], as grandezas e fatores determinantes no processo de fresamento que influenciam no resultado e tipo de superfície gerada são:

- profundidade de corte (a_p) [mm],
- incremento lateral ou largura de corte (a_e) [mm],
- avanço por gume (f_z) [mm],
- velocidade de avanço (v_f) [mm/min],
- velocidade de corte (v_c) [m/min],
- diâmetro da fresa (d) [mm], e
- número de gumes cortantes da fresa (z).

A profundidade de corte (a_p) é a distância medida perpendicularmente ao plano de trabalho, correspondendo à distância que a ferramenta penetra na superfície do material.

O incremento lateral (a_e) é a distância lateral que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção do avanço.

O avanço por gume (f_z) é a distância medida na direção do avanço (f), correspondendo a distância linear percorrida pela ferramenta enquanto um gume está em processo de corte. O valor de f_z pode ser calculado conforme a fórmula abaixo (1):

$$f_z = f / z \quad (1)$$

Onde:

f_z = avanço por gume [mm],

f = avanço [mm], e

z = número de gumes da fresa.

A velocidade de corte (v_c) indica a velocidade tangencial instantânea da ferramenta, resultante de sua rotação. É calculada a partir da equação abaixo (2):

$$v_c = (\pi \cdot d \cdot n) / 1000 \quad (2)$$

Onde:

v_c = velocidade de corte [m / min],

d = diâmetro da fresa [mm], e

n = rotação da fresa [rpm]

A velocidade de avanço (v_f) define o avanço da ferramenta em relação à peça em unidade de distância por tempo em função do avanço por gume (f_z) e o número de gumes da fresa. É calculada conforme a equação abaixo (3):

$$v_f = n \cdot f_z \cdot z \quad (3)$$

Onde:

v_f = velocidade de avanço [mm / min],

n = rotação da fresa [rpm],

f_z = avanço por gume [mm], e

z = número de gumes da fresa.

Além das variáveis de processo citadas anteriormente, que influenciam sobre a rugosidade cinemática (teórica), outros fatores como a mecânica de corte e as deformações no gume da ferramenta, a estrutura e resistência do material da peça, tem influência sobre a qualidade da superfície de corte e formação da textura [3]. Além disso, a rigidez do sistema dinâmico ferramenta peça máquina e as forças de usinagem podem ocasionar vibrações que deterioram o acabamento [3]. Segundo Weck [7], a instabilidade dinâmica do sistema leva à geração de vibrações, cujos efeitos podem conduzir a um acabamento inadequado na superfície usinada. Os fatores que influenciam na estabilidade estão relacionados com a máquina, com a ferramenta e o com processo de usinagem, isoladamente ou em conjunto.

Ning *et al.* [8], realizou estudos sobre o comportamento da usinagem em alta velocidade através dos cavacos gerados durante seus experimentos. Utilizou, em seus experimentos, o material aço AISI H13 com dureza de 55HR_C, empregando uma fresa de ponta esférica. Entre os resultados, apresenta diferentes formas de cavacos, que estão

relacionados com a estabilidade da usinagem. Em uma usinagem considerada estável, devido à qualidade superficial obtida, a atuação de cada gume da ferramenta gera um único cavaco. Atribuindo parâmetros de corte mais severos, Ning obteve um processo de corte considerado não-estável, resultando em uma superfície de baixa qualidade e alteração no mecanismo de geração de cavaco. Nesta condição de usinagem verificaram-se acentuadas vibrações auto-excitadas (vibração tipo *chatter*), repercutindo na forma do cavaco, onde mais de um cavaco é gerado durante a atuação do gume da ferramenta. Este fato ocorre devido às oscilações entre a ferramenta e a peça. A Figura 2 ilustra um esboço de atuação da ferramenta durante o corte estável (fig. a) e não-estável (fig. b).

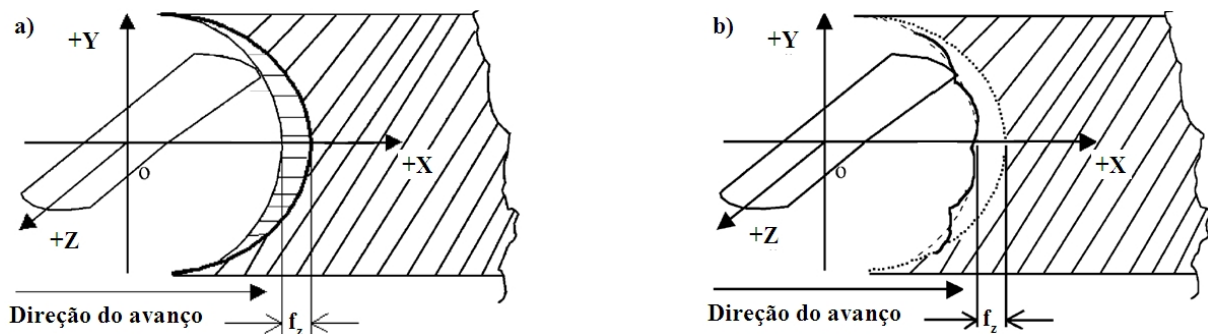


Figura 2- Movimento da ferramenta em corte estável (a) e não-estável (b)[8]

Um importante fator de instabilidade no processo é o batimento proveniente do erro no encaixe entre o cone porta-ferramenta e a interface do fuso da máquina e da excentricidade da haste da ferramenta e seus gumes. O motivo é que, frequentemente existem folgas nessas fixações e também pode haver um fragmento ou sujeira dentro do cone. Além disso, o cone não se posicionará da mesma forma todas as vezes que for montado no fuso. A presença de qualquer contaminação cria um batimento, ainda que a ferramenta e o fuso estejam perfeitos. Em condições normais de usinagem a ocorrência de excentricidade é praticamente inevitável, principalmente, devido a erros na montagem da ferramenta no cone e o inserto na haste. Quanto menor for o batimento, mais uniforme será a carga de trabalho sobre cada gume da fresa. Um batimento nulo daria, teoricamente, a melhor vida da ferramenta, além de textura e

acabamento superficial. Com um suporte tipo *Weldon*, empregado no trabalho experimental, alcança-se um batimento entre 0,01-0,02 mm, com um balanço da ferramenta em até quatro vezes o diâmetro. O batimento no suporte *Weldon* ocorre porque a ferramenta fica pressionada, lateralmente, pelo parafuso de fixação [9].

2.2.2.2 Métodos de fresamento

A combinação dos movimentos de corte e avanço define o sentido de corte, que pode ser concordante ou discordante. No fresamento concordante (Figura 3), o avanço e o movimento de corte apresentam o mesmo sentido [3]. O fresamento concordante traz benefícios importantes para operações de acabamento, minimizando as vibrações e melhorando a qualidade superficial da peça usinada [5]. No movimento concordante, a ferramenta inicia o corte com o valor máximo da espessura do cavaco, que vai diminuindo progressivamente, acarretando em menos atrito e menor desgaste. Nas operações de acabamento com fresa de topo esférico, o fresamento concordante é preferido em função da melhor qualidade final da superfície obtida [10].

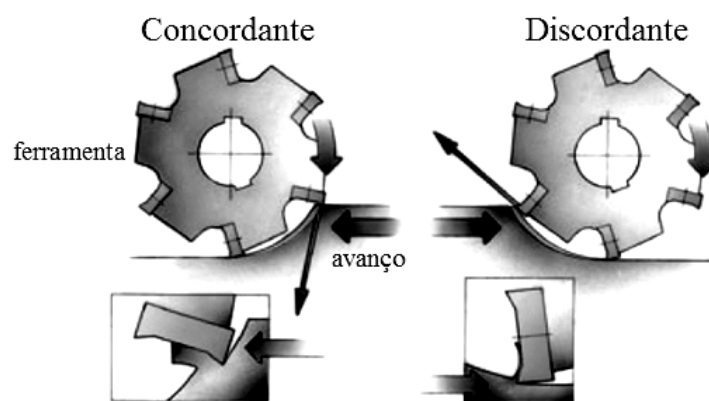


Figura 3 – Movimento concordante e discordante da ferramenta [11]

O processamento para fabricação de cavidades de moldes e matrizes pode ser subdividido em desbaste e acabamento.

O processo de desbaste objetiva primeiramente uma grande retirada de material, aproximando o perfil nominal da peça de uma maneira grosseira, dentro de um menor tempo possível. O desbaste de uma forma livre se processa baseado na descrição geométrica da peça e do bloco. O material é usinado até um limite da superfície desejada [3].

O processo de fresamento de acabamento tem como objetivo a aproximação precisa da geometria nominal, dentro das tolerâncias de forma e de rugosidade especificadas pelo projeto. A estratégia de usinagem é dependente da topografia da superfície desejada [12].

2.2.2.3 Ferramentas de corte

Existem diferentes tipos de fresas para geração de superfícies, que podem ser classificadas quanto à sua forma geométrica. O tipo mais indicado e utilizado para a usinagem de acabamento de superfícies de formas complexas (*free-forms*) é a de topo esférico (*ball-nose*) [13]. A geometria esférica do topo da fresa torna possível executar operações de cópia, onde a ferramenta se movimenta sobre a superfície usinada, tangenciando a mesma. As fresas de topo esférico podem ser utilizadas em usinagem de superfícies com inclinação entre 0 e 90° com relação ao eixo da ferramenta. A Figura 4 ilustra uma superfície de forma livre (*free-form*), parcialmente usinada, com as marcas características originadas pela fresa de topo esférico em uma trajetória de cópia.

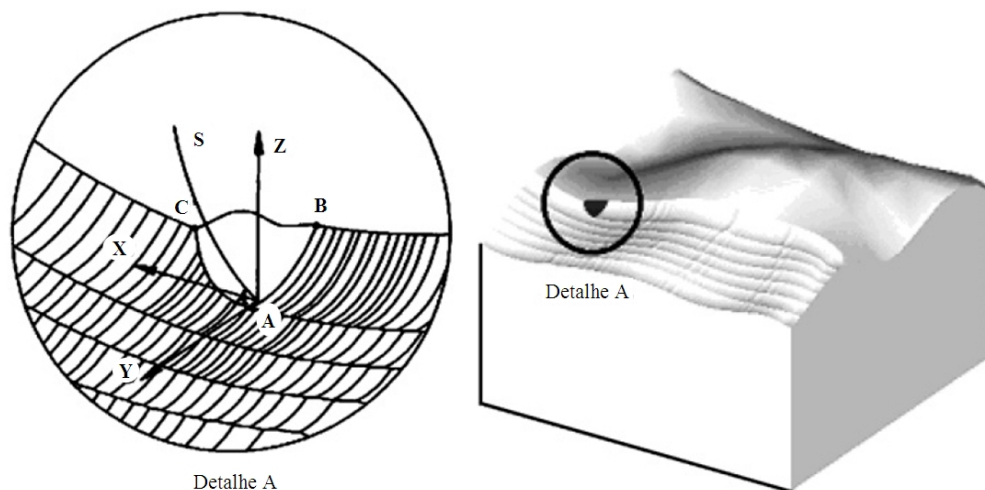


Figura 4- Superfície usinada com fresa de topo esférico e detalhe da seção de corte [14]

No detalhe da Figura 4, visualiza-se a seção delimitada pelos segmentos AB, BC e CA, originada pelo gume da ferramenta através do movimento de corte. A superfície gerada com uma fresa de topo esférico resulta em um perfil ondulado. A distância entre uma ondulação e outra é definida pelo avanço lateral (a_e). A profundidade de corte radial ou incremento lateral (a_e) exerce uma influência significativa na formação da altura das cristas (*scallop*), devido à característica geométrica do topo esférico da fresa [15]. Quanto menor for o a_e , menor serão a altura de crista (*scallop*) e a rugosidade teórica, resultando em uma superfície de perfil mais suave. Na Figura 5 visualiza-se uma fresa em contato com a superfície da peça, indicando os intervalos de incremento lateral (a_e), de avanço por rotação (f_z) e profundidade de corte (a_p).

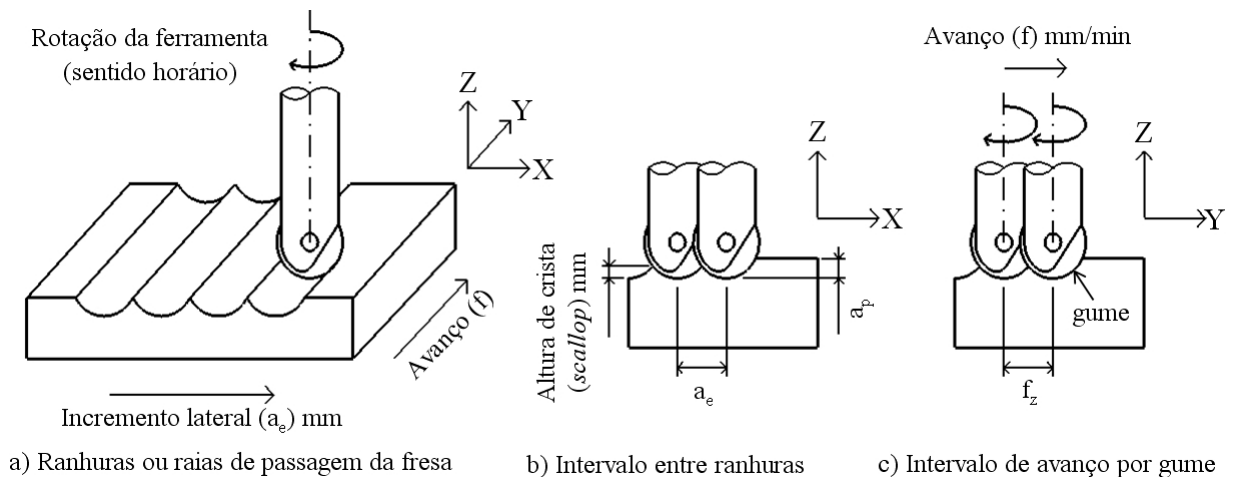


Figura 5– Intervalos de incremento e avanço no acabamento

Segundo Weingaertner *et al.* [16], no processo de acabamento com fresas de topo esférico são empregadas pequenas seções que levam a uma menor condição de engajamento da ferramenta com a peça. Esse processo é caracterizado por elevadas interrupções durante o corte. O tempo que o gume de corte leva para retirar material é apenas uma pequena fração do tempo da rotação da ferramenta. Isso incorre em fenômenos dinâmicos diferentes daqueles encontrados em condições de desbaste [17].

As ferramentas de corte podem ser inteiriças ou com insertos intercambiáveis montadas em hastes apropriadas. Na usinagem de desbaste e semi-acabamento de aço

endurecido, é muito comum se utilizar fresas com insertos intercambiáveis que se apresentam mais econômicas, visto que o alto custo das fresas sólidas de metal duro de diâmetros maiores do que 15 mm, restringem seu uso [18]. Para o acabamento as ferramentas mais comuns são as fresas inteiriças de metal duro, pois permitem menores erros de batimento radial e menor deflexão, em função de serem fabricadas com tolerâncias geométricas menores, além da maior rigidez da haste de metal duro, resultando em rugosidades menores, principalmente para diâmetros menores do que 10 mm [19].

Há uma tendência de se utilizar ferramentas com pastilhas intercambiáveis para os processos de usinagem de acabamento, principalmente em função da redução de custos conseguida para os casos de grandes superfícies e também pelo fato de se poder penetrar nas cavidades com tais ferramentas [20].

Dentre as diversas possibilidades de escolha de ferramentas para usinagem de aços endurecidos, o metal duro é o mais comumente utilizado [20]. O metal duro é um material sinterizado composto de cobalto como aglomerante com partículas duras de Carbonetos de Tungstênio (WC) em combinação com outros, tais como, Carbonetos de Titânio (TiC), Carbonetos de Tântalo (TaC) ou de Nióbio (NbC). A composição destas partículas forma um corpo de alta dureza e resistência à compressão. Para aumentar a dureza do gume de corte e as condições da superfície, as ferramentas de metal duro são geralmente revestidas com TiN (Nitreto de Titânio), TiAlN (Nitreto de Titânio Alumínio) ou TiCN (Carbonitreto de Titânio). Os revestimentos podem ser constituídos de uma única camada ou multicamadas, apresentando espessura total das camadas de 2 a 12 μm , que são finas camadas depositadas sobre o núcleo de metal duro que possibilitam aumentar a resistência ao desgaste e oxidação, mantendo o núcleo da ferramenta com a tenacidade original [20]. Com a aplicação dos revestimentos geralmente consegue-se um aumento da vida útil da ferramenta [5].

A escolha da ferramenta, material e cobertura de que são constituídas, está vinculada ao material a ser usinado e às estratégias de usinagem. Para a usinagem de aços tratados

termicamente com dureza em torno de 54 HR_C, as fresas constituídas de metal-duro com revestimento de TiAlN são adequadas [11]. A grande vantagem do TiAlN é permitir aumento nas condições de corte, como a velocidade de corte que resulta em temperaturas mais altas na usinagem de aço endurecido. O TiAlN proporciona à ferramenta maior dureza à temperaturas mais elevadas, alta resistência térmica, acima de 800°C [20]. Além disso, possibilita a usinagem sem fluido de corte, que é uma grande vantagem, pois torna o processo mais limpo e mais ecológico [21].

2.2.2.4 Usinabilidade

A usinabilidade pode ser definida como uma propriedade relacionada com a facilidade com que um material pode ser cortado, de acordo com as dimensões, forma e acabamento superficial requerido [22]. A usinabilidade não é uma propriedade intrínseca do material, mas o resultado da interação entre o processo de fabricação e as características do material da peça [23]. A composição química, a microestrutura e os tratamentos térmicos e mecânicos têm um efeito acentuado na usinabilidade dos aços. Para avaliação da usinabilidade, são considerados quatro critérios, utilizados isoladamente ou em conjunto. Estes critérios são: a vida da ferramenta, a força de corte, a qualidade superficial da peça e a formação do cavaco [23].

A qualidade das superfícies obtidas na usinagem, objeto deste estudo, pode ser um critério para a determinação das condições e estratégias de corte empregadas. A rugosidade é decorrente da forma do gume da ferramenta e do movimento relativo entre peça e ferramenta. A rugosidade aumenta com o aumento do avanço (f_z) e diminui com o aumento do raio de quina da ferramenta. A rugosidade inicialmente tende a aumentar com o aumento da velocidade de corte (v_c), diminuindo após certa velocidade, devido à formação de gume postiço, que pode ocorrer a pequenas velocidades de corte, fator que desaparece com o emprego de velocidades de corte mais altas [23].

2.2.3 Geometrias e estratégias de corte

Pelas suas próprias formas construtivas, os moldes e matrizes contêm vários tipos de superfícies e cavidades que exigem cuidados especiais na avaliação dos efeitos de trajetórias complexas da ferramenta nas diversas operações de usinagem. Estas trajetórias podem gerar variação da morfologia do cavaco, das forças de usinagem, do mecanismo de desgaste das ferramentas e sua respectiva vida útil para manter a integridade superficial, o que influencia a precisão dimensional e geométrica do molde ou matriz [20].

Uma das formas geométricas mais básicas e predominantes na fabricação de cavidades de moldes e matrizes são os planos inclinados. A principal dúvida na usinagem destes planos é saber qual a melhor estratégia, definindo a direção da trajetória da ferramenta. A inclinação do plano refere-se ao ângulo formado entre este e um plano normal ao eixo da ferramenta.

Na literatura encontram-se estudos de usinagem em planos inclinados, avaliando principalmente a vida da ferramenta, variando os dados de corte (avanços e velocidades). Em número reduzido estão os trabalhos publicados que avaliam, além da condição de plano inclinado, as estratégias de corte empregando alta velocidade de corte (*high-speed milling - HSM*), comparando-as com a qualidade superficial obtida [24]. As estratégias são definidas pelas direções e sentidos de corte, podendo ser vertical ao plano inclinado ou horizontal ao mesmo, com o sentido que pode ser ascendente (subindo) ou descendente (descendo).

Tönshoff *et al.* [25] mostraram que o ângulo de inclinação da peça usinada com a direção de usinagem (orientação da fresa com relação à superfície da peça), podem ter efeito significativo no desempenho do processo, indicado pela vida da ferramenta e rugosidade superficial.

Kang *et al.* [26] realizaram um estudo comparativo avaliando as características da usinagem de um aço com dureza de 28 HR_C utilizando um processo de fresamento de acabamento em uma geometria plana, variando o ângulo de inclinação para 15°, 30° e 45°,

onde foram empregadas quatro estratégias de corte: horizontal descendente, horizontal ascendente, vertical descendente e vertical ascendente, empregando sempre o sentido de corte único concordante. A ferramenta utilizada no experimento foi a fresa de metal-duro inteiriça com ponta esférica de diâmetro 10 mm, dois gumes, cobertura de TiAlN, fixada com um comprimento de 50 mm. As condições de corte empregadas foram iguais em todas as estratégias: velocidade $n= 8000$ rpm, avanço por gume $f_z= 0,2$ mm, incremento lateral $a_e= 0,4$ mm e profundidade de corte $a_p= 0,4$ mm. Nas análises de força de corte para as inclinações e estratégias consideradas, obtiveram valores mais elevados de força para as usinagens com trajetória descendente, em relação a ascendente. Das superfícies geradas foram obtidos resultados qualitativos e quantitativos, mostrados através de imagem da textura da superfície e gráficos de rugosidade de cada condição. A textura resultante de cada condição mostra nitidamente a influência da estratégia de corte empregada, através de marcas regulares e repetitivas geradas pela ação do gume da ferramenta. O experimento mostrou que a influência da estratégia de corte decresce com o aumento do ângulo de inclinação entre a ferramenta e o corpo-de-prova, sendo que na condição a 45 graus o diâmetro efetivo de contato da ferramenta é maior. Observaram maior vibração da ferramenta para as estratégias de corte verticais, verificado através dos gráficos de rugosidade e do maior desgaste da ferramenta, apontando a estratégia vertical descendente na inclinação de 45 graus como a pior condição, originando superfície de pior qualidade. Com base nos resultados, concluíram que a estratégia de corte horizontal ascendente na condição inclinado a 15 graus e a estratégia de corte horizontal descendente para a inclinação de 45 graus, são as mais eficazes, apresentando menores valores de rugosidade e textura mais homogênea.

Toh [27], realizou uma análise da topografia da superfície usinada em corpos-de-prova de material AISI H13 endurecido a 52 HR_C. Avaliou diferentes estratégias de corte e orientações: horizontal descendente, horizontal ascendente, vertical descendente e vertical ascendente, utilizando um processo de fresamento de acabamento em uma geometria plana,

inclinada a 75° , empregando sempre o sentido de corte único concordante. Utilizou uma fresa fabricada especialmente para seus experimentos, constituída de metal-duro inteiriça com ponta esférica de diâmetro 10 mm, seis gumes, cobertura de TiAlN, fixada com um comprimento de 60 mm. As condições de corte empregadas foram: velocidade de 400 m/min ($n= 12.964$ rpm para trajetória ascendente e $n= 13.181$ rpm para trajetória descendente), avanço por gume $f_z= 0,1$ mm, incremento lateral $a_e= 0,5$ mm e profundidade de corte $a_p= 0,5$ mm. Seu trabalho teve como objetivo a compreensão da textura superficial gerada por várias orientações de corte, usinando este material de difícil usinabilidade. Através da análise da topografia, mostra gráficos tridimensionais de perfil de rugosidade, determinando a melhor orientação para obter a textura de melhor qualidade. Analisando os gráficos tridimensionais, observou que as superfícies originadas pelas estratégias de corte vertical ascendente, horizontal ascendente e horizontal descendente, mostram texturas relativamente isotrópicas, compostas de marcas uniformes e bem definidas. Texturas com marcas similares foram observadas nas superfícies usinadas pelas estratégias de corte horizontal ascendente e descendente. A pior textura, analisada quanto à formação e uniformidade, foi originada na estratégia de corte vertical descendente. O motivo deste resultado pode ser atribuído à elevada tendência à vibração da ferramenta, aliada a um maior desgaste do gume e elevada força de corte induzida para esta condição. Como conclusão, apresentou que a estratégia de corte vertical ascendente, comparativamente, proporciona os melhores resultados, originando superfícies uniformes com trilhas e marcas de atuação do gume bem definidos.

Aspinwall *et al.* [28], realizaram um trabalho experimental, pesquisando o efeito da orientação de corte e o ângulo de inclinação do corpo-de-prova, avaliando a vida da ferramenta, forças de usinagem, integridade e rugosidade superficial e tensão residual, quando usinando o material Inconel 718 com composição química nominal de 53% Ni, 19% Cr, 18% Fe, 5% Nb, 3% Mo, 0.9% Ti, 0.5% Al e C balanceado, com dureza em torno de 44 HR_C, em processo de fresamento de acabamento com ferramenta de topo esférico. Utilizaram uma

geometria plana inclinada a 45° , empregando uma estratégia de corte horizontal ascendente e descendente. Concluíram que, empregando a estratégia horizontal descendente, obtiveram melhores resultados em termos de rugosidade superficial R_a , forças de usinagem e vida da ferramenta. Verificaram tensões residuais de tração para a estratégia horizontal descendente e tensões residuais de compressão para a estratégia horizontal ascendente, medidas paralelamente à direção do avanço (f_z).

As estratégias podem ser geradas com o auxílio de sistemas CAD/CAM, onde as informações geométricas da peça são convertidas em linguagem de máquina, gerando um programa CNC que transmite para a máquina-ferramenta as coordenadas que definem as estratégias da ferramenta de corte e as velocidades de avanço. O programador tem liberdade e flexibilidade para escolher e definir as estratégias de usinagem e as velocidades de corte e avanço mais adequadas para cada situação. Definindo a estratégia, o programador está determinando a forma e a orientação dos movimentos da ferramenta que serão criados sobre a peça. A programação via CAM requer um conjunto de conhecimentos relativos à usinagem e também aos recursos disponíveis no *software*. Uma estratégia é adequada ou não, dependendo aonde for aplicada e em que condição. O operador de sistemas CAD/CAM deve ser um profissional experiente e devidamente treinado, pois o processo de usinagem depende fortemente da habilidade desse profissional [29].

A escolha das estratégias corretas de fresamento para a programação CNC exerce grande influência sobre o resultado da usinagem, tanto qualitativa quanto economicamente. A Figura 6 ilustra quatro diferentes estratégias para um processo de fresamento de acabamento em um plano inclinado com fresa de topo esférico, variando a trajetória da ferramenta em relação ao corpo-de-prova, que pode ser horizontal ou vertical, ascendente ou descendente em relação ao plano inclinado.

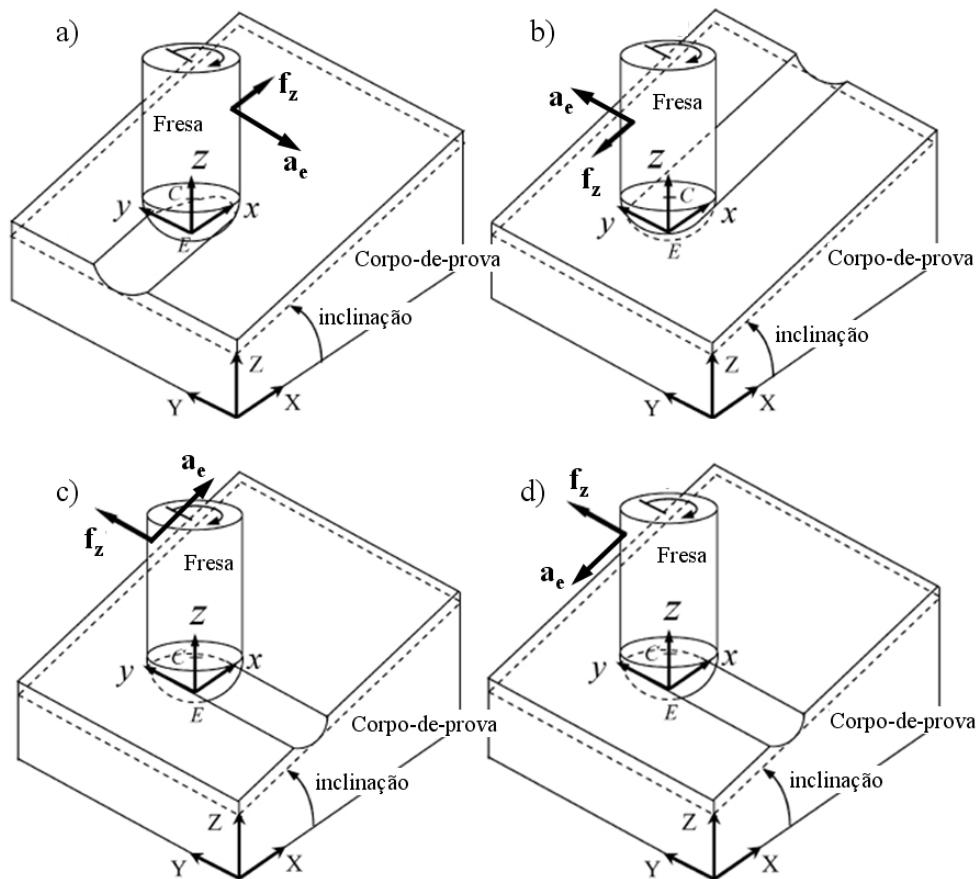


Figura 6- Estratégias de corte: a) vertical ascendente, b) vertical descendente, c) horizontal ascendente, e d) horizontal descendente [30]

Deve ser dada atenção especial para a usinagem de materiais endurecidos durante a apresentação dos processos, relativamente às características das peças, das ferramentas e das máquinas [1].

2.2.4 Determinação dos parâmetros de corte

Os tratamentos térmicos (têmpera, revenimento, cementação, nitretação, etc.) criam algumas restrições ao processo tradicional de usinagem em função das dificuldades ligadas principalmente a usinabilidade e conseqüente desgaste acelerado das ferramentas de corte, quando se tenta usinar por processos convencionais os materiais endurecidos. O desenvolvimento de novas ferramentas e o avanço tecnológico em máquinas-ferramentas vem promovendo um aumento nas velocidades de corte e de avanço. Neste contexto, o fresamento

com fresas de topo esférico em altas rotações tornou-se competitivo para a produção de moldes e matrizes de material endurecido com geometria complexa de alta precisão e qualidade superficial [10].

A determinação da velocidade de corte (v_c) é baseada, entre outros fatores, no material que está sendo usinado. Com o aumento da resistência mecânica do material, a velocidade de corte diminui de forma exponencial. Materiais de baixa resistência à tração, como o alumínio ou aços de baixo teor de carbono, requerem elevadas velocidades de corte para obter a mínima energia para gerar deformação plástica. Materiais com elevada resistência à tração como o aço temperado ou ligas de titânio mostram uma energia de deformação mínima na região de deformação a baixas velocidades de corte [31].

Quando as espessuras de usinagem são pequenas, por exemplo, no caso de operações de acabamento, a aplicação de altas velocidades de corte permite um aumento da taxa de remoção e uma sensível redução das forças específicas de usinagem. Conseqüentemente, as tensões superficiais originadas pelo passe de fresamento são reduzidas, sendo possível evitar modificações térmicas e químicas que possam alterar as características do material ou causar problemas para as operações posteriores [10].

Para a determinação dos parâmetros de corte da fresa de topo esférico em operações de acabamento, considera-se o diâmetro efetivo (d_e), medido na região de contato do gume de corte da ferramenta com a superfície da peça. A Figura 7 ilustra uma fresa em posição inclinada e normal em relação ao plano de trabalho, onde visualiza-se o engajamento do gume na região de contato com a peça, correspondendo ao diâmetro efetivo de trabalho da ferramenta. As fresas de topo esférico possuem uma característica que influencia fortemente o resultado do processo de usinagem: a velocidade de corte é variável ao longo do gume [15]. Dependendo da forma e inclinação da superfície, cada ponto do gume da fresa em contato com a peça está submetido a diferentes condições de corte [32].

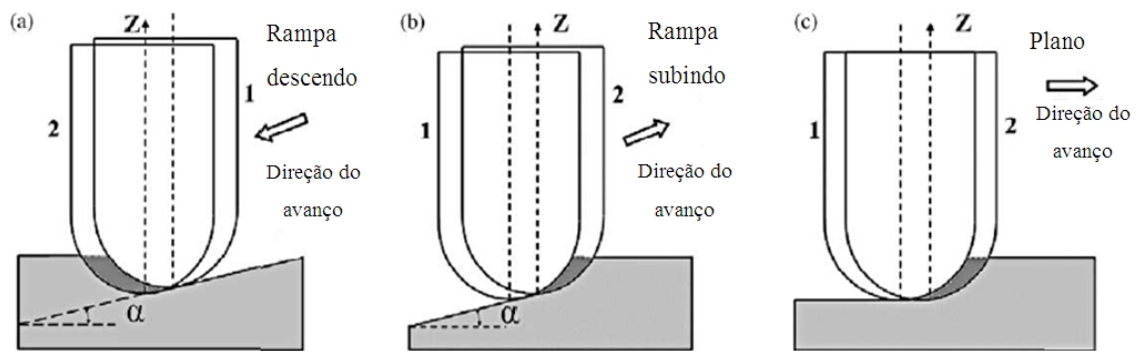


Figura 7 – Fresa em posição de engajamento: a) plano inclinado e trajetória descendente, b) plano inclinado e trajetória ascendente, e c) plano normal [33]

Os parâmetros incremento lateral (a_e) e avanço por gume (f_z), são usualmente baseados na rugosidade superficial teórica, simulada por um modelo de aproximação de ferramenta esférica [13]. As marcas da rugosidade deixadas pela usinagem com a fresa de topo esférico apresentam-se com características de forma ondulada e dependem, basicamente, das estratégias de usinagem utilizadas, do diâmetro da fresa, do avanço por gume (f_z), do incremento lateral (a_e) e do posicionamento da ferramenta em relação à peça. O posicionamento refere-se ao ângulo de inclinação da fresa com relação a superfície e o ponto de contato entre elas.

Os estudos realizados por Chen *et al.* [34] mostraram que, ao executar o fresamento com fresa de topo esférico empregando-se uma inclinação no eixo da fresa num determinado ângulo, permite obter menores valores de altura das marcas. No entanto, aumentando-se o ângulo de inclinação, a partir de certo valor, as alturas das marcas não se reduzem mais, ou seja, mantém-se estáveis para um determinado raio “R” da ferramenta.

A Figura 8 ilustra um exemplo de topografia de superfície usinada, simulada pelo método convencional, e a fotografia da textura gerada por uma fresa de ponta esférica em um plano inclinado, onde se podem observar as características da topografia resultante de sucessivos passes, com as marcas formadas simplesmente pela passagem do gume, relativas a uma rotação parcial da ferramenta. A formação das marcas e cristas (*scallop*) é originada pelo movimento combinado de translação e rotação da ferramenta em relação à peça.

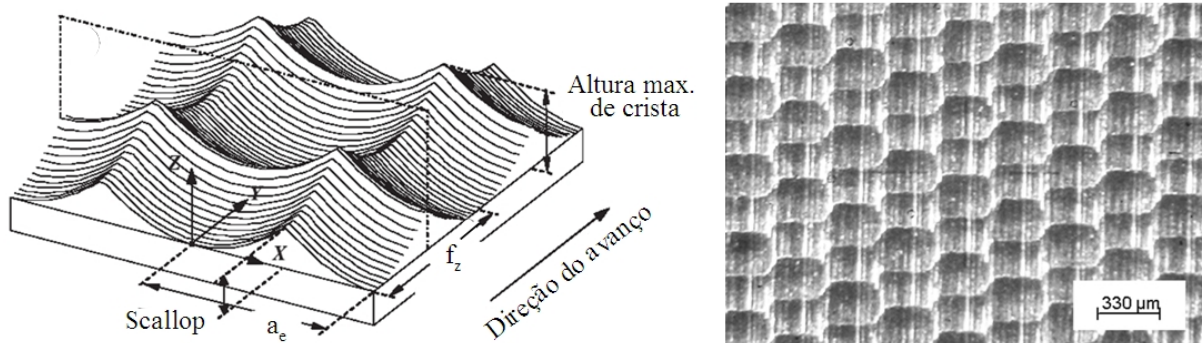


Figura 8-Topografia simulada de superfície usinada com fresa esférica [13] e fotografia de textura

A profundidade de corte radial ou incremento lateral (a_e) exerce uma influência significativa na formação da altura das cristas, sendo que devido à característica geométrica do topo esférico da fresa, esta influência é muito maior comparada às fresa de topo reto e toroidal [15]. A variação da relação a_e/f_z influencia efetivamente no resultado da rugosidade [35]. A Figura 9 ilustra uma simulação topográfica da superfície usinada por fresa de topo esférico, onde na Figura 9a observa-se a topografia originada a partir de parâmetros diferentes para as direções do avanço (f_z) e incremento lateral (a_e). A rugosidade teórica, neste caso, é visivelmente distinta quando avalia-se a direção do incremento lateral (a_e) e a direção do avanço (f_z). Na Figura 9b, visualiza-se a topografia gerada a partir de parâmetros (a_e) e (f_z) na mesma faixa de medida, originando uma topografia mais uniforme nas duas direções, onde as cavidades em forma de células, originadas pela passagem do gume da ferramenta, apresentam dimensões semelhantes nas duas direções.

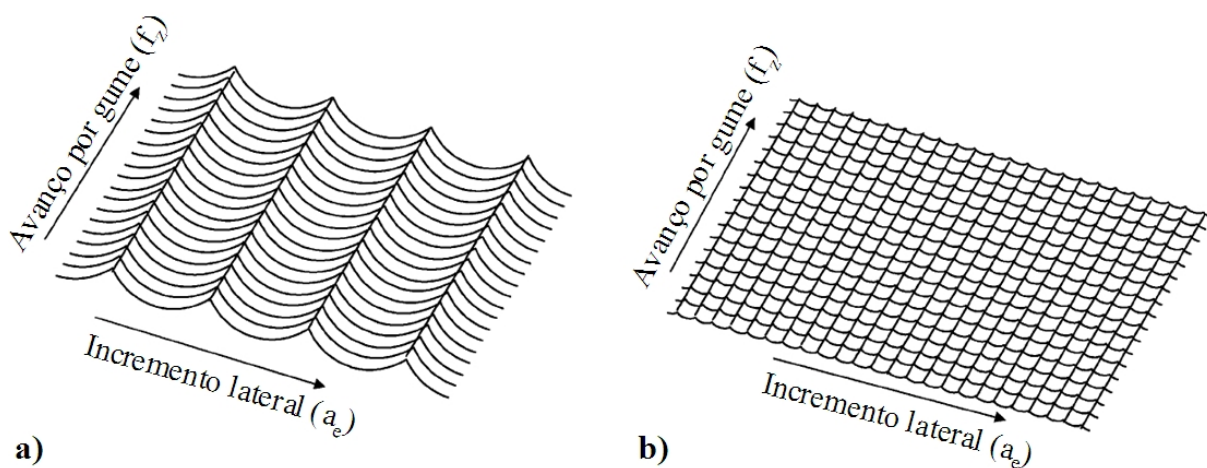


Figura 9 - Topografia simulada com variação de relação a_e/f_z : a) $a_e/f_z \neq 1$; b) $a_e/f_z = 1$ [35]

Atualmente as máquinas CNC de alta velocidade e o desenvolvimento de novas ferramentas de corte, tornaram possível o emprego de pequenos incrementos laterais (a_e), reduzindo o espaçamento entre os sucessivos passes paralelos da fresa, que aliadas a altas velocidades de corte e avanço, permitem a obtenção de uma melhor qualidade da superfície fresada, originando uma textura de formação isotrópica com uma rugosidade final desejada.

2.3 Usinagem de materiais endurecidos

A usinagem de aço no estado temperado, tanto nas operações de desbaste como em acabamento, permite uma racionalização do processo, pois provoca a diminuição dos tempos de preparação e diminuição de erros ocasionados pela mudança de referência da peça, além de evitar os problemas de distorções geométricas ocasionadas pelo tratamento térmico, principalmente em peças de paredes finas [10].

O fresamento de aço endurecido utilizando fresa de topo esférico tem sido extensivamente usado na fabricação de superfícies de forma complexa como as encontradas em moldes e matrizes, turbinas, hélices e componentes estruturais de aeronaves [12].

Nas aplicações de moldes para trabalho a quente, para forjamento a quente, injeção de plástico e de ligas de alumínio, inclusive fundição, os materiais mais utilizados são os aços AISI H11, H12 e H13, P20 e P21, que são de baixa liga, mas que possuem características específicas para a aplicação como resistência à deformação no tratamento térmico, resistência à trincas a quente e boa usinabilidade no estado recozido. Em suas aplicações específicas estes aços são usados numa faixa de dureza final de 40 HR_C a 55 HR_C [36].

O material aço AISI H13 é um aço para trabalho a quente, do tipo ao cromo-molibdênio (Cr-Mo), com os seguintes elementos de liga em sua composição: 0,35% C, 0,30% Mn, 1,00% Si, 5,00% Cr, 1,00% V e 1,50% Mo [22].

Os aços do tipo ao Cr-Mo são utilizados na confecção de moldes e matrizes, caracterizando-se por apresentar elevada tenacidade, portanto, excelente propriedade de

resistência ao choque e baixa resistência ao desgaste. O endurecimento do aço acontece por um tratamento térmico de têmpera com resfriamento ao ar, devido a sua elevada temperabilidade. Esta característica de boa temperabilidade, propriedade referente a capacidade de um aço ser endurecido, se deve, além do teor de carbono, também aos elementos de liga encontrados em sua composição. No aço H13 a presença de elementos de liga, em especial o cromo, proporciona uma maior penetração de dureza, garantindo uniformidade das características mecânicas entre a superfície e o centro. O revenido é necessário logo após a têmpera, de modo a reproduzir a dureza final de serviço desejada, que podem chegar a 55 ou 56 HR_C [22].

Geralmente o aço AISI H13 é recebido da siderúrgica no seu estado normalizado, com valor baixo de dureza em torno de 16 HR_C. Nesta condição o material proporciona uma melhor usinabilidade.

A usinagem de materiais endurecidos, apesar de apresentarem difícil usinabilidade, oferece vantagens no processo e no resultado final do produto usinado, proporcionando ganho em qualidade superficial e controle dimensional [37]. A usinagem de acabamento realizada após o processo de tratamento térmico com o material já na dureza final de trabalho, evita problemas decorrentes do tratamento térmico, tais como possíveis empenamento e variação dimensional na peça.

Os fatores metalúrgicos predominantes que influenciam a usinabilidade são a dureza e a microestrutura do aço. Chiaverini [22] afirma que valores altos para a dureza significam dificuldade de usinagem ao passo que valores médios e baixos, associam-se com boas propriedades para usinagem, mas que as medidas de dureza não serviriam de um modo absoluto como guia para determinação da verdadeira usinabilidade.

2.3.1 Microestrutura

A microestrutura do material é um importante fator que influencia na usinabilidade, em função da possibilidade da transformação da microestrutura do aço sem alteração de sua composição química [4]. Os micro-constituintes alteram as características de ductilidade e de fragilidade em função da sua presença, quantidade e forma, promovendo diferentes condições de quebra de cavaco, abrasividade, força e temperatura de corte. A presença de fases aciculares tipo bainita e martensita, em função do efeito extremamente abrasivo, também é indesejável na usinagem [23].

O aço AISI H13 caracteriza-se por ter fases metaestáveis. Muitos dos materiais de uso comum contêm fases que são metaestáveis, ou seja, fases que não se transformam na fase de equilíbrio, embora tenham mais energia que esta [38]. A fase martensita da liga Fe-C é obtida através de um resfriamento rápido a partir da temperatura de austenitização, a tendência seria a formação de ferrita + cementita (fases de equilíbrio). Entretanto, o processo de saída do carbono de dentro da célula CFC (Figura 10) requer tempo (exige difusão), o qual não é propiciado por um resfriamento rápido. Então, ocorre a transformação para CCC e o carbono fica retido dentro da célula, muito embora não haja espaço para acomodá-lo. Assim, ocorre uma distorção da célula CCC, formando uma célula tetragonal de corpo centrado. A distorção causa tensões internas, que são percebidas através da alta resistência mecânica e dureza da martensita, muito embora tenha grande fragilidade[39, 40].

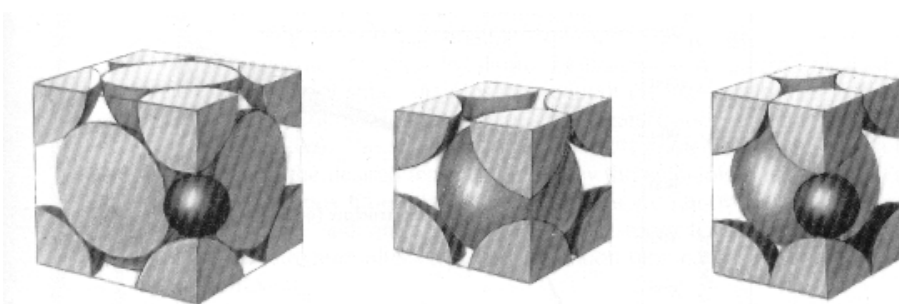


Figura 10– (a) Austenita ($Fe\gamma$ - FCC), (b) Ferrita ($Fe\alpha$ – CCC), (c) Martensita (Célula tetragonal de corpo centrado) [39]

A Figura 10, item (a) ilustra a representação atômica da austenita com um átomo de carbono no interstício. No item (b), onde se tem a representação da ferrita, não há espaço intersticial para acomodar o átomo de carbono. Já para o item (c) a célula tetragonal de corpo centrado corresponde a martensita, resultante da distorção de uma célula CCC, causada pelo átomo de carbono no interstício.

O carbono é o elemento fundamental no que diz respeito às propriedades da martensita, mas outros elementos de liga, tais como o cromo e o molibdênio, presentes na composição do aço H13, exercem uma influência endurecedora na martensita [22].

2.3.2 Tratamento térmico

O desempenho de moldes e matrizes somente tem sucesso se quatro requisitos básicos forem atendidos: o projeto da ferramenta deve ser apropriado à utilização, a precisão com que são fabricadas deve atender às necessidades, a seleção da ferramenta deve ser apropriada para o uso e a aplicação do tratamento térmico deve ser apropriada [20].

Neste contexto, o tratamento térmico de têmpera (*quenching*) visa a obtenção de um aço com estrutura martensítica (Figura 11), com propriedades mecânicas melhoradas em função do aumento da dureza do material. No processo de têmpera aquece-se o aço a uma temperatura acima da linha crítica (temperatura de austenitização), conforme o diagrama Fe-C, ficando o tempo necessário para o aquecimento homogêneo do bloco, e em seguida procede-se com um resfriamento rápido em um meio fluido, geralmente óleo ou água.

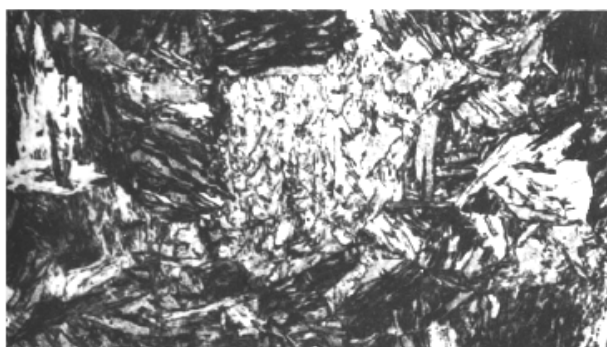


Figura 11– Exemplo de microestrutura martensítica (1000x)[40]

O revenimento (*tempering*) é um processo importante e necessário, devendo ser realizado imediatamente após a têmpera, a temperaturas abaixo da linha crítica, conforme diagrama de beneficiamento específico do material, visando corrigir os excessos da têmpera, ou seja, aliviar as tensões e corrigir excessiva dureza e conseqüente fragilidade do material, melhorando a sua tenacidade. Para o aço H13 recomenda-se revenimento múltiplo, pelo menos dois, a fim de se obter as melhores características de tenacidade [22].

A microestrutura obtida após a têmpera e revenimento é martensita revenida (*tempered martensite*), diferente tanto da perlita, quanto da bainita, formada pelo aquecimento da martensita, ocorrendo precipitação de carbonetos na matriz ferrítica.

Um problema que pode ocorrer com o processo de têmpera, devido ao resfriamento brusco e desigual entre a periferia e o centro, é o aparecimento de empenamentos, trincas e fraturas. A solução para evitar este problema é o uso do tratamento conhecido por martêmpera (*marquenching*). Este processo consiste em aquecer o aço até a temperatura de austenitização e após resfriando em um meio fluido quente (óleo aquecido, banho de sal, metal fundido ou leite fluidizado) até a temperatura acima da faixa de formação da martensita, mantendo-se nesse meio até homogeneizar a temperatura no bloco e após é retirada para resfriamento a uma velocidade moderada, geralmente ao ar [22]. A superfície e o núcleo do material apresentam diferentes taxas de resfriamento e através da martêmpera, a transformação de austenita em martensita acontece de forma mais uniforme, com melhor controle dimensional da peça, minimizando a ocorrência de distorções e tensões residuais ao longo da mesma, problemas normalmente ocorridos no tratamento de têmpera convencional [41].

As faixas de temperatura para os tratamentos térmicos dos aços são geralmente fornecidos pelo fabricante do material, em forma de diagramas específicos de beneficiamento, que representam as curvas de temperatura para têmpera e revenimento em função da dureza desejada no aço.

2.3.3 Propriedades mecânicas do aço

Os materiais, quando submetidos a um esforço de natureza mecânica, tendem a se deformar. Conforme a sua natureza, o comportamento varia durante a deformação. Podem apresentar apenas deformação elástica até a ruptura, como no caso de elastômeros, ou sofrer apreciável deformação plástica antes da ruptura, como nos metais e termoplásticos [39, 40].

O mecanismo de formação de cavaco na usinagem envolve deformação plástica, temperatura elevada e fluxo plástico não linear de material. Este fluxo plástico gera tensões locais na ferramenta de corte, uma distribuição de temperatura na interface ferramenta cavaco e determina as condições do material da peça após o cavaco ter sido removido [10].

2.3.3.1 Deformação plástica

A deformação plástica é permanente e em escala atômica corresponde a movimentação de átomos na rede cristalina, mediante a aplicação de uma tensão cisalhante. Durante este processo as ligações inter-atômicas precisam ser rompidas e novamente refeitas. A deformação plástica está associada a movimentação de discordâncias. O mecanismo de movimentação de discordâncias está representado na Figura 12. Mediante a aplicação de uma tensão de cisalhamento, ocorre o rompimento de ligações inter-atômicas e conseqüente movimentação dos átomos num determinado plano de escorregamento [39, 40].

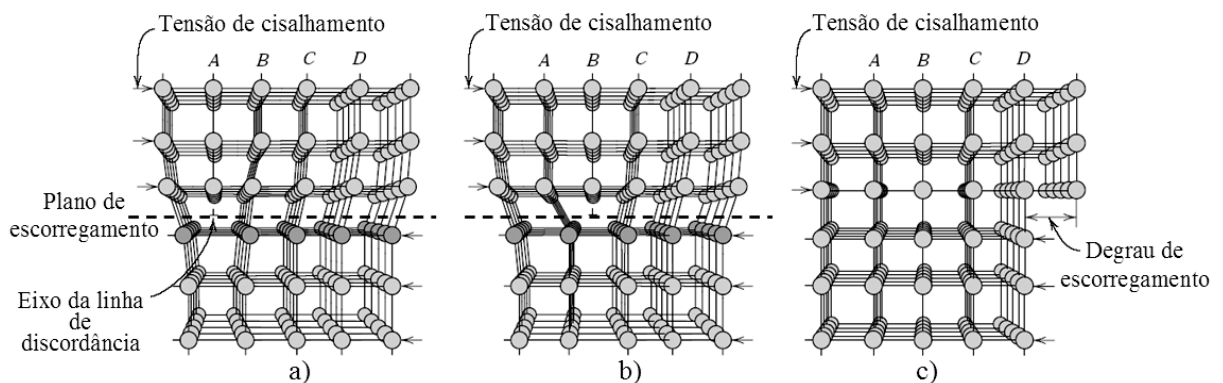


Figura 12 - Rearranjo atômico acompanhado de movimento de discordância [39]

Devido à pressão realizada pela ferramenta no volume da peça, que dela se aproxima, o valor crítico da tensão de cisalhamento é atingido e a trinca nucleia-se abruptamente, propagando-se na direção de corte.

2.3.3.2 Tenacidade

A propriedade mecânica de tenacidade pode ser definida como a capacidade do material deformar-se antes de romper ou como a capacidade do material absorver considerável quantidade de energia sem romper [22]. A tenacidade corresponde à quantidade de energia necessária para provocar a ruptura e que depende fundamentalmente da resistência e ductilidade do material [39].

2.3.3.3 Dureza

A dureza é uma propriedade mecânica do material que representa sua resistência à penetração de um corpo, pela aplicação de uma carga. É expressa por um valor numérico, obtido através da medição da profundidade ou extensão da região deformada plasticamente (indentação), originada pela ação do penetrador (indentador) [39].

A dureza depende diretamente das forças de ligação entre os átomos, íons ou moléculas e do estado do material (processo de fabricação e tratamento térmico) [42].

Os processos de fabricação podem alterar os valores de dureza de um material. No caso do fresamento pode ocorrer um encruamento na região do corte. Deformações plásticas ocorrem na sub-superfície, geralmente elevando os valores de dureza para esta região [43].

Os tipos de ensaios comumente empregados na medição de dureza dos aços são os processos Rockwell e Vickers.

O ensaio de dureza Rockwell é o processo mais utilizado, devido a sua rapidez e facilidade de execução. O valor da dureza é um valor proporcional à profundidade de

penetração, sendo que, no processo industrial, há duas faixas principais de dureza Rockwell empregadas, diferenciadas pela forma do penetrador e carga aplicada:

- Escala Rockwell B (HR_B): empregado para a medição de materiais de dureza média, onde o penetrador é uma esfera de aço com $1/16''$ (Figura 13), aplicando-se uma carga de 150 Kgf;

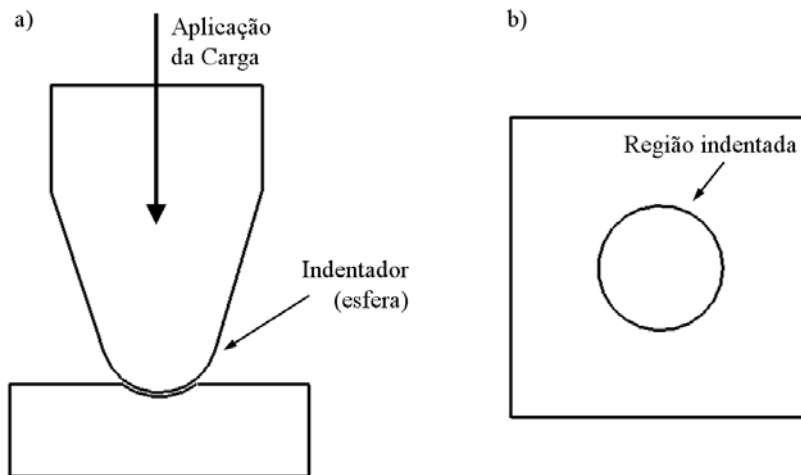


Figura 13 - Dureza HR_B : a) penetrador de forma esférica; b) indentação

- Escala Rockwell C (HR_C): empregado em materiais mais duros, como aço temperado, onde o penetrador é uma ponta de diamante em forma de cone com ângulo de 120° (Figura 14), aplicando-se uma carga de 150 Kgf.

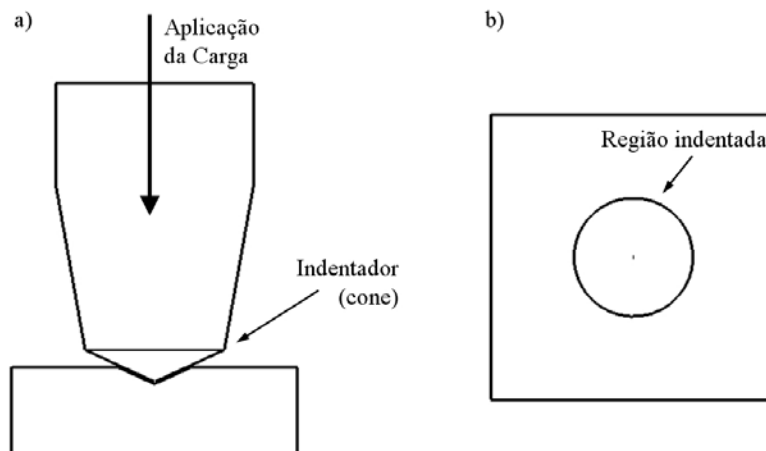


Figura 14 - Dureza HR_C : a) penetrador em forma de cone; b) indentação

O ensaio de dureza Vickers (HV) é o processo empregado amplamente em trabalhos de pesquisa, pois fornece uma escala contínua de dureza para uma determinada carga, podendo determinar a dureza desde materiais muito moles até extremamente duros [38]. O penetrador consiste de uma ponta de diamante com forma de pirâmide quadrada e ângulo de 136° (Figura 15). A carga varia de 5 a 120 Kgf. A dureza Vickers é expressa pela seguinte fórmula: $HV(P) = 1,854 \cdot P / d^2$, onde P é a carga aplicada em Kgf e d é o valor médio das diagonais da indentação em mm.

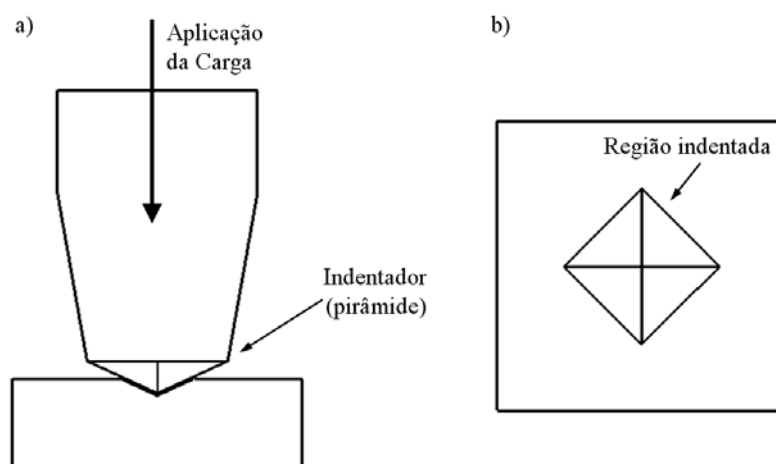


Figura 15 – Dureza HV: a) penetrador em forma de pirâmide; b) indentação

2.4 Caracterização de superfícies

A superfície pode ser definida como o limite, ou a fronteira, de um elemento de espaço fechado, ou corpo técnico, sendo então descrita somente sob o aspecto geométrico e limitando a análise à fronteira entre o corpo do componente (corpo técnico) e o meio ambiente[44]. A usinagem representa um dos principais processos de fabricação na indústria, desta forma as superfícies obtidas por usinagem, apresentam característica superficial que pode ser dividida em três camadas distintas, uma denominada de camada superficial externa, que apresenta um filme de lubrificante (graxa/óleo) e uma camada revestimento reativo, uma segunda camada, denominada de camada superficial interna, constituída principalmente de material encruado

(resultado do processo) e/ou termicamente afetado, e a área não afetada, onde se encontra o material de base da peça, conforme ilustrado na Figura 16 [44].

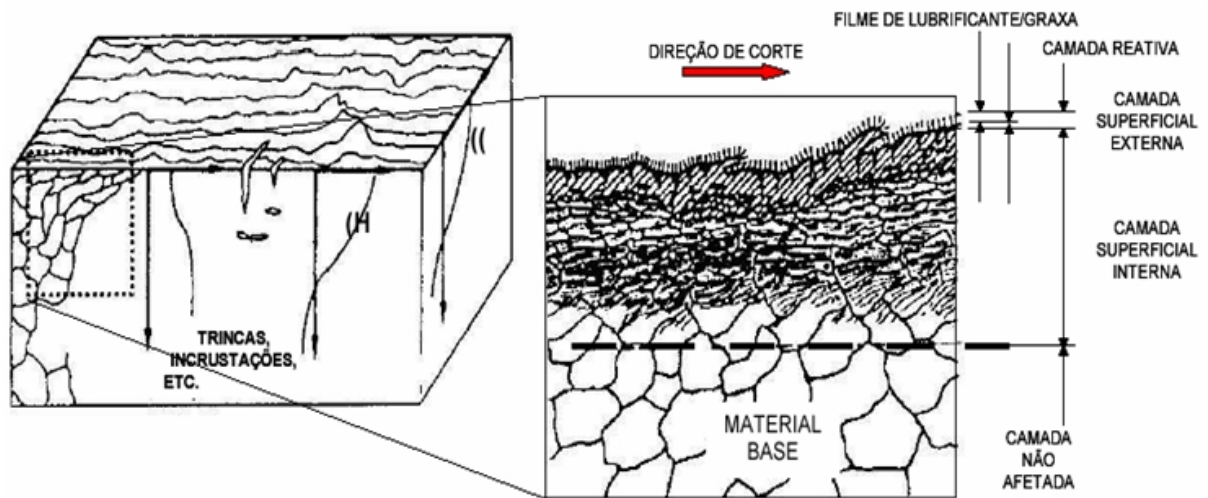


Figura 16– Topografia e camadas superficiais de uma peça usinada [45]

A esta definição básica de superfície é necessário se adicionar os conceitos de: superfície geométrica, superfície real e superfície efetiva, conforme ilustrado na Figura 17. A superfície geométrica é aquela especificada em projeto e que possui a geometria e as características topográficas ideais para o desempenho de uma determinada função, mas os desvios gerados nos processos de fabricação não permitem que ela seja obtida de forma absoluta. A superfície real é aquela que de fato é obtida após o último processo de fabricação pelo qual passa o componente. Os instrumentos de medição, por sua vez, não conseguem captar todas as características e irregularidades da superfície, apresentando como resultado o que se denomina de superfície efetiva, a qual é uma aproximação da superfície real [44].

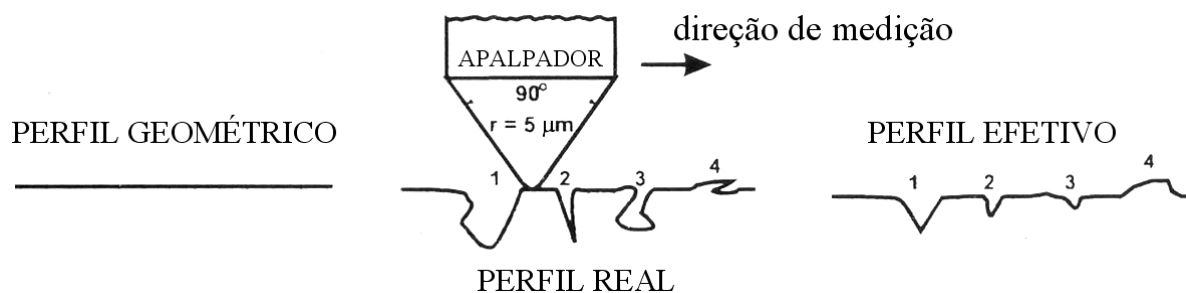



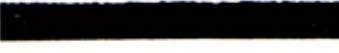


Figura 17 - Exemplos de perfis geométrico, real e efetivo [44]

A fim de atender especificações de projeto, uma superfície técnica deve possuir certas características e propriedades tecnológicas (físicas e químicas) e geométricas. A norma DIN 4760 [46], classifica os desvios de forma em seis diferentes ordens, conforme a Tabela 1, que apresenta ainda, ilustrativamente, exemplos de desvio de forma, representado numa seção do perfil.

Tabela 1 - Desvio de forma em superfícies técnicas segundo a norma [DIN 4760][46]

| Desvios de forma (representado numa seção do perfil) | Exemplos para tipos de desvios | Exemplos para origem de desvios |
|---|-----------------------------------|--|
| 1ª ordem: Desvio de forma  | Não plano Ovalado | Defeitos nas guias das máquinas-ferramentas; deformação por flexão da máquina ou da peça; fixação errada da peça; deformações devido a temperatura, desgaste |
| 2ª ordem: Ondulação  | Ondas | Fixação excêntrica ou defeito de forma de uma fresa; vibrações da máquina-ferramenta, da ferramenta ou da peça. |
| 3ª ordem: Rugosidade  | Ranhuras | Forma do gume da ferramenta; avanço ou profundidade de corte. |
| 4ª ordem: Rugosidade  | Estrias Escamas Ressaltos | Processo de formação do cavaco (cavaco arrancado, cavaco de cisalhamento, gume postiço); jateamento de areia; tratamento galvânico. |
| 5ª ordem: Rugosidade Não mais representável graficamente em forma simples | Estrutura | Processo de cristalização, modificação da superfície por ação química (ex. decapagem), processos de corrosão. |
| 6ª ordem: Não mais representável graficamente em forma simples | Estrutura reticulada do material | Processos físicos e químicos da estrutura do material; tensões e deslizamentos da rede cristalina. |

As propriedades físicas e químicas podem ser verificadas através de ensaios e análises no material e as propriedades geométricas através de medições de forma e superfície [47].

Os desvios repetitivos e randômicos da superfície real em relação à superfície geométrica formam a textura. A superfície de uma peça usinada é composta de muitos componentes de textura, os quais são gerados durante o processo de fabricação. Os componentes da textura são: ondulação e rugosidade (incluindo-se aí os sulcos ou ranhuras). A estes se somam também as falhas. Os sulcos indicam a direção predominante das marcas ou ranhuras deixadas pela ferramenta sobre a superfície da peça. Cada processo de fabricação deixa marcas características sobre a superfície trabalhada. O processo de fresamento produz

um padrão de sulcos regular e repetitivo, com uma direção preferencial claramente observável, com sulcos bem definidos [44].

A textura superficial, a qual pode ser entendida como sendo o arranjo das características da superfície vista a olho nu, compreende uma região macrogeométrica, composta de elementos tais como raias, falhas, crateras e trincas e uma região microgeométrica, definida pelos desvios de segunda a quinta ordem [46, 48] (Figura 18). O termo textura superficial tem sido muito utilizado para descrever a qualidade geral da superfície de uma peça, esquecendo-se aí as propriedades relativas à integridade. Outro termo muito utilizado, na literatura e no meio industrial, para descrever a qualidade geral de uma superfície é o acabamento superficial [44].

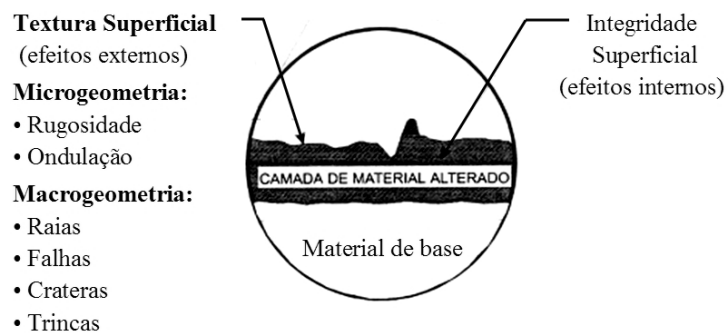


Figura 18 - Seção simulada da superfície de uma peça com suas camadas inferiores [49]

Segundo Tabenkin [50], o acabamento ou textura pode ser descrito pela quantidade e direção dos vales e picos que compõem uma superfície. A análise da superfície, em termos práticos, pode ser feita baseada em três componentes básicos: rugosidade, ondulação e forma. Geralmente os três existem simultaneamente, sobrepostos (Figura 19). Em muitas situações, é desejável examinar cada condição independentemente. Na maioria dos casos pode-se afirmar que a rugosidade tem o comprimento de onda menor que a ondulação que, por sua vez, tem o comprimento de onda menor que o desvio de forma.

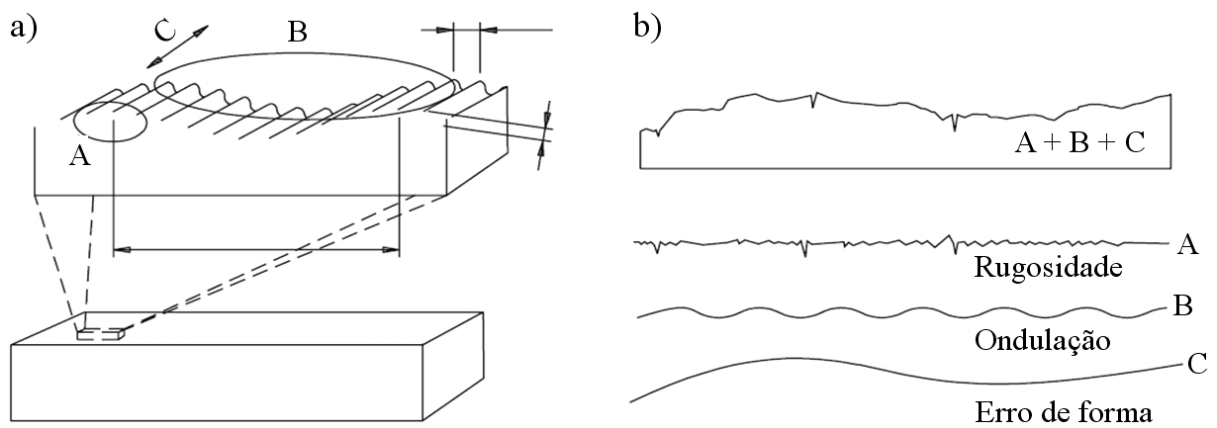


Figura 19 – Composição da superfície: a) representação; b) componentes básicos sobrepostos [51]

A medição dos componentes da textura é realizada usando unidades de comprimento distintas, chamadas *cut-offs*. O comprimento selecionado do *cut-off*, juntamente com várias técnicas de filtros elétricos, permite a medição de cada um dos componentes separadamente [50].

Os parâmetros verticais são as medidas quantitativas usadas para descrever e comparar características de superfícies. Embora existam mais de 100 parâmetros, na prática utilizam-se um ou dois, os mais adequados para cada situação. A medição destes parâmetros é feita, normalmente, em cinco comprimentos de medição (*cut-offs*) contínuos [50]. A literatura aponta para a utilização de valores normalizados de rugosidade, comuns às operações de usinagem corriqueiras, tais como a rugosidade média aritmética R_a , rugosidade média R_z , rugosidade máxima $R_{máx}$ e rugosidade máxima entre os cinco intervalos de medição R_y .

Superfícies geradas por processos de usinagem, tais como o fresamento e o torneamento, caracterizam-se por apresentar uma topografia direcional, com sulcos ordenados (Figura 20), sendo que a diferença de rugosidade longitudinal e transversal aos sulcos pode ser muito grande [32]. Isto porque quando se mede longitudinalmente não são captados os desvios de 3ª ordem. O gráfico do perfil de rugosidade representa, em uma seção bidimensional, a topografia da superfície e os valores de rugosidade medidos na direção do avanço da ferramenta ou perpendicular a ela [52].

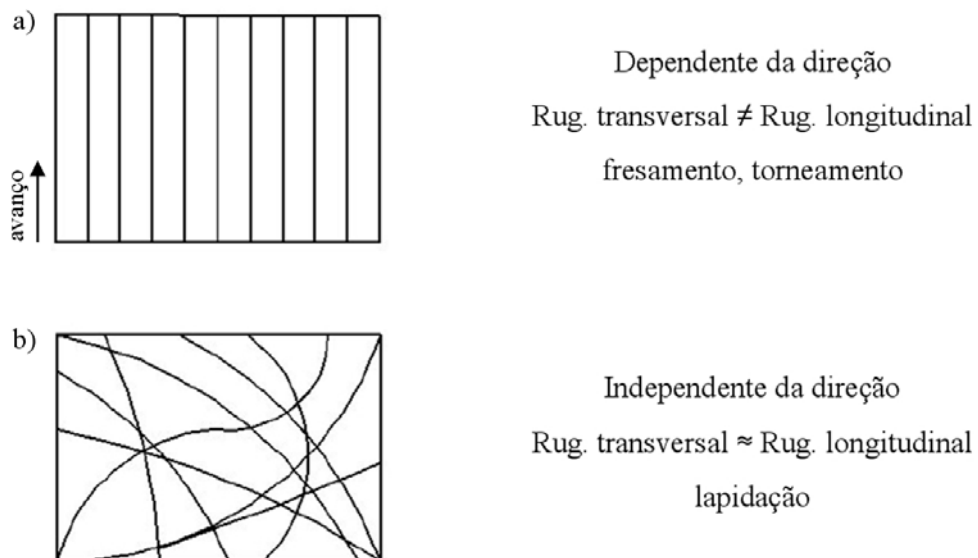


Figura 20 - Direção de medição: a) sulcos ordenados; b) sulcos não-ordenados [32]

A visualização da textura por imagens obtidas microscopicamente possibilita o apoio à interpretação da situação da superfície usinada. A uniformidade ou não das ranhuras e cristas entre picos decorrentes da passagem da ferramenta, em conjunto com valores de rugosidade, facilitam o entendimento e análise da qualidade superficial [53].

2.4.1 Rugosidade

É o conjunto de irregularidades causadas pelo processo de fabricação, caracterizadas por pequenas saliências e reentrâncias na topografia da superfície.

O princípio de medição mecânica da rugosidade de uma superfície segue o mesmo princípio de funcionamento empregado no perfilômetro desenvolvido por Gustav Schultz em 1934. Os apalpadores mecânicos são em geral fabricados em material de altíssima dureza e resistência ao desgaste como o diamante. Em um rugosímetro de contato, o apalpador percorre o comprimento total de medição segundo uma trajetória linear e com velocidade constante. A topografia da seção apalpada (saliências e reentrâncias) faz com que o apalpador tenha um movimento vertical, que é transformado em um sinal elétrico por um transdutor. Este sinal é amplificado, filtrado e armazenado na forma de pares de pontos. Estes pontos são processados e podem ser expostos graficamente na forma de um perfil de rugosidade, de

ondulação ou uma combinação de ambos. Perfil este que é uma representação bidimensional de uma seção da superfície [44]. Na Figura 21, visualiza-se, de forma esquemática, o princípio de operação de rugosímetros com apalpador mecânico, que pode ser do tipo com referência flutuante (patim) ou do tipo com referência fixa.

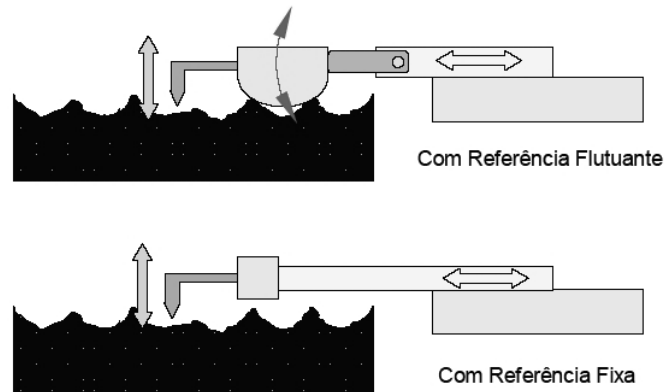


Figura 21 - Princípio de operação de rugosímetros com apalpador mecânico

Os patins de apoio são comuns nos rugosímetros portáteis, sendo utilizados para que a própria superfície da peça possa servir de referência no levantamento de um perfil de rugosidade. Dependendo da relação entre o raio do patim e a ondulação da superfície poderá haver uma filtragem parcial ou até mesmo total da ondulação. Na realidade um patim funciona como um filtro passa alta, bloqueando a ondulação e fazendo com que o estilete responda somente à rugosidade [54] [55].

Os sistemas de medição de rugosidade apresentam algumas limitações, tais como a incapacidade do apalpador em penetrar em vales muito pequenos, devido à geometria e raio da ponta do mesmo, a possibilidade de riscar a superfície quando em deslocamento, devido à força exercida pelo apalpador, além de problemas inerentes aos sistemas mecânicos em processar e amplificar microdeslocamentos (problema de sensibilidade). Mesmo com a pequena força de medição, em torno de 4 mN para pontas de raio 5 μm , frequentemente existe pressão suficiente na zona de contato entre a ponta do apalpador e a superfície da amostra em medição para causar algum dano permanente, especialmente em picos muito delgados e em

materiais macios, com dureza inferior a 200 HV [44]. A dimensão mínima do raio do apalpador e a sua geometria ainda não são suficientemente pequenas para permitir a exploração do fundo das micro-cavidades, limitando a capacidade de apalamento da superfície, como mostra a Figura 17.

Os rugosímetros dotados de apalpadores mecânicos apresentam grande versatilidade, e são capazes de proporcionar muitas informações sobre a qualidade em uma ampla faixa de superfícies, além de poderem apresentar resultados de rugosidade através de vários parâmetros.

2.4.1.1 Avaliação de rugosidade

Toma-se o perfil efetivo de uma superfície num comprimento L_m , dado como o comprimento total de avaliação. Chama-se o comprimento L_e de comprimento de amostragem (*cut-off*) (NBR 6405/1988), conforme ilustrado na Figura 22. É recomendado pela norma ISO que os rugosímetros devam medir cinco comprimentos de amostragem e devem indicar o valor médio. Como o perfil apresenta rugosidade e ondulação, o comprimento de amostragem filtra a ondulação.

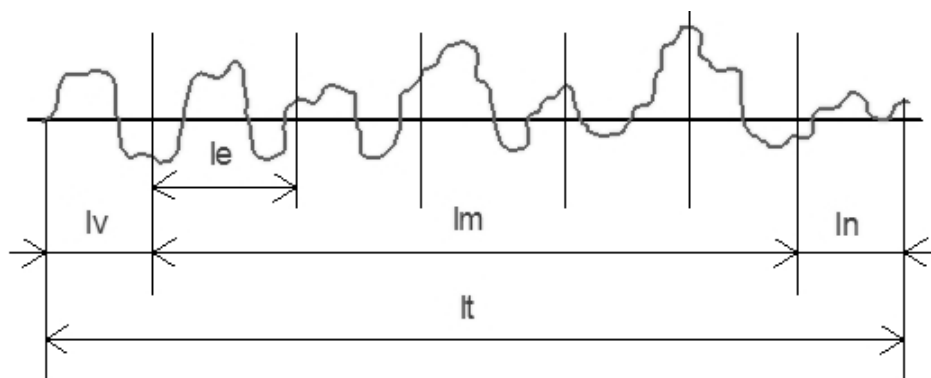


Figura 22 – Comprimento total de avaliação L_m e comprimento de amostragem L_e [56]

Existem dois sistemas básicos de medição de rugosidade, o da linha média M e o da envolvente E. No Brasil, pelas normas ABNT NBR 6405/1988 e NBR 8404/1984 é adotado o sistema M. No sistema M, todas as grandezas de medição da rugosidade são definidas a partir

do conceito de linha média, sendo ela definida por uma linha paralela à direção do perfil, no comprimento de amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual a soma das áreas inferiores, no comprimento de amostragem L_e .

Para a determinação dos valores do comprimento total de avaliação L_m e o comprimento de amostragem L_e (*cut-off*), segue-se as orientações normalizadas. De acordo com a norma DIN, adotada para as medições de rugosidade deste trabalho, os valores são classificados em faixas que consideram a amplitude vertical para os parâmetros R_a , e R_z conforme expresso nas Tabela 2 e Tabela 3 [57].

Tabela 2 – Comprimento total de avaliação e de amostragem para R_a , conforme norma DIN [57]

| Faixa de R_a (μm) | Comprimento de amostragem L_e (<i>Cut-off</i>) (mm) | Comprimento total de avaliação L_m (mm) |
|-------------------------------------|--|--|
| $R_a \leq 0,02$ | 0,08 | 0,4 |
| $0,02 < R_a \leq 0,1$ | 0,25 | 1,25 |
| $0,1 < R_a \leq 2$ | 0,8 | 4 |
| $2 < R_a \leq 10$ | 2,5 | 12,5 |
| $10 < R_a$ | 8 | 40 |

Tabela 3 – Comprimento total de avaliação e de amostragem para R_z , conforme norma DIN [57]

| Faixa de R_z (μm) | Comprimento de amostragem L_e (<i>Cut-off</i>) (mm) | Comprimento total de avaliação L_m (mm) |
|-------------------------------------|--|--|
| $R_z \leq 0,1$ | 0,08 | 0,4 |
| $0,1 < R_z \leq 0,5$ | 0,25 | 1,25 |
| $0,5 < R_z \leq 10$ | 0,8 | 4 |
| $10 < R_z \leq 50$ | 2,5 | 12,5 |
| $50 < R_z$ | 8 | 40 |

2.4.1.2 Parâmetros verticais

Os parâmetros de rugosidade representam a amplitude dos desvios geométricos e são chamados de parâmetros verticais. No monitoramento do processo, a rugosidade média R_a (*roughness average*) representa, de forma efetiva, a estabilidade. Assim compreende-se porque este é o parâmetro predominantemente utilizado nas indústrias [32]. A rugosidade R_a é

o resultado da média aritmética dos valores absolutos dos afastamentos do perfil real à linha média (Y_i), conforme equação a equação 4.

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (4)$$

É um parâmetro empregado em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos bem orientados, tais como os obtidos pelos processos de fresamento e torneamento. Não define a forma das irregularidades do perfil, não ocorrendo nenhuma distinção entre picos e vales. A Figura 23 ilustra um perfil real (A) e sua linha média, as áreas relativas aos vales rebatidas acima da linha média (B) e a linha correspondente ao valor R_a , determinando o seu afastamento em relação à linha média (C).

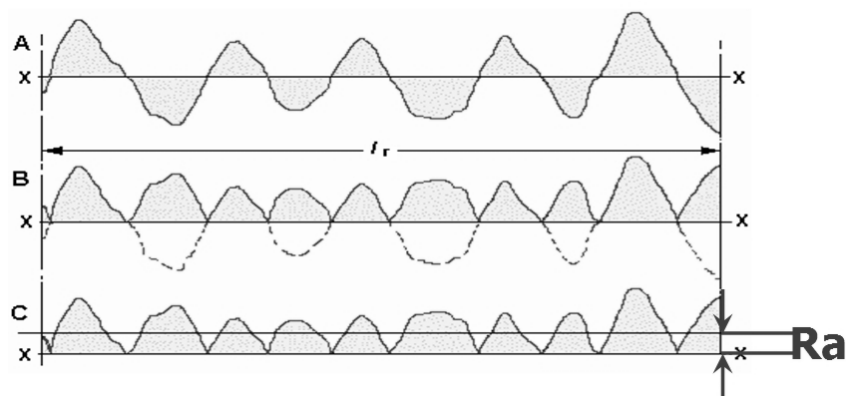


Figura 23 – Parâmetro R_a : A) perfil real; B) perfil com valores absolutos; C) linha valor R_a [56]

A Tabela 4 lista os valores típicos de rugosidade média R_a para superfícies de engenharia acabadas por diferentes processos de fabricação [52].

Tabela 4 - Valores típicos de rugosidade média para superfícies de engenharia [52]

| Processo | R_a (μm) |
|----------------------------|-------------------------|
| aplainamento, perfilamento | 1 – 25 |
| fresamento | 1 – 6 |
| trefilação, extrusão | 1 – 3 |
| torneamento, furação | 0,4 – 6 |
| retífica | 0,1 – 2 |
| brunimento | 0,1 – 1 |
| polimento | 0,1 – 0,4 |
| polimento com disco | 0,05 – 0,04 |

Entretanto, medindo-se somente o R_a , não são detectadas ocasionais elevações e reentrâncias. Como ele representa uma média, o aparecimento de um pico ou de um vale não típico pode mudar substancialmente o seu valor, não representando mais o valor médio da superfície. A Figura 24 ilustra duas superfícies com valores de rugosidade R_a muito próximos, mas com valores R_z e R_y muito diferentes. Desta forma os parâmetros R_z e R_y são muito utilizados quando se deseja avaliar e detectar desvios locais de picos ou vales [50]. São parâmetros de máxima, transmitindo uma melhor representação da média das ordenadas de um perfil de rugosidade.

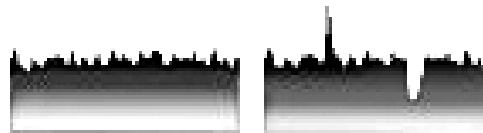


Figura 24 – Superfícies com valores similares de R_a e diferentes para R_z e R_y [50]

O parâmetro R_z (DIN) é determinado através da medição da distância vertical do mais alto pico até o mais profundo vale, dentro de cada um dos cinco comprimentos da amostra (L_e). O valor R_z é a média aritmética entre os cinco valores obtidos, calculada pela equação 5.

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (5)$$

O parâmetro R_z é muito útil na comparação entre superfícies oriundas de um mesmo processo de fabricação, sendo mais sensível a picos ou vales locais em relação a R_a . A Figura 25 ilustra um exemplo de perfil com os cinco comprimentos de amostragem (*cut-off*).

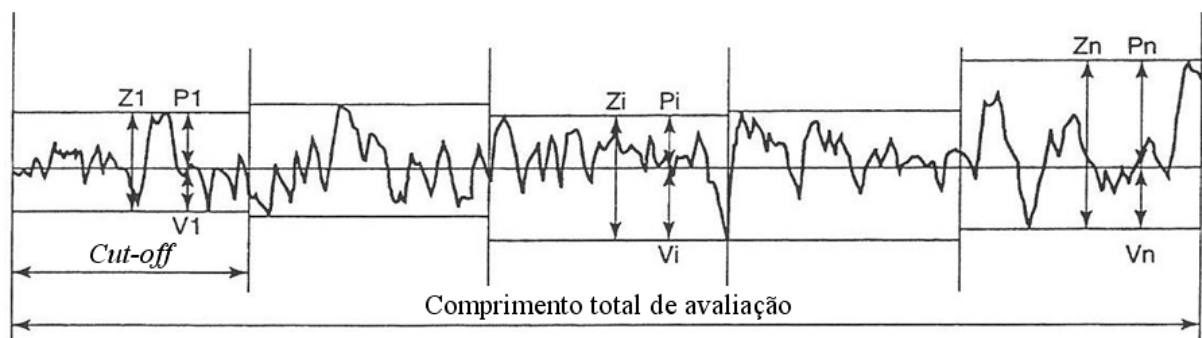


Figura 25 - Parâmetro de rugosidade R_z [56]

O parâmetro R_y (DIN) é determinado através da medição da distância vertical do mais alto pico até o mais profundo vale, dentro de cada um dos cinco comprimentos da amostra (L_e). O valor R_y é o maior valor encontrado entre os cinco comprimentos de amostragem. É um parâmetro útil para a análise de superfícies onde o perfil efetivo é periódico, sendo de fácil obtenção em equipamentos de medição que fornecem o gráfico da superfície. No exemplo ilustrado na Figura 26, o valor de R_y corresponde ao último dos cinco comprimentos de amostragem (*cut-off*).

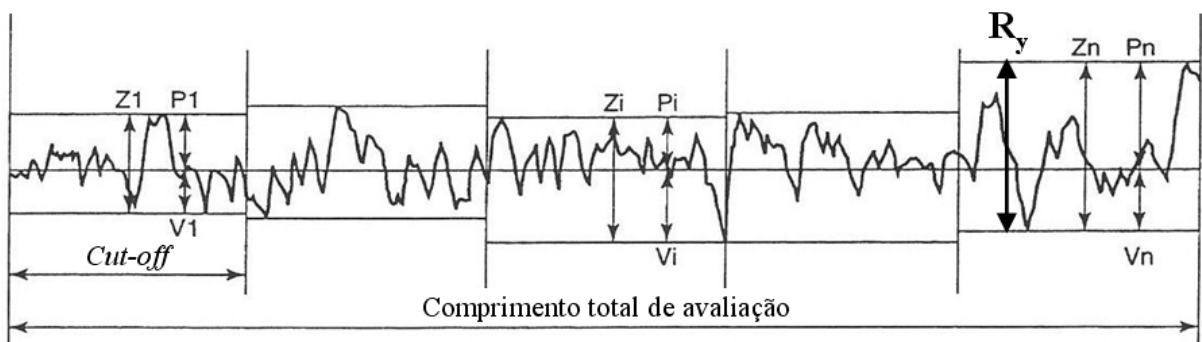


Figura 26- Parâmetro de rugosidade R_y [56]

2.4.2 Microscopia óptica

A microscopia óptica é um método comumente utilizado para a visualização e caracterização de texturas de superfícies. Com as imagens obtidas por este método, é possível a determinação qualitativa da textura da superfície.

Na microscopia óptica, o contraste da imagem é resultado da diferença de reflectividade da luz nas diversas regiões da superfície, uma vez que o sistema é constituído basicamente pela fonte de iluminação e do sistema de lentes. Somente a superfície pode ser observada e a mesma precisa ser cuidadosamente preparada de maneira a revelar os detalhes da topografia.

A Figura 27 ilustra um exemplo de imagem obtida através de câmera CCD, onde é possível visualizar a textura da superfície e as marcas geradas pela usinagem [58].

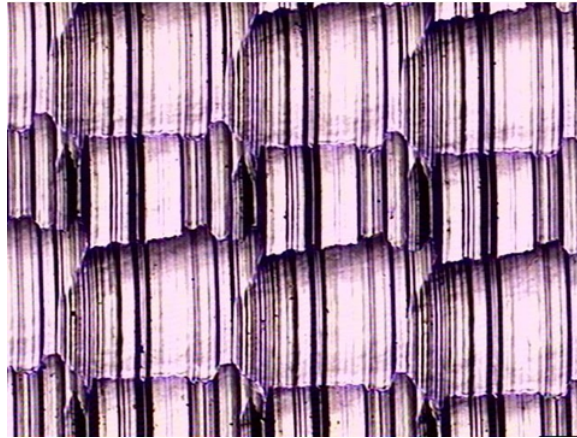


Figura 27- Exemplo de imagem obtida por microscopia óptica e câmera CCD [58]

Uma das limitações da microscopia óptica é a reduzida profundidade de foco quando são analisadas amostras com topografia formadas por picos e vales. Outra limitação é o aumento máximo possível, limitado em cerca de 2000 vezes. Como consequência, pequenos detalhes estruturais não são possíveis de serem detectados através desta técnica [59].

A microscopia óptica é também utilizada em análises metalográficas, para se obter imagens das características microestruturais sobre uma superfície polida e atacada quimicamente com aumentos de 1 a 2000 vezes. É possível se analisar o grão, as fases estruturais e dimensões da amostra.

2.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As principais diferenças entre o microscópio óptico e o microscópio eletrônico de varredura é que, no primeiro, a amostra é iluminada por um feixe de luz visível, e no segundo, por um feixe de elétrons, além do que, no microscópio eletrônico de varredura, o olho humano é substituído por um detector de elétrons.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é um importante e versátil método para a visualização e caracterização de texturas de superfícies. Este equipamento é geralmente utilizado para o estudo de estruturas superficiais ou sub-superficiais de amostras com

dimensões relativamente grandes. As imagens têm alta profundidade de foco, o que significa obter diferentes relevos da superfície da amostra simultaneamente em foco. O MEV produz imagens de alta resolução, o que garante obter alta ampliação de detalhes (até 300.000 vezes) sem perda de nitidez [60]. As imagens fornecidas pelo MEV possuem um caráter virtual, pois o que é visualizado no monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, ao contrário da radiação de luz a qual estamos habitualmente acostumados [61].

A Figura 28 ilustra um exemplo de imagem obtida em MEV da superfície usinada de um corpo-de-prova de aço AISI H13 com dureza na faixa de 52 a 54 HR_C [58]. Na fotografia, com magnificação de 1000 vezes, pode-se visualizar a deformação plástica ocorrida no material.

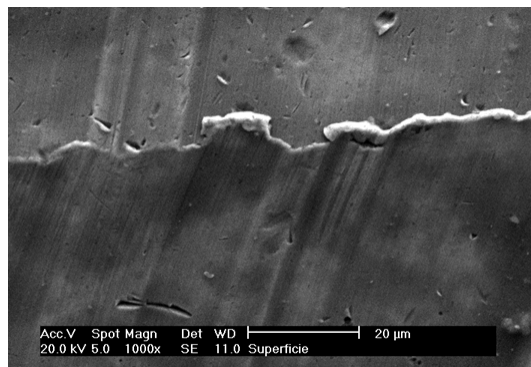


Figura 28- Exemplo imagem obtida por MEV [58]

O princípio de funcionamento do MEV (Figura 29), consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 KV. Essa variação de voltagem permite a variação da aceleração dos elétrons, e também provoca o aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando numa aceleração em direção ao eletrodo positivo. A correção do percurso dos feixes é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva. A objetiva ajusta o foco dos feixes de elétrons antes dos

elétrons atingirem a amostra analisada [61]. Um detector de elétrons é responsável pela geração da imagem reproduzida na tela.

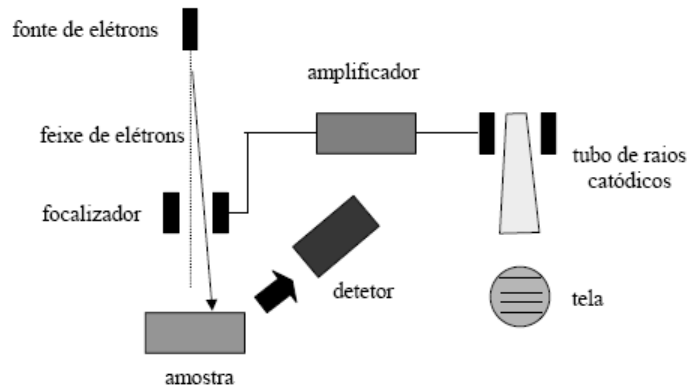


Figura 29- Elementos básicos de um MEV [TENTARDINI, 2000]

Com o MEV é possível obter imagens tanto pelo padrão de difração de elétrons secundários como de elétrons retroespalhados. Utilizando-se o padrão de elétrons secundários, obtêm-se imagens da topografia da superfície, enquanto que o padrão de elétrons retroespalhados, proporciona imagens com diferença de contraste de acordo com o elemento que está sendo analisado, por exemplo, elementos pesados como o ferro aparecem mais claros e elementos leves como o carbono aparecem escuros.

Também é possível realizar uma análise química da amostra, identificando os elementos presentes na superfície. Este tipo de análise é importante para identificar os elementos do material base, bem como a presença de material aderido, proveniente do processo de usinagem.

2.4.4 Microscopia de força atômica (AFM)

Embora a análise da textura por meio de perfis da superfície seja de uso corrente e consagrado, ela não garante uma visão completa da superfície, uma vez que ela é bidimensional (2D) e a topografia da superfície é tridimensional (3D) [44].

Com o microscópio de força atômica, AFM (*Atomic Force Microscope*) é possível se fazer a medição tridimensional da textura de superfícies. Permite que sejam feitas medições em escala atômica tanto em superfícies condutoras como em superfícies não condutoras. É um método de medição por estilete, havendo contato entre a superfície e a sonda, ilustrado na Figura 30 [44]. Tal como nos sistemas de medição de rugosidade de contato, o AFM também apresenta limitação, quanto à capacidade do estilete em penetrar em vales muito pequenos ou muito profundos, devido à sua geometria e raio da ponta. O estilete utilizado em nosso experimento apresenta uma geometria de pirâmide triangular com raio de ponta na ordem de 10 a 40 nm e altura de 2,5 a 3,5 μm , dimensões que restringem sua aplicação a texturas com rugosidade reduzida, compatível com a geometria e dimensão do estilete.

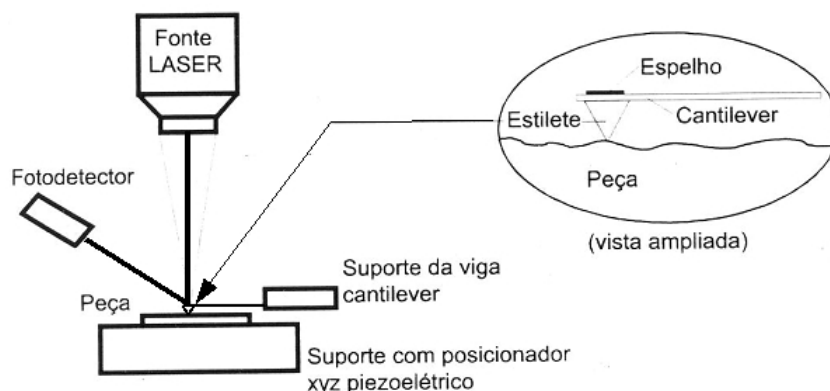


Figura 30- Esquema de funcionamento de um microscópio de força atômica [44]

Na medição, o estilete é posicionado de maneira tal a facear a superfície e esta é transladada na horizontal e na vertical por drives piezoelétricos. Assim quando a amostra é deslocada horizontalmente, a viga cantilever sofre deflexões, as quais são registradas produzindo uma imagem tridimensional da rugosidade em nível atômico [44]. Uma vez que o AFM é freqüentemente utilizado para estudar estruturas menores do que 1 μm , temos que verificar se os equipamentos disponíveis operam com deslocamentos vertical e horizontal compatíveis com superfícies usinadas.

A Figura 31 ilustra um exemplo de imagem obtida através da microscopia de força atômica (AFM), onde é possível visualizar a topografia tridimensional da superfície originada pela usinagem.

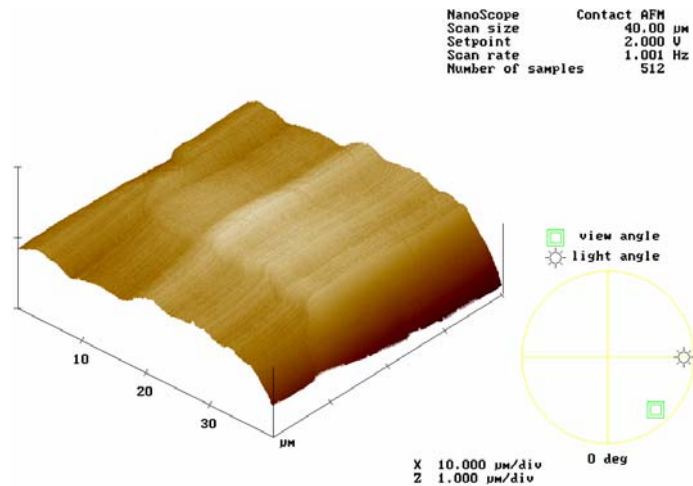


Figura 31- Exemplo de imagem obtida por AFM [IFUSP 2005]

2.4.5 Outros métodos-tendências

A análise de perfis de superfícies 3D tem sido muito evidenciada pela indústria e centros acadêmicos, por representar melhor uma superfície, uma vez que todas as superfícies interagem em três dimensões. Equipamentos utilizando um feixe de luz como elemento de apalpamento são adequados para a análise 3D da topografia de superfícies e medição de rugosidade. Uma característica importante no uso de sondas ópticas é a ausência de contato mecânico com a superfície. O feixe de luz é mais delgado do que a ponta de um estilete, aumentando a capacidade de penetração do feixe óptico nas irregularidades, captando corretamente o padrão de textura [55].

A fim de caracterizar melhor as superfícies usinadas, pesquisadores da área preocupam-se em estimar a tensão residual que permanece no componente após o processo de usinagem. As tensões residuais mecânicas são devidas ao escoamento plástico não homogêneo causado por forças externas ou gradiente térmico, efeito de orientação cristalina,

de contorno de grão, etc. As tensões residuais na superfície podem ser de tração ou de compressão, podendo ser avaliada através da técnica que emprega o princípio da difração de raios x.

3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo, serão descritos os procedimentos experimentais, o planejamento e a definição dos equipamentos, ferramenta e material utilizados na obtenção das superfícies, e quais os métodos foram adotados para a avaliação e análise das texturas, visando atingir os objetivos propostos no trabalho.

3.2 Planejamento experimental

Para simular a condição de acabamento em moldes e matrizes, os ensaios de fresamento foram definidos para uma geometria de baixa complexidade, definida por uma superfície plana inclinada, em um corpo-de-prova de dimensões definidas e reduzidas.

Os parâmetros de usinagem, tais como a velocidade de corte (v_c) e o incremento lateral (a_e) foram determinados a partir de resultados obtidos da realização de ensaios preliminares.

3.2.1 Variáveis de entrada

No fresamento de superfícies, há um grande número de variáveis de entrada ou independentes que podem exercer alguma influência na formação da textura. Como neste trabalho pretende-se avaliar aspectos da textura superficial, foram alvo do estudo apenas variáveis que influenciam diretamente na rugosidade. A velocidade de corte e o avanço, que também exercem influência na rugosidade do processo, foram mantidas constantes.

3.2.1.1 Estratégia de corte

Definiu-se como variável de entrada a estratégia de corte, onde se varia a trajetória e orientação da ferramenta de corte em relação ao plano do corpo-de-prova no processo de usinagem. O corpo-de-prova foi fixado em uma morsa com ângulo de inclinação definido de

60°. Definiu-se esta inclinação pelo fato de ser uma condição ainda pouco estudada em relação às estratégias de usinagem, além de representar uma condição que favorece a ocorrência de instabilidade da ferramenta. Aumentando-se a inclinação do plano em relação ao eixo da fresa, aumenta-se também o raio efetivo de corte, o que possibilita o emprego de maiores velocidades de corte, principalmente quando se tem a limitação de rotação máxima imposta pela máquina-ferramenta. Esta foi a principal motivação para a determinação do ângulo de inclinação. Nesta condição evita-se o contato com a região central da ferramenta, onde a velocidade de corte é muito pequena ou nula, resultando no amassamento do material e num acabamento ruim. A ferramenta com as direções de avanço (f_z) e incremento lateral (a_e) sobre o plano inclinado, nas quatro estratégias de corte consideradas, está ilustrada na Figura 32. Estas estratégias estudadas foram selecionadas por serem largamente empregadas na indústria durante o processo de usinagem de acabamento de cavidades de moldes e matrizes.

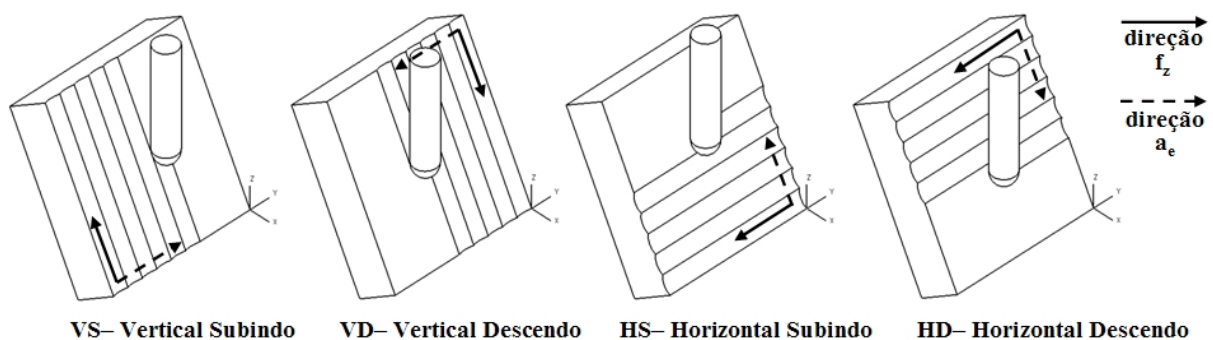


Figura 32- Plano inclinado a 60° e diferentes trajetórias de corte.

As estratégias consideradas neste trabalho são todas de sentido de corte único (concordante), expressando trajetórias vertical e horizontal ao plano inclinado, com corte ascendente e descendente. Para estas condições a usinagem teve as velocidades tangenciais calculadas, considerando a média dos diâmetros efetivos de corte entre as estratégias ascendentes e descendentes. Para os ensaios foram ajustados e utilizados dados de rotação da ferramenta e avanço de mesa da máquina CNC iguais para todas as estratégias consideradas. Os dados de corte foram determinados a partir da realização de testes preliminares.

Utilizaram-se para os testes preliminares as velocidades de corte (v_c) de 150 e 180 m/min e os valores de incremento lateral (a_e) de 0,1 e 0,2 mm, valores estes conforme recomendação do fabricante da ferramenta para as condições do material e tipo de operação de usinagem.

A programação CNC, responsável pelas movimentações da ferramenta em relação à superfície trabalhada, foi gerada empregando um software CAM da UGS versão NX4, sistema onde foram definidas e inseridas todas as informações e dados necessários para gerar o caminho ou trajetória da ferramenta, bem como os dados tecnológicos de corte (avanço e velocidade).

3.2.1.2 Material utilizado nos ensaios

Tendo em vista reproduzir as condições reais de usinagem enfrentadas pelas ferramentarias (fabricantes de moldes e matrizes), optou-se pela utilização do aço AISI H13 endurecido. Escolheu-se este material pelo fato de possuir características de difícil usinabilidade e por ser frequentemente utilizado na confecção de moldes e matrizes.

O material utilizado nos ensaios foi produzido pela Siderúrgica Gerdau Aços Finos Piratini. A composição química média foi fornecida pelo fabricante, conforme certificado de qualidade e apresentado na Tabela 5.

Tabela 5- Composição química percentual do aço AISI H13

| Análise | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | W | V |
|---------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| [%] | 0,40 | 0,94 | 0,36 | 0,016 | 0,005 | 5,04 | 1,22 | 0,01 | 0,88 |

Para o trabalho experimental foram confeccionados corpos-de-prova a partir de material do mesmo lote e de um bloco único. O material foi preparado e devidamente identificado em blocos iguais de dimensão 50 mm x 50 mm x 25 mm, tamanho suficiente para se obter uma área de superfície usinada necessária para todas as análises e proporcionar uma fixação rígida. No corte teve-se o cuidado de manter a mesma orientação para todos os corpos-de-prova, com o mesmo sentido de laminação. Utilizou-se quatro corpos-de-prova,

sendo um empregado nos ensaios preliminares e três para os ensaios programados e suas repetições.

O tratamento térmico para obtenção da dureza desejada foi realizado em uma empresa especializada, todos os blocos no mesmo processo, garantindo a eles dureza equivalente. Os corpos-de-prova foram submetidos a um tratamento térmico de têmpera, aquecidos à temperatura de 1030 °C e resfriados em banho de sal (martêmpera) à temperatura de 200 °C. Após o material passou pelo processo de revenimento, em três etapas, a 530 °C, 540 °C e 530 °C, com tempo de permanência no forno de 1 hora em cada etapa com posterior resfriamento ao ar.

Os corpos-de-prova passaram por uma análise metalográfica, a fim de verificar as alterações ocorridas em sua microestrutura. A Figura 33 ilustra fotografias da microestrutura do material antes e depois do tratamento térmico para o endurecimento. Na fotografia A visualiza-se a microestrutura antes do primeiro tratamento térmico, correspondendo ao aço AISI H13 esferoidizado, da forma como é recebido da siderúrgica. Já a fotografia B, ilustra a martensita revenida, microestrutura do aço obtida após o tratamento térmico de têmpera e revenimento múltiplo.

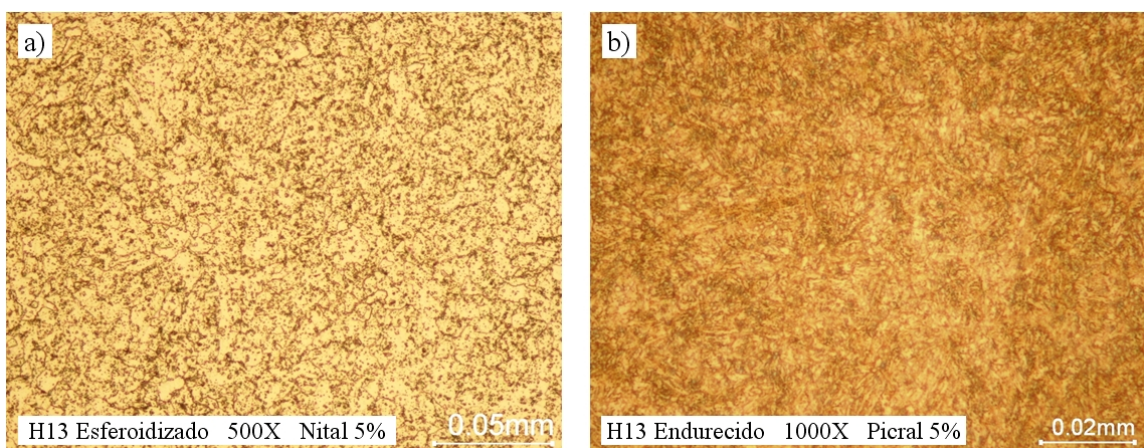


Figura 33- Micro-estrutura do material: a) antes do tratamento térmico ; b) após tratamento térmico

Mediu-se a dureza nos corpos-de-prova, em cinco pontos na face lateral, conforme a Figura 34.

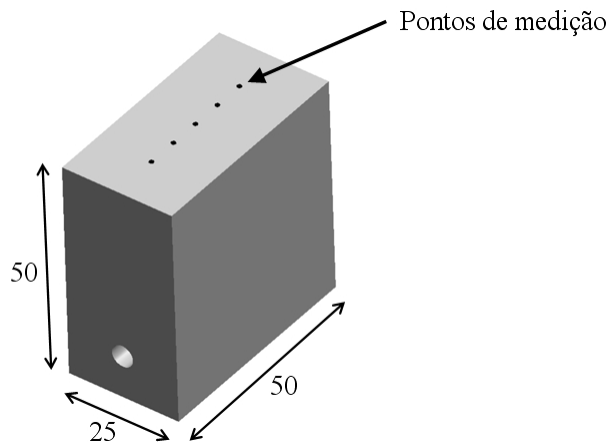


Figura 34- Corpo-de-prova com indicação dos pontos de medição de dureza

O valor médio da dureza ficou em torno de 53,9 HR_C, equivalente a 571 HV10, conforme a Tabela 6.

Tabela 6– Valores de dureza medidos nos corpos-de-prova

| CP n° | Pontos medidos (HR _C) | | | | | HR _C | HV10 |
|-------|-----------------------------------|------|------|------|------|-----------------|------|
| 1 | 54,5 | 53,5 | 54,0 | 53,0 | 54,0 | 53,8 | 570 |
| 2 | 53,0 | 54,0 | 54,0 | 53,5 | 53,0 | 53,9 | 572 |
| 3 | 53,5 | 54,5 | 53,5 | 53,5 | 53,5 | 53,7 | 568 |
| 4 | 53,0 | 54,5 | 54,0 | 54,5 | 54,0 | 54,0 | 574 |
| | Média | | | | | 53,9 | 571 |

As faces do corpo-de-prova com dimensões de 50 mm x 50 mm, foram retificadas para assegurar o paralelismo entre elas, proporcionando um bom assentamento no dispositivo de plano inclinado utilizado na fixação junto à morsa, conforme Figura 35.

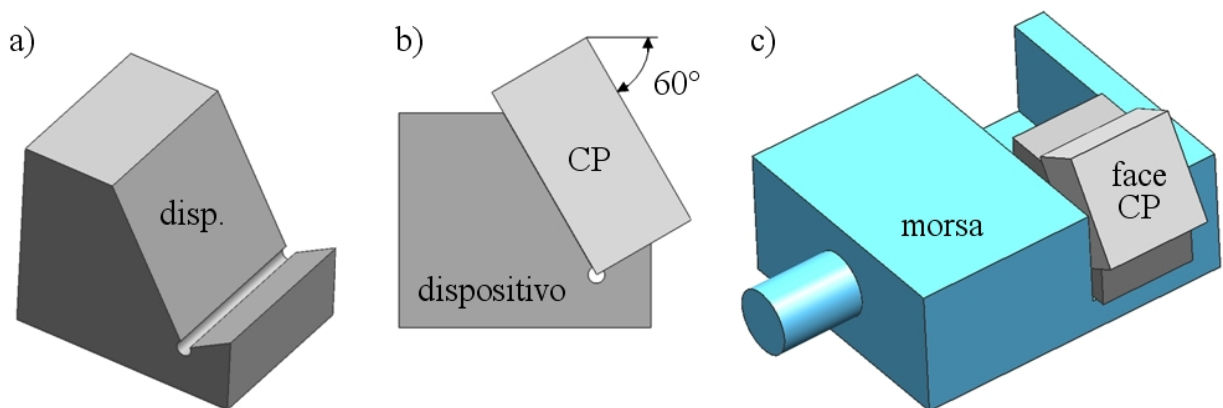


Figura 35- Fixação do corpo-de-prova: a) dispositivo de plano inclinado; b) CP assentado no dispositivo; c) CP fixado na morsa mecânica

3.2.1.3 Ferramenta de corte

A determinação do tipo de fresa e o material da ferramenta, está vinculada ao material a ser usinado e às estratégias de corte empregadas. Nos ensaios buscou-se avaliar estratégias de acabamento, onde o uso de fresas de topo com ponta esférica tem larga aplicação.

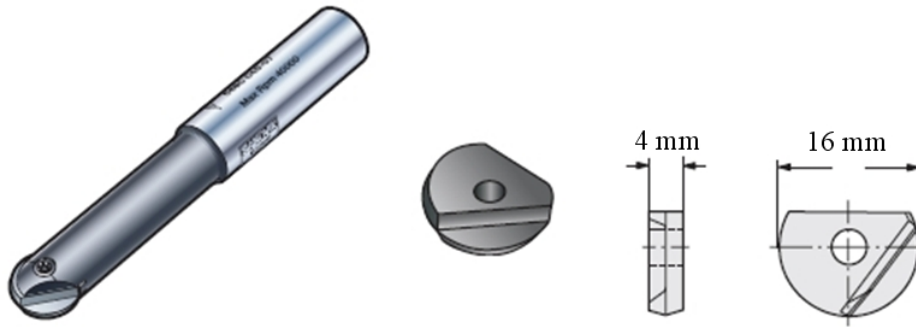
As fresas de ponta esférica são apropriadas para geometrias de forma complexa com grandes e constantes variações de curvatura e inclinações. São geralmente utilizadas nos processos de acabamento pelo fato da geometria das mesmas tornar possível a reprodução de superfícies planas inclinadas e de formas livres (*free-forms*). Para os ensaios foram utilizadas somente ferramentas novas, substituídas a cada ensaio.

Devido ao uso do material aço AISI H13 endurecido, com dureza em torno de 54 HR_C, selecionou-se uma fresa apropriada às condições de material e usinagem mais severas. Tendo como parceiros no trabalho a empresa Sandvik, selecionou-se uma fresa de topo esférico, diâmetro 16 mm, com insertos intercambiáveis, conforme a Tabela 7. A haste é constituída de aço e de forma cilíndrica. Os insertos são constituídos de metal-duro classe ISO H10 com cobertura de TiAlN pelo processo de deposição PVD, indicados para o fresamento leve de aços endurecidos. Os dois gumes do inserto possuem arestas reforçadas e ângulos de saída neutros, submetidos à retífica de precisão.

Tabela 7- Ferramenta de corte utilizada nos ensaios

| | Quantidade | Código do fabricante Sandvik | Classe do inserto |
|---------|------------|------------------------------|-------------------|
| Haste | 1 | CoroMill R216F-16A16S-032 | |
| Inserto | 12 | R216F-1640E-L P10A | P10A (HC) – H10 |

A Figura 36 ilustra a haste da ferramenta e o inserto intercambiável. Os insertos foram identificados e os gumes analisados em microscópio óptico antes da sua utilização. Embora os insertos sejam novos, a verificação se faz necessária para detectar possíveis micro-lascamentos no gume, o que impediria a sua utilização nos ensaios.



A Figura 36– Haste da ferramenta e o inserto intercambiável [SANDVIK, 2005]

A Figura 37 ilustra fotografias do inserto fixado à haste da ferramenta, um detalhe indicando o gume e uma vista de topo do inserto indicando os dois gumes.

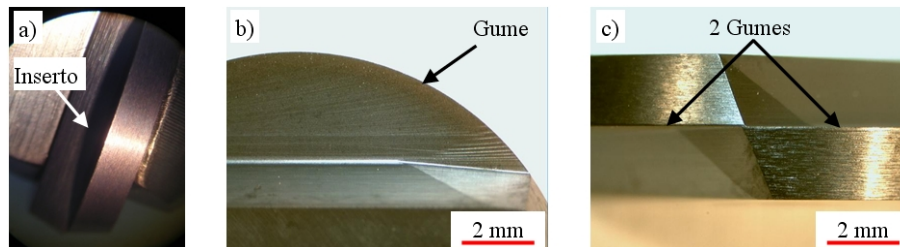


Figura 37- Fotos do inserto: a) junto à haste; b) detalhe do gume; c) topo com os dois gumes

Um parâmetro importante a ser considerado é o balanço da ferramenta, a relação comprimento/diâmetro da ferramenta (l/d), definido pela relação entre comprimento da ferramenta, da ponta até o sistema de fixação pelo diâmetro nominal da ferramenta. Este parâmetro foi controlado e mantido o mesmo para todos os ensaios, pois os efeitos da vibração da ferramenta variam e se agravam com o aumento de l/d . Para os ensaios utilizou-se um l/d constante de 2.5, resultando em um balanço de 40 mm da ferramenta até a fixação através de um cone ISO 40 do tipo *Weldon*, conforme a Figura 38.

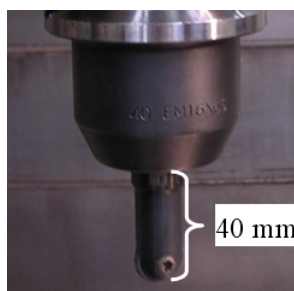


Figura 38- Fotografia da fixação da ferramenta com detalhe para o balanço da ferramenta

3.2.2 Variáveis de saída

A verificação da influência da variável de entrada é realizada através da análise da variável de saída obtida experimentalmente. O critério adotado para a avaliação da variável de saída foi a qualidade superficial, através da análise do material na formação da textura e medição da rugosidade.

A ferramenta e os dados de corte foram definidos e mantidos constantes para todos os ensaios. Outros fatores tais como o desgaste da ferramenta não foram avaliados e considerados neste trabalho já que não são objetivos primordiais deste trabalho.

3.2.2.1 Qualidade superficial

Avaliou-se as texturas obtidas pelas diferentes estratégias de fresamento (*tool path*), quanto as características da formação da superfície, considerando a mecânica de corte, possíveis deformações, e adesões no material.

Realizou-se a medição da rugosidade empregando-se os parâmetros normalizados R_a , R_z e R_y . A literatura aponta para a utilização destes parâmetros de rugosidade, comumente aplicados às operações de usinagem corriqueiras. As medições foram realizadas em uma região central a área usinada, paralelamente e equidistante nas direções de avanço (f_z) e na direção do incremento lateral (a_e), conforme indicado na Figura 39.

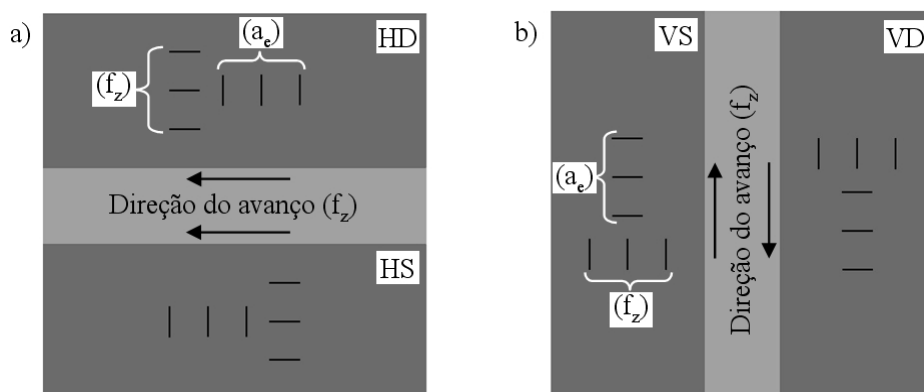


Figura 39- Medição da rugosidade com as posições de apalpamento nas direções do avanço (f_z) e incremento lateral (a_e): a) estratégias horizontais; b) estratégias verticais

Os valores obtidos foram submetidos a um tratamento estatístico de análise de variância ANOVA (*Analisis of Variance*) para um fator e análise de mínima diferença significativa MDS [62].

3.2.3 Máquina ferramenta

Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Tecnologia e Pesquisa da Universidade de Caxias do Sul (UCS), utilizando como máquina-ferramenta o centro de usinagem Dyna DM 4500, com rotação máxima de 6.000 rpm e potência de 7,5 KW, conforme a Figura 40.



Figura 40– Fotografia da máquina-ferramenta Dyna Myte DM4500

3.2.4 Equipamentos para análise qualitativa e quantitativa das texturas

A análise das superfícies dos corpos-de-prova usinados foi realizada, inicialmente, utilizando os recursos disponíveis nos laboratórios da UCS, tais como equipamentos para a verificação da qualidade superficial: rugosímetros portáteis modelo Surtronic 3+, fabricado pela empresa Taylor Hobson e modelo SJ-301, fabricado pela empresa Mitutoyo, ambos com resolução de 0,01 μm e raio da ponta do apalpador de diamante (*stylus*) de 5 μm e conicidade de 90°. O equipamento SJ-301 (Figura 41) possui uma impressora integrada, o que torna possível plotar o perfil real da superfície (P) e os gráficos de rugosidade (R). Para os gráficos

de rugosidade aplicou-se o filtro *gauss*, que atua na remoção da ondulação e o desvio de forma.

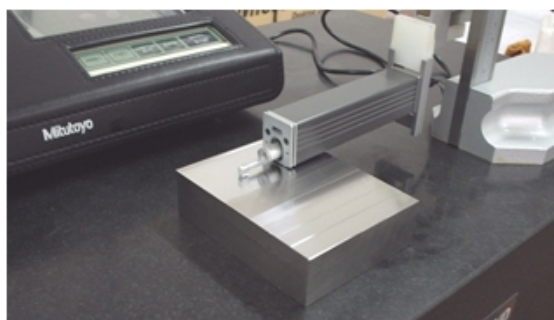


Figura 41- Fotografia do rugosímetro Mitutoyo SJ-301

Para a visualização da textura e obtenção das fotografias, utilizou-se o microscópio metalográfico modelo Epiphot 200 com câmera CCD, fabricado pela empresa Nikon, com uma magnificação de 50 a 1000 vezes (Figura 42).

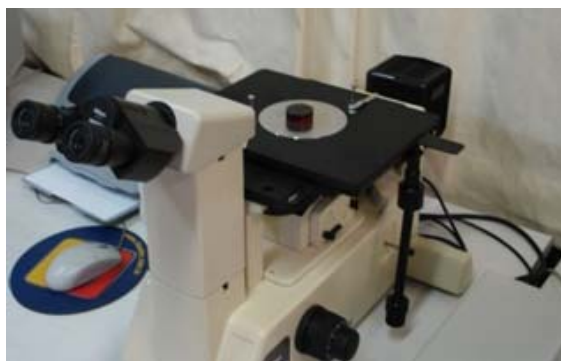


Figura 42- Fotografia do microscópio Nikon Epiphot 200

Paralelamente, realizaram-se análises complementares em laboratórios de pesquisa e institutos utilizando equipamentos tais como o microscópio de força atômica (AFM), microscópio eletrônico de varredura (MEV) e rugosímetro com melhor resolução. Estes equipamentos são capazes de obter imagens de melhor definição e ampliação de detalhes, representando a textura e sua topografia na forma real.

As análises de microscopia de força atômica (AFM) foram realizadas em um equipamento modelo NanoScope IIIA (Figura 43), fabricado pela empresa Digital, pertencente ao Laboratório de Filmes Finos da USP, junto ao Instituto de Física. Este

microscópio é utilizado para medidas de características topográficas de superfície, sendo que a dimensão máxima de varredura é de 160 μm (coordenadas X e Y) e a diferença máxima de altura entre irregularidades na superfície é de 5 μm (coordenada Z). O manuseio do equipamento, bem como a realização das análises e obtenção de imagens da superfície das amostras, deu-se por um técnico qualificado do próprio laboratório.



Figura 43- Fotografia do microscópio de força atômica (LFF-USP)

Análises complementares de medição da rugosidade foram realizadas no Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro), divisão de metrologia de materiais (Dimat). Este laboratório dispõe do equipamento modelo Dektak 6M Stylus Profiler, fabricado pela empresa Veeco, que permite a medição de rugosidade com alta resolução. A resolução máxima do equipamento é de 1 \AA e o raio da ponta do apalpador de diamante (*stylus*) utilizado é de 0,7 μm . O equipamento conta com o software Veeco Dektak 6M, para a aquisição e análise precisa dos dados. O aparelho possui um dispositivo óptico que permite visualizar a região da superfície que está sendo analisada. Este recurso nos permite posicionar a ponta do apalpador dentro do sulco originado pela ferramenta de corte, garantindo um melhor alinhamento em relação às direções de usinagem. A Figura 44 ilustra imagens do equipamento e uma fotografia da tela do computador. A imagem visualizada é obtida através de um microscópio óptico com câmera digital acoplada ao equipamento e

ilustra um exemplo de superfície sendo analisada e o posicionamento do apalpador. O manuseio do equipamento, bem como a realização das medições e obtenção dos resultados de medição das amostras, deu-se por um técnico qualificado do próprio laboratório.

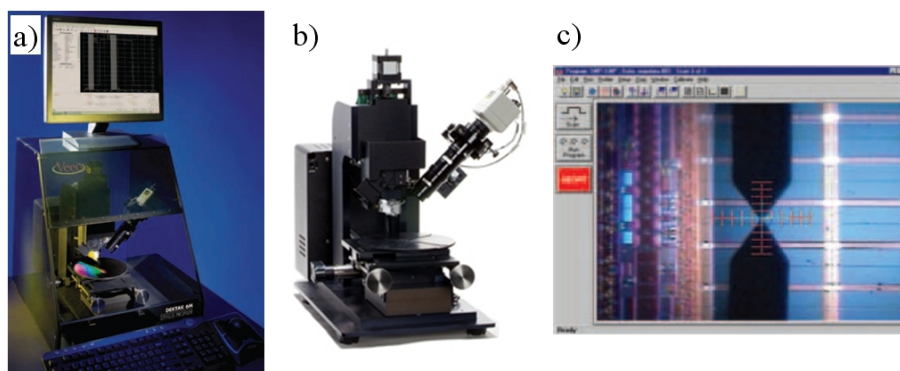


Figura 44- Fotografias dos equipamento: a) Dektak 6M completo; b) mesa do equipamento com o dispositivo óptico e c) tela com posicionamento do apalpador sobre a amostra (Inmetro)

Imagens de elevada resolução foram obtidas utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV). O equipamento utilizado foi um FEI Quanta 200 com estágios de 50x50 mm e quatro eixos monitorados (Figura 45). O controle do MEV é realizado pelo software xT Microscope Control e a aquisição de dados pelo software TSL OIM Data Collection 4.6. O equipamento pertence também ao Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro), divisão de metrologia de materiais (Dimat). O manuseio do equipamento, bem como a realização das análises e obtenção de imagens da superfície das amostras, deu-se por um técnico qualificado do próprio laboratório.



Figura 45- Fotografia microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 200 (Inmetro)

3.3 Ensaios preliminares

O trabalho experimental iniciou com a realização dos testes preliminares, onde foram consideradas duas velocidades de corte (v_c) e dois valores de incremento lateral (a_e), definidas pelas condições A, B, C e D conforme a Tabela 8. Os parâmetros de corte empregados são valores médios recomendados pelo fabricante do inserto utilizado, indicados para a usinagem de aço na faixa de dureza dos corpos-de-prova utilizados.

Tabela 8- Parâmetros de corte empregados nos ensaios preliminares

| Estratégia de Corte | Condição A | | Condição B | | Condição C | | Condição D | |
|--------------------------------------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | HS VS | HD VD | HS VS | HD VD | HS VS | HD VD | HS VS | HD VD |
| Seqüência de execução e região do CP | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| $d_{ef\ médio}$ (mm) | 14,57 | | | | | | | |
| v_c (m/min) | 150 | | | | 180 | | | |
| a_p (mm) | 0,2 | | | | | | | |
| a_e (mm) | 0,2 | | 0,1 | | 0,2 | | 0,1 | |
| f_z (mm) | 0,1 | | | | | | | |
| n (rpm) | 3277 | | | | 3932 | | | |
| F (mm/min) | 655 | | | | 786 | | | |
| Tempo (min.) | 3,00 | | 6,00 | | 2,50 | | 5,00 | |

Utilizou-se para os ensaios preliminares dois insertos, um para as estratégias horizontais, identificado como n°1 e outro para as estratégias verticais, identificado como n°2. Iniciou-se os ensaios com a direção horizontal e trajetória ascendente, prosseguindo com as demais alternadamente, conforme seqüência de execução constante na Tabela 8. A superfície do CP foi dividida em regiões de dimensão 20 x 12.5 mm, conforme ilustrado na Figura 46. Cada região foi usinada utilizando-se uma determinada estratégia e condição de corte, conforme Tabela 8. A área usinada foi dimensionada convenientemente para a realização das análises necessárias, tais como a medição da rugosidade e visualização da textura superficial, parâmetros estes considerados na avaliação e determinação dos dados de corte a serem usados nos ensaios efetivos.

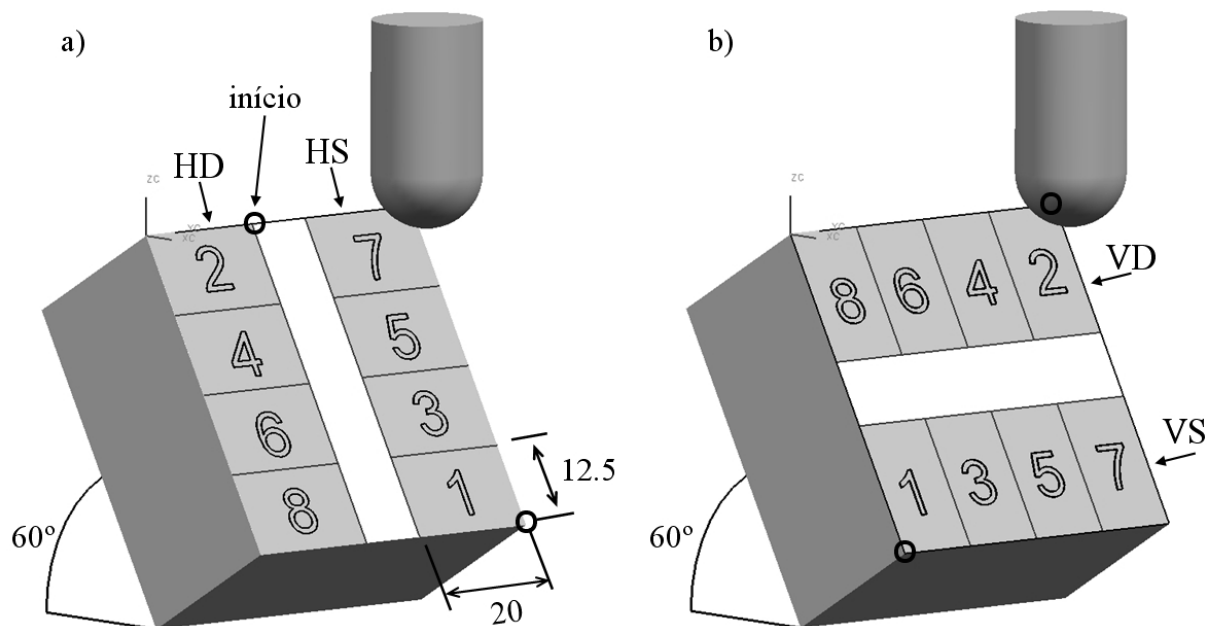


Figura 46- Corpos-de-prova utilizados nos ensaios preliminares e as regiões usinadas em cada condição: a) estratégia horizontal; b) estratégia vertical

3.3.1 Resultados ensaios preliminares

3.3.1.1 Medição de rugosidade

A rugosidade das regiões usinadas foi medida utilizando-se o equipamento Mitutoyo SJ-301. Para cada região usinada, correspondente a uma estratégia e condição de corte, foram realizadas três medições na direção do avanço (f_z) e três medições na direção do incremento lateral (a_e), equidistantes e paralelas. Os parâmetros de rugosidade medidos foram o R_a , R_y e R_z . Calculou-se a média e o desvio padrão dos valores de rugosidade obtidos nos ensaios preliminares, conforme expresso na Tabela 13 em Anexo 1.

Os valores de rugosidade obtidos estão expressos através de gráficos de barras, ilustrados nas Figura 47, Figura 48, Figura 49 e Figura 50. Os gráficos ilustram a média da rugosidade através dos parâmetros R_a , R_y e R_z , para as condições de corte A, B, C e D, avaliadas na direção do avanço (f_z) e na direção do incremento lateral (a_e). Os gráficos apresentam as respectivas barras de incerteza, calculadas a partir do desvio padrão das amostras.

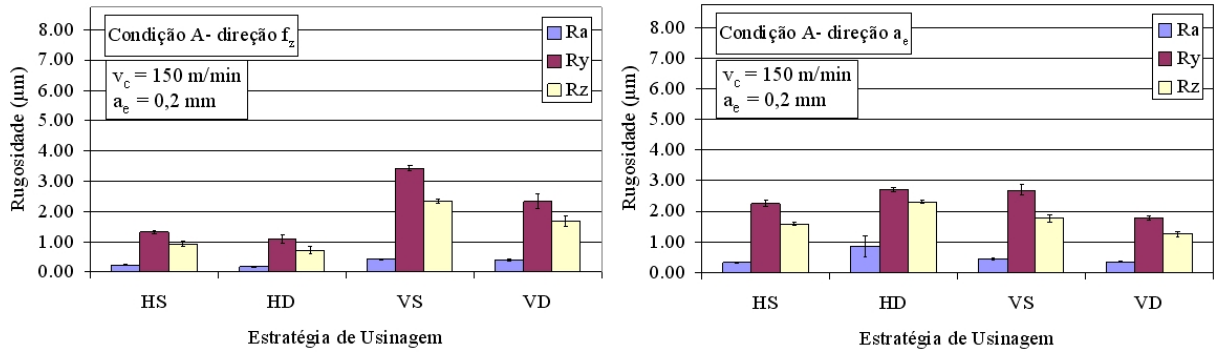


Figura 47- Gráfico com valores de rugosidade obtidos com a Condição A

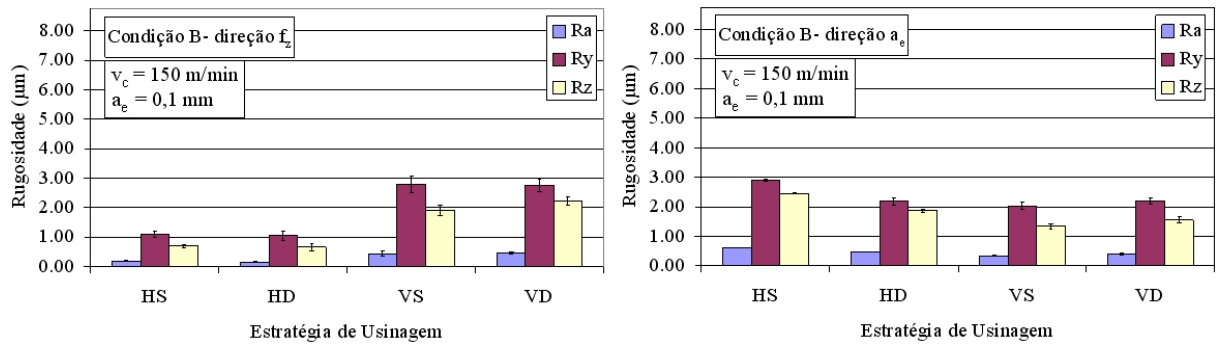


Figura 48- Gráfico com valores de rugosidade obtidos com a Condição B

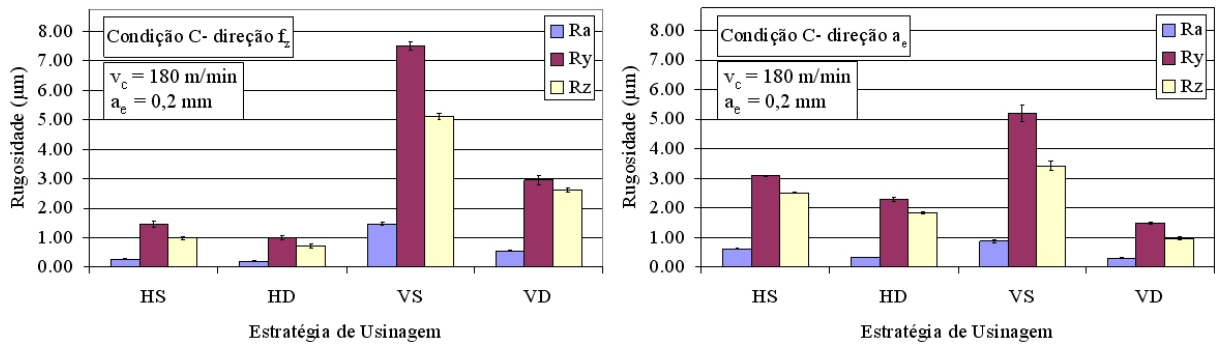


Figura 49- Gráfico com valores de rugosidade obtidos com a Condição C

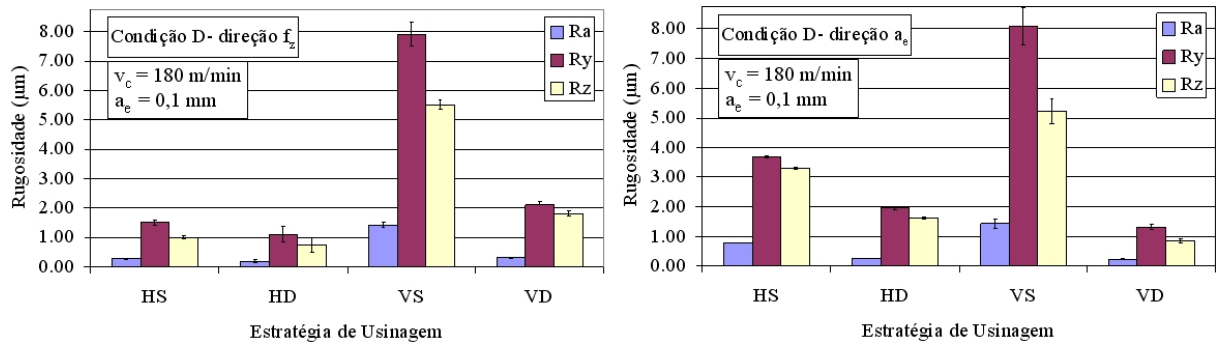


Figura 50- Gráfico com valores de rugosidade obtidos com a Condição D

Analisando-se os valores de rugosidade medidos, observa-se que nas condições C e D, onde empregou-se a velocidade de corte de 180 m/min, houve um aumento significativo da rugosidade para a estratégia vertical subindo VS.

3.3.1.2 Análise de textura

Para a visualização da textura e obtenção das fotografias, utilizou-se o microscópio metalográfico Nikon Epiphot 200. Obteve-se imagens da textura superficial com magnificação de 50, 100, 200 e 500 vezes. Por ser um microscópio metalográfico, destinado a analisar amostras planas, este equipamento apresenta uma reduzida profundidade de foco quando são analisadas amostras com topografia formadas por picos e vales, acarretando em perda de qualidade nas imagens geradas com aumento acima de 200 vezes.

As Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54 ilustram fotos das texturas obtidas através da usinagem com as condições de corte A, B, C e D, respectivamente, todas com uma magnificação de 200 vezes.

Comparando-se visualmente a Figura 51 com a Figura 52 e a Figura 53 com a Figura 54, observa-se que, com a redução do valor de incremento lateral (a_e), de 0,2 mm para 0,1 mm, ocorre uma mudança na formação da textura, sem ocorrer variação significativa da rugosidade medida nesta direção, embora o tempo de usinagem tenha dobrado. Observa-se ainda que utilizando-se o incremento lateral (a_e) igual a 0,2 mm, a textura é formada por marcas de passagem da ferramenta, originadas pelos gumes da mesma, gerando regiões (célula) equidistantes nas direções do avanço (f_z) e do incremento lateral (a_e).

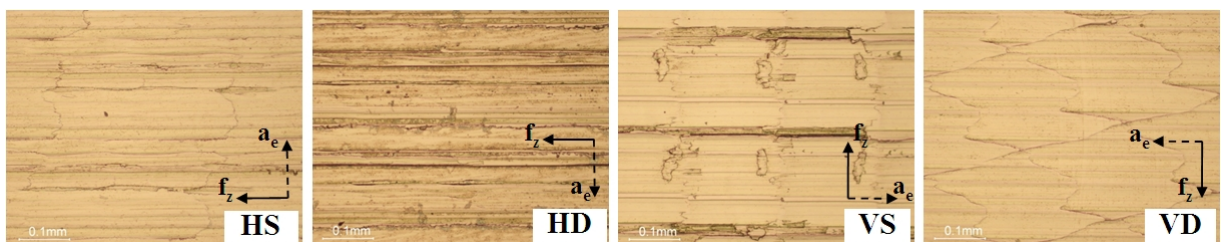


Figura 51- Fotografias da textura das superfícies usinadas na Condição A, magnificação de 200 x

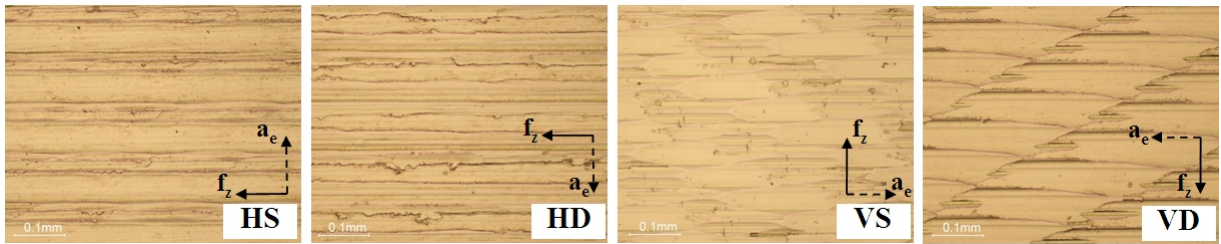


Figura 52- Fotografias da textura das superfícies usinadas na Condição B, magnificação de 200 x

Visualizando-se as Figura 53 e Figura 54, verifica-se que os valores elevados de rugosidade ocorridos nas condições C e D para a estratégia vertical subindo VS, revelam uma textura superficial de pior qualidade, quando comparadas as condições A e B, com rebarbas e ou material aderido sobre a superfície usinada.

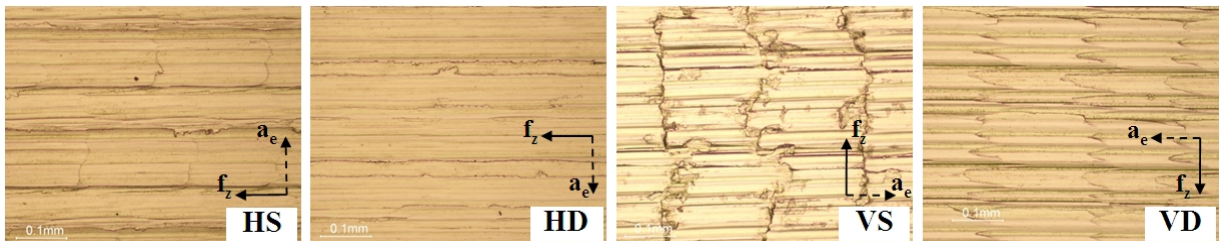


Figura 53- Fotografias da textura das superfícies usinadas na Condição C, magnificação de 200 x

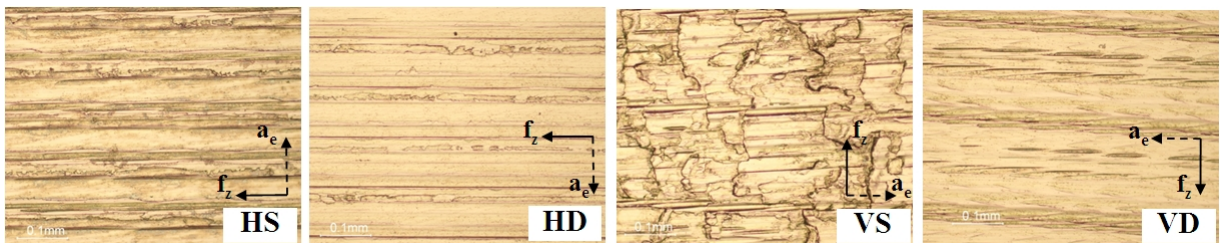


Figura 54- Fotografias da textura das superfícies usinadas na Condição D, magnificação de 200 x

3.3.1.3 Discussão de resultados

A análise e avaliação dos resultados obtidos nos ensaios preliminares foram necessários para a determinação dos parâmetros de corte utilizados nos ensaios efetivos. Foram considerados na avaliação os valores de rugosidade medidos e a qualidade da superfície, através da visualização da textura originada pela usinagem.

Dentre as duas velocidades de corte avaliadas, optou-se pela menor (150 m/min), por apresentar uma textura com menor rugosidade, principalmente na estratégia vertical subindo

(VS). A instabilidade da ferramenta é a causa mais provável para o aumento da rugosidade quando se aumenta a velocidade de corte, devido ao efeito da vibração.

Com relação ao incremento lateral (a_e), para os valores avaliados 0,2 mm e 0,1 mm, não obteve-se variação significativa da rugosidade medida na direção do a_e . Optou-se então pelo valor de 0,2 mm pelo fato da redução do tempo de usinagem e também por reproduzir texturas com marcas de corte regulares, cavidade em forma de célula originada pelo gume da ferramenta, apresentando dimensões semelhantes nas direções do avanço (f_z) e do incremento lateral (a_e).

3.4 Ensaios efetivos

Analisando-se os resultados obtidos nos ensaios preliminares, adotou-se os valores de velocidade de corte (v_c) e incremento lateral (a_e), conforme Tabela 9 e foram mantidos fixos para a realização dos ensaios. Estes dados de corte foram considerados adequados para as condições e limitações do sistema máquina e ferramenta. Foram considerados na avaliação os valores de rugosidade medidos e a qualidade da superfície, através da visualização da textura originada pela usinagem.

Tabela 9- Parâmetros de corte utilizados nos ensaios efetivos

| Estratégia de Corte Região no CP | HS 3 | HD 4 | VD 1 | VS 2 |
|-------------------------------------|--|--|--|---|
| Número do Inserto e seqüência | 3 (1° ensaio) 7 (réplica 1) 11 (réplica 2) | 4 (1° ensaio) 8 (réplica 1) 12 (réplica 2) | 5 (1° ensaio) 9 (réplica 1) 13 (réplica 2) | 6 (1° ensaio) 10 (réplica 1) 14 (réplica 2) |
| Número do CP e seqüência | 2 (1° ensaio) 3 (réplica 1) 4 (réplica 2) | | | |
| $d_{ef\ médio}$ (mm) | 13,51 | | | |
| v_c (m/min) | 150 | | | |
| a_p (mm) | 0,2 | | | |
| a_e (mm) | 0,2 | | | |
| f_z (mm) | 0,1 | | | |
| n (rpm) | 3534 | | | |
| F (mm/min) | 707 | | | |
| Tempo (min) | 11,5 | | | |

Para o cálculo dos dados de corte foi considerado o valor do diâmetro efetivo médio de corte da ferramenta (inserto), obtido a partir do cálculo do ponto de contato da geometria da ferramenta e o plano inclinado do CP, com a profundidade de corte (a_p) determinada de 0,2 mm, nas trajetórias ascendentes e descendentes.

O valor considerado foi a média entre o raio menor de contato na trajetória descendente e o raio maior de contato na trajetória ascendente, conforme a Tabela 10.

Tabela 10- Raios efetivos de contato da ferramenta com o CP

| Trajetoária | Raio médio (mm) | Raio menor (mm) | Raio maior (mm) |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ascendente | 6,755 | 6,928 | 7,644 |
| descendente | | 5,866 | 6,928 |

Para a realização dos ensaios, limitou-se a usinagem a uma área de 20 x 50 mm sobre a face do CP para cada estratégia. As respectivas áreas, o ponto inicial de usinagem de cada estratégia e as orientações para o incremento lateral (a_e) e direção do avanço (f_z) estão ilustrados na Figura 55.

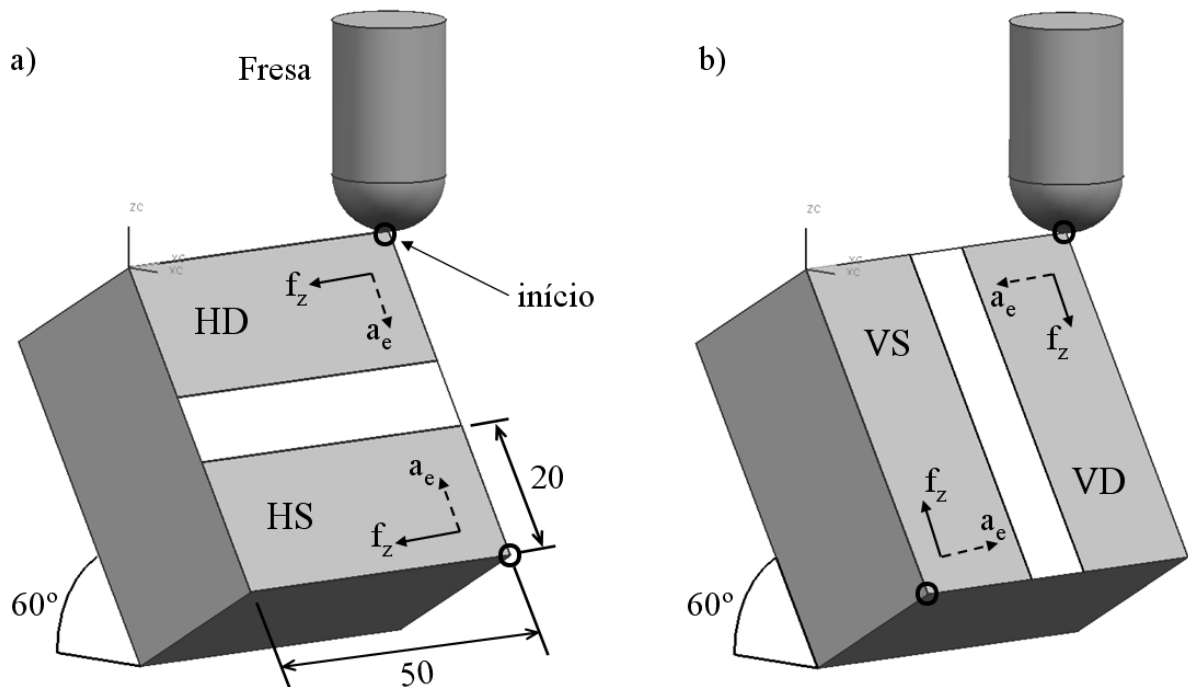


Figura 55- Corpos-de-prova dos ensaios com e as regiões usinadas em cada condição: a) estratégia horizontal; b) estratégia vertical

A seqüência de execução com a identificação do CP e do inserto utilizado nos ensaios estão especificados na Tabela 11.

Tabela 11- Seqüência de execução dos ensaios

| Seqüência Execução | Inserto (número) | CP (número) | Estratégia | Região do CP | Prog. CNC (nome) | Batimento (mm) |
|--------------------|------------------|-------------|------------|--------------|------------------|----------------|
| 1 | 5 | 2 | VD | 1 | VD.ptp | 0,007 |
| 2 | 6 | 2 | VS | 2 | VS.ptp | 0,010 |
| 3 | 3 | 2 | HS | 3 | HS.ptp | 0,005 |
| 4 | 4 | 2 | HD | 4 | HD.ptp | 0,060 |
| 5 | 10 | 3 | VS | 2 | VS.ptp | 0,011 |
| 6 | 9 | 3 | VD | 1 | VD.ptp | 0,006 |
| 7 | 8 | 3 | HD | 4 | HD.ptp | 0,009 |
| 8 | 7 | 3 | HS | 3 | HS.ptp | 0,008 |
| 9 | 13 | 4 | VD | 1 | VD.ptp | 0,010 |
| 10 | 14 | 4 | VS | 2 | VS.ptp | 0,004 |
| 11 | 11 | 4 | HS | 3 | HS.ptp | 0,010 |
| 12 | 12 | 4 | HD | 4 | HD.ptp | 0,002 |

Verificou-se o batimento da ferramenta, a cada novo inserto utilizado, comparando-se os dois gumes. A fixação e posicionamento do inserto no suporte se dá através de um parafuso central, sendo que sua substituição efetuou-se fora da máquina, levando-se o conjunto cone/suporte até uma bancada. Para a medição utilizou-se um relógio comparador com escala centesimal e haste magnética, conforme a Figura 56. Os valores de batimento medidos também estão expressos na Tabela 11.



Figura 56- Fotografia da verificação do batimento da ferramenta

A seqüência de execução 4 apresentou um valor de batimento de 60 μm , considerado elevado para o tipo de fixação da ferramenta e operações de acabamento. Os demais batimentos medidos ficaram dentro de uma faixa de 2 a 11 μm . Valores de batimento elevados podem ocasionar eventuais vibrações que acarretam um corte não-estável. Conforme Ning *et al.* [8], oscilações entre a ferramenta e a peça provocam vibrações auto-excitadas (*chatter*), repercutindo na atuação do gume da ferramenta e conseqüentemente na formação da superfície.

A Figura 57 ilustra uma fotografia da ferramenta e fixação do CP na morsa durante a execução dos ensaios. Na figura visualiza-se o contato de um dos gumes da fresa com a superfície, quando executa o ensaio com a estratégia vertical subindo (VS).



Figura 57- Fotografia da ferramenta e CP durante a execução do ensaio na estratégia vertical ascendente (VS)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Introdução

Neste capítulo, serão relatados os resultados obtidos com a execução dos ensaios efetivos, através das análises realizadas, conforme o planejamento experimental, empregando os métodos para a medição, avaliação e caracterização das texturas.

4.2 Análise de rugosidade

Como primeira análise das superfícies usinadas nos ensaios efetivos, realizou-se a medição da rugosidade utilizando-se o equipamento Mitutoyo SJ-301. Para cada região usinada, correspondentes a uma determinada estratégia, foram realizadas três medições na direção do avanço (f_z) e três medições na direção do incremento lateral (a_e), equidistantes e paralelas. Os parâmetros de rugosidade medidos foram o R_a , R_y e R_z . Calculou-se a média e o desvio padrão dos valores de rugosidade medidos para os três corpos-de-prova, conforme expresso na Tabela 14, em anexo 2. A tabela expressa também o desvio padrão e o valor da incerteza, calculados a partir das três medições realizadas. O valor da incerteza é obtido através da razão do desvio padrão pela raiz quadrada do número de medições. Em anexo 2 estão também os gráficos de rugosidade plotados para as direções de avanço (f_z) e incremento lateral (a_e), em cada estratégia e CP analisado.

Os valores de rugosidade obtidos estão expressos através de gráficos de barras, ilustrados nas Figura 58, Figura 59 e Figura 60. Os gráficos ilustram a rugosidade média medida através dos parâmetros R_a , R_y e R_z , para as superfícies usinadas no primeiro ensaio e as réplicas, nos corpos-de-prova 2, 3 e 4, avaliadas na direção do avanço (f_z) e na direção do incremento lateral (a_e).

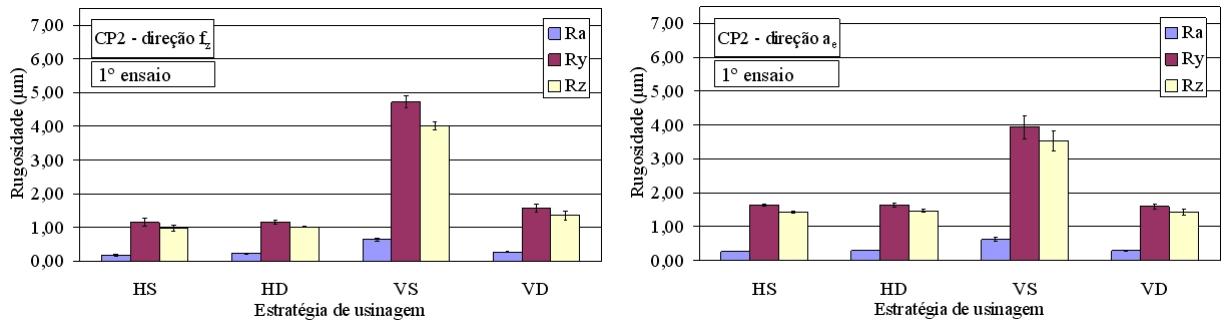


Figura 58- Gráfico com valores de rugosidade medidos no CP 2 (1º ensaio)

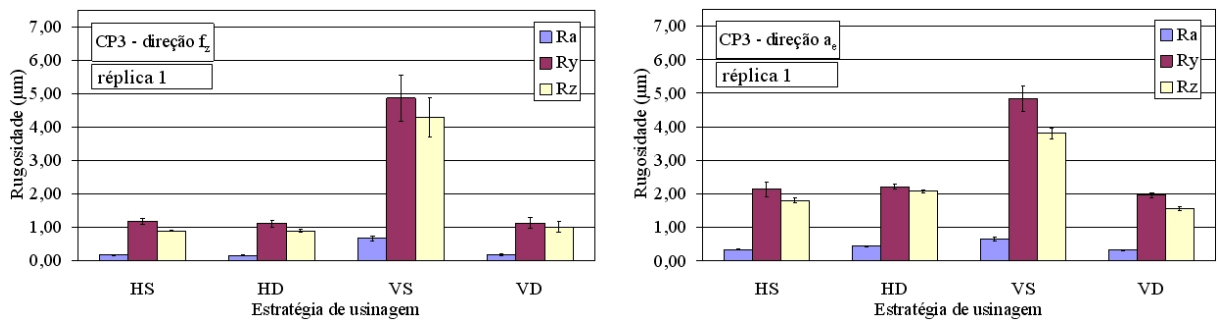


Figura 59- Gráfico com valores de rugosidade medidos no CP 3 (réplica 1)

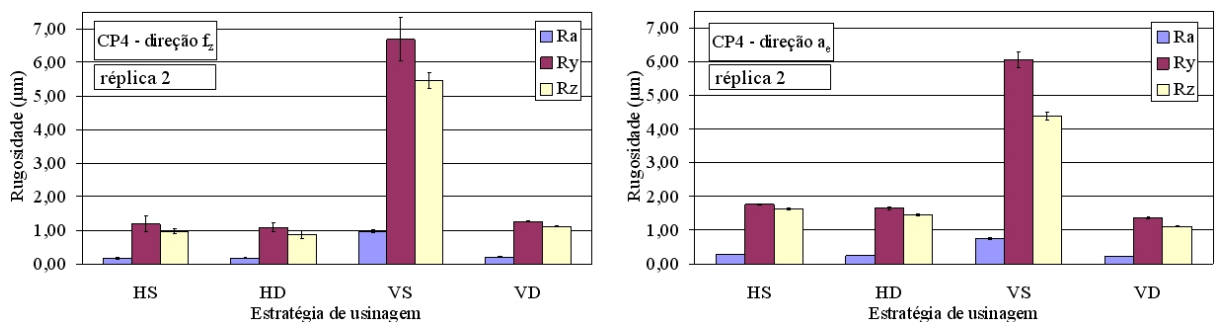


Figura 60- Gráfico com valores de rugosidade medidos no CP 4 (réplica 2)

Os valores de rugosidade medidos e seus respectivos gráficos apresentam um comportamento semelhante para as repetições nos três corpos-de-prova. A estratégia vertical ascendente (VS) é a que apresentou valores mais elevados de rugosidade. Resultado que contraria o obtido por Toh [27] [24], que indica a estratégia vertical ascendente (VS) como a mais estável, originando uma superfície de melhor qualidade. O resultado contrário obtido por Toh, pode ser devido a algumas diferenças nas condições adotadas nos ensaios, principalmente a inclinação do plano a 75° e o tipo da ferramenta, inteiriça e de menor diâmetro. A provável causa para os resultados obtidos na estratégia (VS) é a condição de corte

não-estável, onde vibrações no conjunto máquina/ferramenta acarretam em aumento da rugosidade com um padrão de textura irregular. Além disto, conforme já comprovado pela literatura técnica especializada, a usinagem com fresa de topo esférico possui a característica de que a velocidade de corte é variável ao longo do gume [3] [15]. Dependendo da forma e inclinação da superfície, cada ponto do gume da fresa em contato com a peça está submetido a diferentes condições de corte [32]. Desta forma ocorre uma situação de engajamento do gume na região de contato com a peça, onde o diâmetro efetivo é diferenciado para as estratégias ascendente e descendente (Figura 61). Nas trajetórias ascendentes o diâmetro efetivo de corte é maior, resultando em uma velocidade de corte mais elevada do que nas trajetórias descendentes. Normalmente, os valores de rugosidade decrescem com o aumento da velocidade de corte, mas com uma condição de corte instável, esta situação pode se inverter, resultando na elevação da rugosidade. Este pode ser o motivo da maior rugosidade para a estratégia vertical ascendente (VS), fato este verificado nos ensaios preliminares, onde o aumento da velocidade de corte elevou os valores de rugosidade.

A Figura 61 ilustra, de forma esquemática a situação de contato da ferramenta de ponta esférica com o plano inclinado, salientando no detalhe os pontos de maior e menor velocidade de corte, bem como a espessura do cavaco gerado pelas estratégias ascendente e descendente.

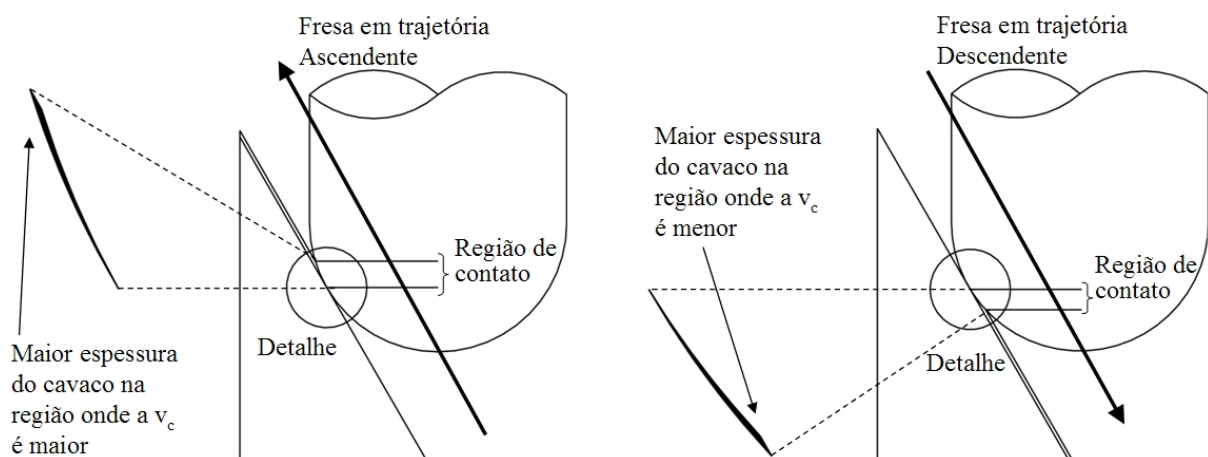


Figura 61- Região de contato da fresa com o plano inclinado

Pode-se observar na Figura 61, em estratégias de corte ascendente, que o cavaco originado tem espessura máxima justamente na região onde ocorre a velocidade de corte maior. Isto pode estar resultando em maiores esforços e conseqüentemente afastando a ferramenta, originando a vibração.

4.3 Análise de rugosidade (Inmetro)

Complementando as análises de rugosidade, realizou-se medições nas amostras utilizando-se o equipamento VEECO Dektak Stylus Profiler. Para cada região usinada, correspondente a uma estratégia, foi efetuada uma medição na direção do avanço (f_z) e uma medição na direção do incremento lateral (a_e), todas com um comprimento de amostragem de 2 mm. Os parâmetros de rugosidade medidos foram o R_a e R_z (DIN). Os valores de rugosidade medidos nos ensaios estão expressos na Tabela 12.

Tabela 12- Valores de rugosidade

| | | Rugosidade (μm) | | | | | | | |
|----|---------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | HS | | HD | | VS | | VD | |
| | | R_a | R_z | R_a | R_z | R_a | R_z | R_a | R_z |
| CP | Direção | | | | | | | | |
| 4 | f_z | 0,227 | 0,934 | 0,193 | 0,584 | 0,500 | 2,823 | 0,244 | 0,911 |
| | a_e | 0,308 | 1,616 | 0,311 | 1,500 | 0,687 | 3,617 | 0,173 | 0,636 |

Observa-se que não houve grande disparidade dos valores médios de rugosidade R_a entre as estratégias, com exceção a estratégia vertical subindo (VS), que apresentou rugosidade maior, mais acentuado para o parâmetro R_z .

Os valores de rugosidade obtidos estão expressos através de gráficos de barras, ilustrados na Figura 62. Os gráficos ilustram a rugosidade medida através dos parâmetros R_a e R_z , para o corpo-de-prova número 4, avaliado na direção do avanço (f_z) e na direção do incremento lateral (a_e).

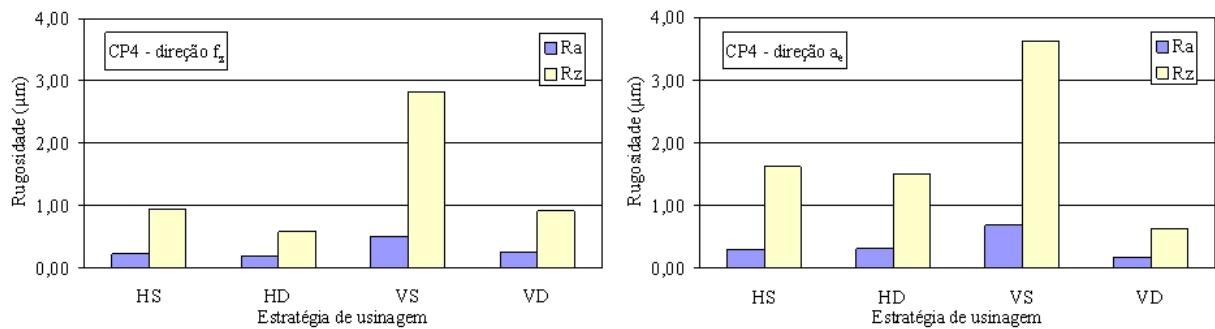


Figura 62- Gráfico com valores de rugosidade (INMETRO)

Os resultados mostram semelhante comportamento em relação aos medidos com o equipamento Mitutoyo SJ-301. A rugosidade R_a obtida através do equipamento VEECO mostra-se similar, já os valores de rugosidade R_z mostram-se menores, isto deve-se ao fato de que a medição é realizada com o CP alinhado e o apalpador posicionado dentro do sulco originado pela ferramenta, com o auxílio de um dispositivo óptico próprio do equipamento.

No procedimento de medição de rugosidade, os pontos correspondentes a varredura são registrados e salvos em arquivo, utilizando-se o software de aquisição de dados próprio do equipamento. Nas análises foram gerados, para cada textura medida, arquivos contendo 12.000 pontos, sendo possível plotar graficamente o perfil de rugosidade da textura, conforme ilustrado nas Figura 63, Figura 64, Figura 65 e Figura 66. As medições foram realizadas no CP 4.

Os gráficos representam o deslocamento longitudinal do apalpador ao longo da superfície e o seu deslocamento vertical, acompanhando a topografia da superfície. Os valores do deslocamento vertical são registrados com relação a uma linha média.

O perfil reforça a pior condição de estratégia, inclusive mostrando uma maior irregularidade na frequência da condição de formação da célula. Como foi possível garantir a passagem dentro do caminho percorrido pela ferramenta, fica evidenciada a irregularidade do corte e contato, causada pela instabilidade e vibração.

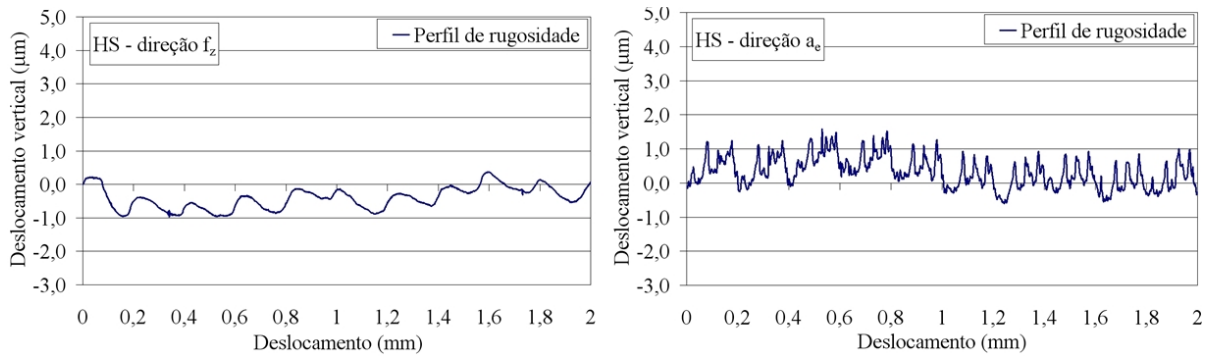


Figura 63- Gráfico do perfil de rugosidade, estratégia HS.

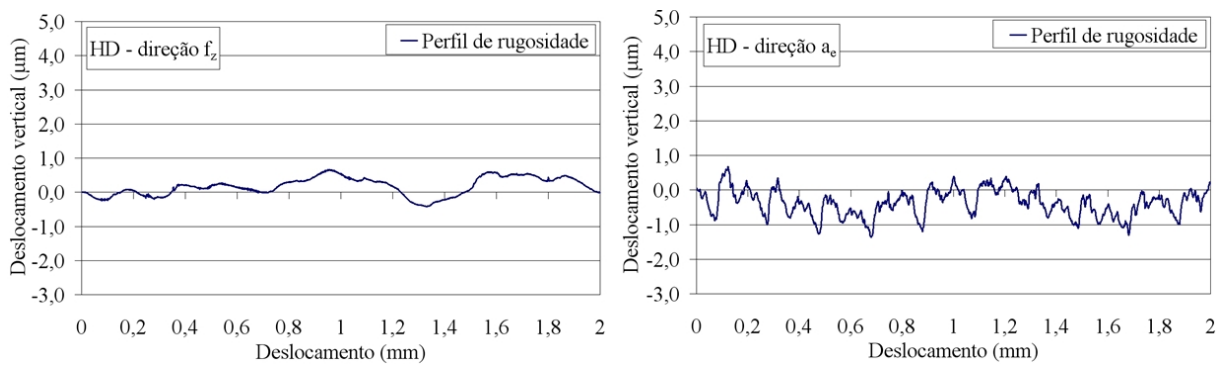


Figura 64- Gráfico do perfil de rugosidade, estratégia HD.

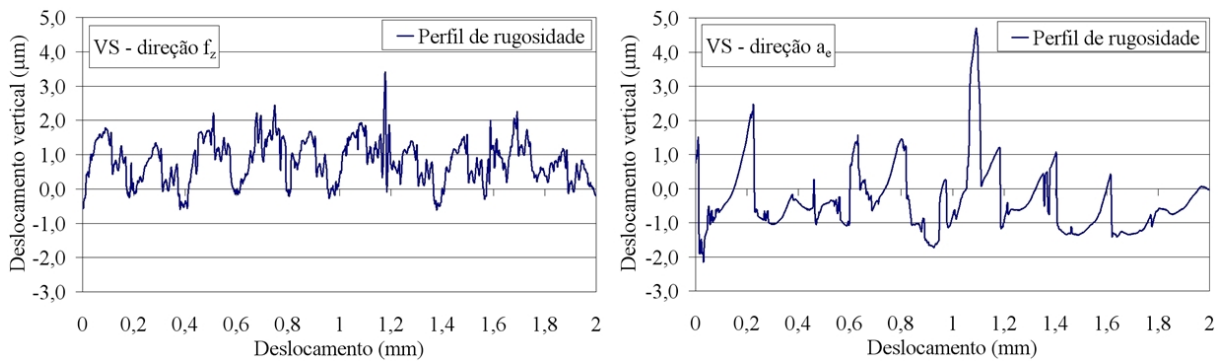


Figura 65- Gráfico do perfil de rugosidade, estratégia VS.

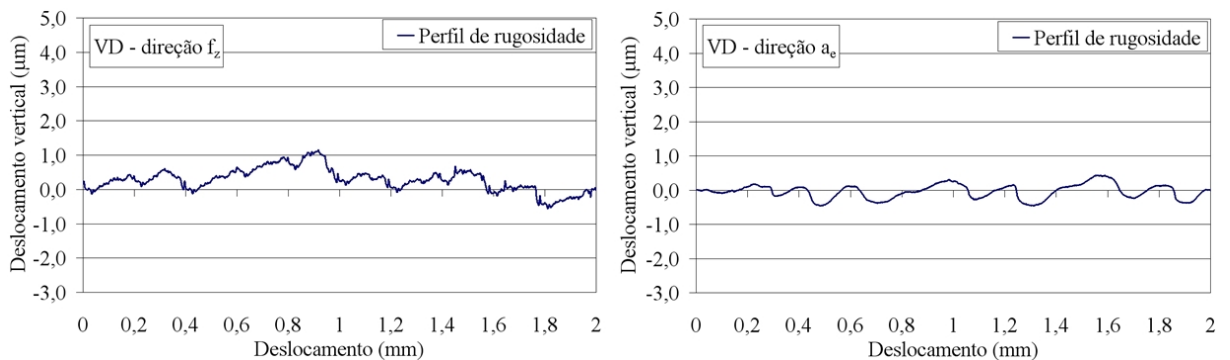


Figura 66- Gráfico do perfil de rugosidade, estratégia VD.

4.4 Análise estatística dos resultados de rugosidade

Para a análise estatística, considerou-se os valores de rugosidade obtidos nas medições efetuadas na superfície usinada em todos os corpos-de-prova ensaiados, conforme Item 4.2. Inicialmente aplicou-se aos dados coletados o método de análise residual, com o intuito de verificar se os dados tem uma distribuição normal de probabilidade, condição necessária para aplicar uma avaliação estatística amparada na teoria utilizada. As tabelas contendo os dados de resíduos e os respectivos gráficos de distribuição normal encontram-se na forma de Anexo 3. Analizando-se os gráficos de resíduos plotados, pode-se admitir que a distribuição dos dados coletados é normal. Sendo assim a avaliação estatística está amparada na teoria.

Para determinar se a estratégia influencia na formação da textura superficial, utilizou-se a análise de variância ANOVA (*Analysis of Variance*) para um fator, aplicada aos valores de rugosidade medidos. Aplicou-se esta análise com o intuito de testar a hipótese de a estratégia de corte influenciar ou não na rugosidade superficial. Na hipótese nula (H_0), os valores médios de rugosidade são iguais entre si, enquanto que na hipótese alternativa (H_1), os valores médios de rugosidade diferem, no mínimo, para uma das estratégias. Utilizou-se, como ferramenta de decisão, a distribuição F com nível de 99% de confiança. Aplicou-se o método, considerando-se como fonte de variação a estratégia de corte empregada nos ensaios, os valores de rugosidade medida nas direções do avanço (f_z) e do incremento lateral (a_e), para os parâmetros R_a , R_y e R_z . Considerou-se para o cálculo da soma quadrática e montagem da tabela resumo da ANOVA, todos os valores de rugosidade coletados em cada estratégia.

A análise de variância ANOVA resultou em rejeição da hipótese nula, indicando que existe diferença na rugosidade superficial entre as estratégias consideradas neste trabalho. Sendo assim, aplicou-se o método da mínima diferença significativa MDS, a fim de testar as várias comparações utilizando os mesmos dados, verificando se há diferença significativa entre elas.

Aplicou-se o método MDS, utilizando-se a estatística t para um nível de confiança de 99%, comparando os valores médios de rugosidade R_a , R_y e R_z , obtidos em cada estratégia. Como resultado, verificou-se que há diferença significativa somente para os comparativos envolvendo a estratégia vertical subindo VS. Assim sendo, pode-se afirmar que a estratégia de corte vertical ascendente VS é a que mais influencia no aumento da rugosidade e as estratégias de corte que menos influenciam são a horizontal ascendente HS e a horizontal descendente HD.

4.5 Análise de textura através de microscopia óptica

A técnica de microscopia óptica para visualização de superfícies é comumente empregada, até por ser uma das mais acessíveis e práticas.

Para a visualização da textura e obtenção das fotografias, utilizou-se o microscópio metalográfico Nikon Epiphot 200. Para a interpretação, foram obtidas imagens da textura superficial com magnificação de 50, 100 e 200 vezes. Por ser um microscópio metalográfico, destinado a analisar amostras planas, este equipamento apresenta uma reduzida profundidade de foco quando são analisadas amostras com topografia formadas por picos e vales, acarretando em perda de qualidade nas imagens geradas com magnificação acima de 200 vezes.

A Figura 67 ilustra fotografias da textura obtidas através da usinagem, empregando-se a estratégia de corte horizontal subindo HS, com magnificação de 50, 100 e 200 vezes.

As imagens mostram que há linhas que identificam a passagem da ferramenta, mas não é possível a identificação plena da forma e das marcas das células resultantes do avanço f_z e incremento lateral a_e . É de se esperar que a textura gerada por uma fresa de ponta esférica em um plano inclinado resulte em uma topografia com marcas formadas simplesmente pela passagem do gume, originadas pelo movimento combinado de translação e rotação da ferramenta em relação à peça. O raio da ferramenta de ponta esférica define a altura e a forma

das cristas originadas na superfície usinada. Uma ferramenta de raio maior, como a utilizada neste trabalho, origina uma textura formada por cavidades menos profundas, sendo assim a marca e as fronteiras que delimitam a passagem do gume são mais difíceis de serem visualizadas e identificadas. Para esta condição é possível identificar pequenas deformações, quando visualizadas com maior magnificação.



Figura 67- Fotografias da textura estratégia HS, com magnificação de 50, 100 e 200 X

A Figura 68 ilustra fotografias da textura obtidas através da usinagem, empregando-se a estratégia de corte horizontal subindo HD, com magnificação de 50, 100 e 200 vezes.

As imagens mostram que há linhas que identificam a passagem da ferramenta, mas não é possível a identificação plena da forma e das marcas das células resultantes do avanço f_z e incremento lateral a_e . Para esta condição também é possível identificar pequenas deformações, quando visualizadas com maior magnificação.



Figura 68- Fotografias da textura estratégia HD, com magnificação de 50, 100 e 200 X

A Figura 69 ilustra fotografias da textura obtidas através da usinagem, empregando-se

a estratégia de corte horizontal subindo VS, com magnificação de 50, 100 e 200 vezes. As figuras mostram uma formação irregular com aspecto de caldeamento e deformações.



Figura 69- Fotografias da textura estratégia VS, com magnificação de 50, 100 e 200 X

A Figura 70 ilustra fotografias da textura obtidas através da usinagem, empregando-se a estratégia de corte horizontal subindo VD, com magnificação de 50, 100 e 200 vezes.

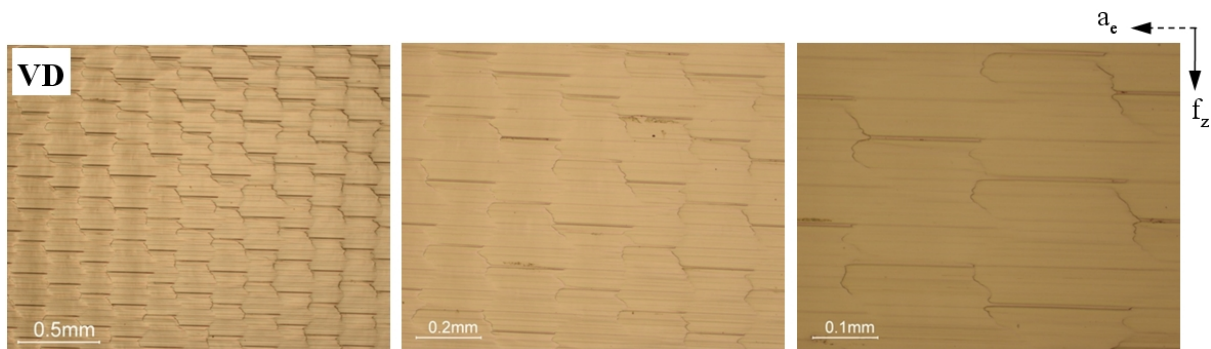


Figura 70- Fotografias da textura estratégia VD, com magnificação de 50, 100 e 200 X

As imagens da microscopia óptica mostram com maior clareza as regiões macro, por exemplo, o contorno das células (demarcações das ondulações), e assim apóiam a interpretação de regularidade ou irregularidade. No entanto, com esta técnica não ficam evidenciadas as condições em que o material se encontra, por exemplo, deformações e alterações em profundidade. Desta forma, esta técnica pode ser uma primeira análise a ser utilizada, com o intuito de identificação e caracterização macro, que juntamente com os valores de rugosidade pode apresentar subsídios de como estaria a condição da superfície gerada por certa condição de usinagem.

4.6 Análise da textura através de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para uma análise mais avançada que a microscopia óptica é utilizada a técnica de geração de imagens de elevada resolução através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). O equipamento utiliza um padrão de difração de elétrons secundários, visando a obtenção da topografia das texturas, com uma maior profundidade de foco, o que facilita a interpretação micro da condição do material.

Nas imagens obtidas pelo MEV utilizou-se como critério de análise a visualização das irregularidades na superfície, sendo possível verificar com maior clareza a influência da estratégia de corte empregada sobre a textura resultante. Analisou-se a formação da textura, através das marcas originadas pela passagem da ferramenta e ação do gume.

A Figura 71 ilustra imagens da textura da superfície obtidas através da usinagem, empregando-se a estratégia de corte horizontal subindo HS com magnificação de 50, 100, 200 e 500 vezes. Para esta condição verifica-se uma textura regular, visualizando-se as marcas geradas pela ferramenta nas direções do avanço (f_z) e de forma não tão nítida o incremento lateral (a_e). As marcas e ondulações mostram-se de forma repetitiva, podendo ser observadas e quantificadas através do gráfico de rugosidade. Na figura com a maior magnificação (500 X), observa-se a formação de micro-rebarba. Este material pode ser resultante da condição em que o gume se encontrava, um pequeno desgaste, que em alta pressão contra a superfície da peça, possibilitou deformações plásticas do material.

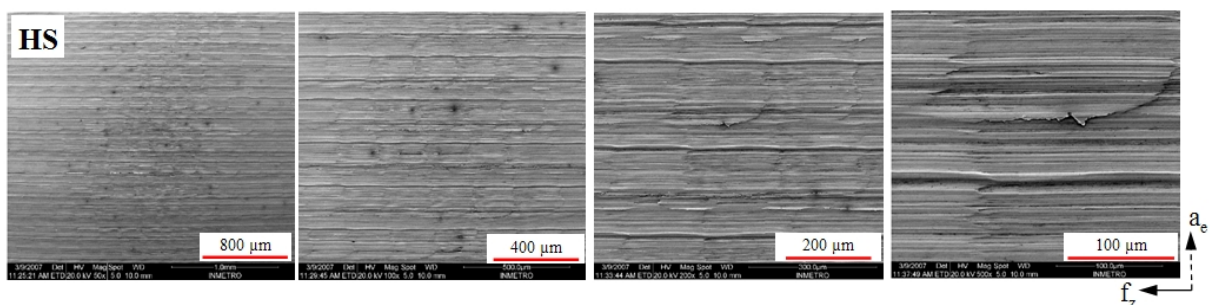


Figura 71- Imagens obtidas de MEV, estratégia HS com magnificação de 50, 100, 200 e 500 X

Mesmo que as imagens realizadas nas superfícies usinadas pela estratégia HS definam a regularidade da passagem do gume sobre a superfície, é possível observar que esta regularidade não se dá de forma idêntica ao longo da passagem. É possível perceber que existe uma intensidade diferenciada da marca e que a célula não encontra-se totalmente clara, o que pode representar uma certa instabilidade no contato entre a ferramenta e a superfície gerada, e/ou isto pode ser decorrente da própria heterogeneidade da estrutura do material.

A Figura 72 ilustra imagens da textura da superfície obtidas através da usinagem, empregando-se a estratégia de corte horizontal descendo HD com magnificação de 50, 100, 200 e 500 vezes. Na textura resultante desta estratégia de corte pode-se visualizar marcas de usinagem bem definidas na direção do avanço (f_z). Para esta condição não foram observadas micro-rebarbas ou material aderido.

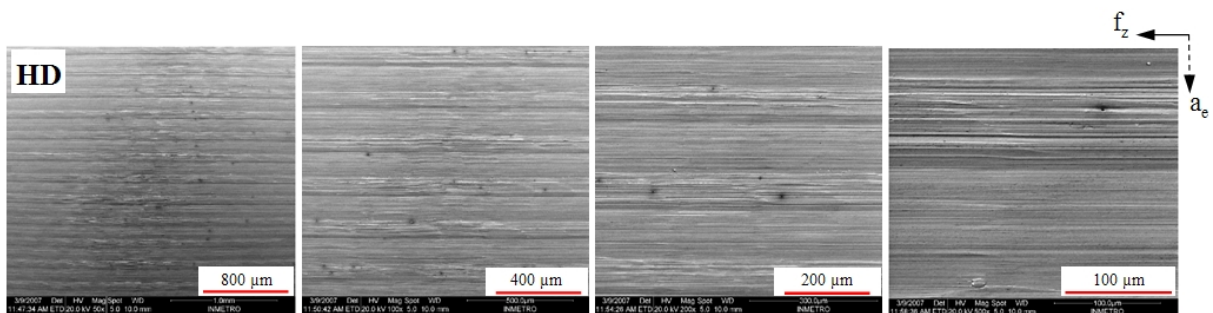


Figura 72- Imagens obtidas de MEV, estratégia HD com magnificação de 50, 100, 200 e 500 X

A Figura 73 ilustra imagens da textura da superfície obtidas através da usinagem, empregando-se a estratégia de corte vertical subindo VS, com magnificação de 50, 100 e 500 vezes.

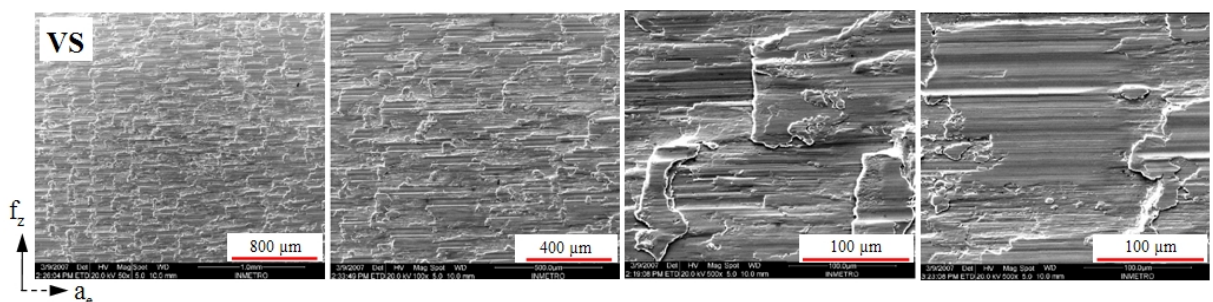


Figura 73- Imagens obtidas de MEV, estratégia VS com magnificação de 50, 100 e 500 X

Para esta condição verificou-se uma textura totalmente irregular, onde as marcas geradas pela ferramenta e as células demarcadas pelas ondulações (*scallops*) não são reveladas. Pode observar-se uma textura ruim, especialmente na maior magnificação (500 X), com a presença clara de material deformado e caldeado sobre a superfície usinada. Esta condição de material caldeado foi a principal contribuição para o aumento expressivo dos valores de rugosidade.

Toh [27], em seu trabalho experimental, obteve um resultado oposto, obtendo a melhor textura superficial com a estratégia vertical subindo VS. No entanto, a pesquisa realizada por Toh utilizou uma ferramenta de corte inteiriça de metal-duro, com diâmetro de 10 mm e 6 gumes de corte, fabricada especialmente para este experimento. Com estas condições específicas, o corte pode ter apresentado um comportamento mais estável, fundamentado pela maior rigidez da ferramenta, e também pela inclinação diferenciada, que foi de 75°.

A Figura 74 ilustra imagens da textura da superfície obtidas através da usinagem, empregando-se a estratégia de corte vertical descendo VD, com magnificação de 50, 100, 200 e 500 vezes. Para esta condição verifica-se uma textura regular, revelando de forma clara as marcas geradas pela ferramenta, originando regiões bem delimitadas, nas direções do avanço (f_z) e incremento lateral (a_e). As marcas de ondulações (células) são repetitivas, podendo ser observadas e expressas quantitativamente através do gráfico de rugosidade.

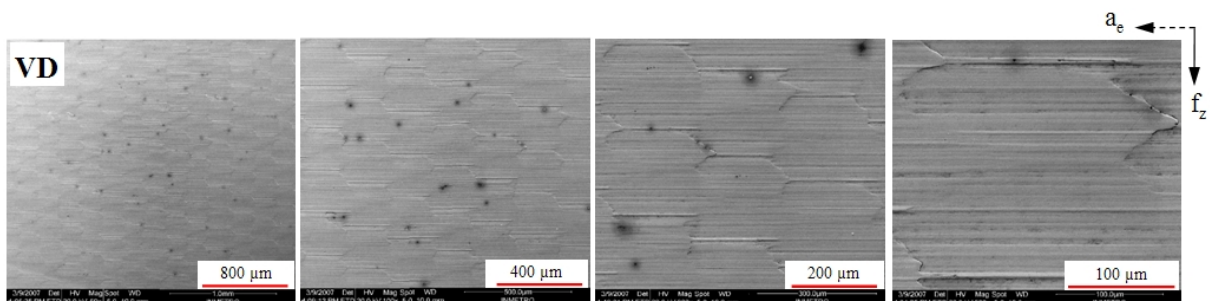


Figura 74- Imagens obtidas de MEV, estratégia VD com magnificação de 50, 100, 200 e 500 X

Através da utilização de imagens obtidas pela técnica da MEV foi possível a identificação clara das regiões onde estão as células (secção f_z x a_e), regiões de formação

ondulada como apresentadas pela literatura [14] [15] [16] [17], o que não é facilmente identificado através da técnica de microscopia óptica, devido às limitações de foco e resolução de profundidade. A MEV facilita a interpretação de alterações e irregularidades oriundas do processo e ou do material. Numa análise da textura pode-se constatar as imperfeições do corte de material e das deformações plásticas que são geradas durante o contato da ferramenta e a superfície usinada.

4.7 Análise de textura através de microscopia de força atômica (AFM)

Em busca de um método alternativo para uma caracterização tridimensional da superfície usinada, chegou-se a técnica de Microscopia de Força Atômica (AFM). Embora seja pouco utilizada na análise de superfícies usinadas, a intenção é também conhecer melhor esta técnica e avaliar a sua empregabilidade para avaliação de topografias de peças usinadas. As análises foram realizadas em um equipamento modelo Nanoscope IIIA. Este equipamento permite que sejam feitas medições em escala atômica. As medições realizadas em nossas amostras, em função dos valores de rugosidade encontrados nas superfícies, ficaram próximas da faixa limite de deslocamento vertical (*range*) do equipamento no eixo Z, limitado a 5 μm . A janela de varredura (*scan size*) foi ajustada para uma área de 160 μm x 160 μm nos eixos X e Y, valor máximo para este equipamento. A varredura é realizada em trajetória linear, sendo que para nossas medições utilizou-se o valor de 512 vezes, como o número de passadas do estilete (*number of samples*) sobre a área considerada. Obtiveram-se imagens 2D e 3D, através de software específico do equipamento, a partir dos dados processados. Nos gráficos 2D, visualiza-se, através de um gradiente de cores, as regiões altas e baixas na topografia da região analisada, quantificada conforme escala em μm . Os gráficos 3D, ilustram a topografia em escala ampliada em relação à real, sendo esta escala ajustada automaticamente pelo software em função das variação máxima de medição de pico a vale (*range*). Desta forma,

para todas as amostras avaliadas, os gráficos apresentaram escala diferenciada em razão da rugosidade e da região da textura que foi analisada.

A Figura 75 ilustra imagens de duas regiões analisadas para a estratégia HS, onde os gráficos foram plotados com uma escala de 2,5 μm por divisão no eixo Z.

Observando a figura inferior do lado esquerdo, percebe-se na imagem tridimensional da superfície, uma topografia que apresenta uma elevação, que certamente deve estar associada à fronteira que delimita uma célula. No entanto, a interpretação fica limitada à região de ondulação, sendo difícil a identificação macro da célula inteira, que é a superfície individual limitada pelas cristas geradas pela passagem do gume [14] [15]. Assim, a interpretação da região a nível de entrada ou saída da ferramenta é dificultada e limita a compreensão da formação da superfície. No entanto, com esta topografia, também não se percebe irregularidades em relação a passagem da ferramenta.

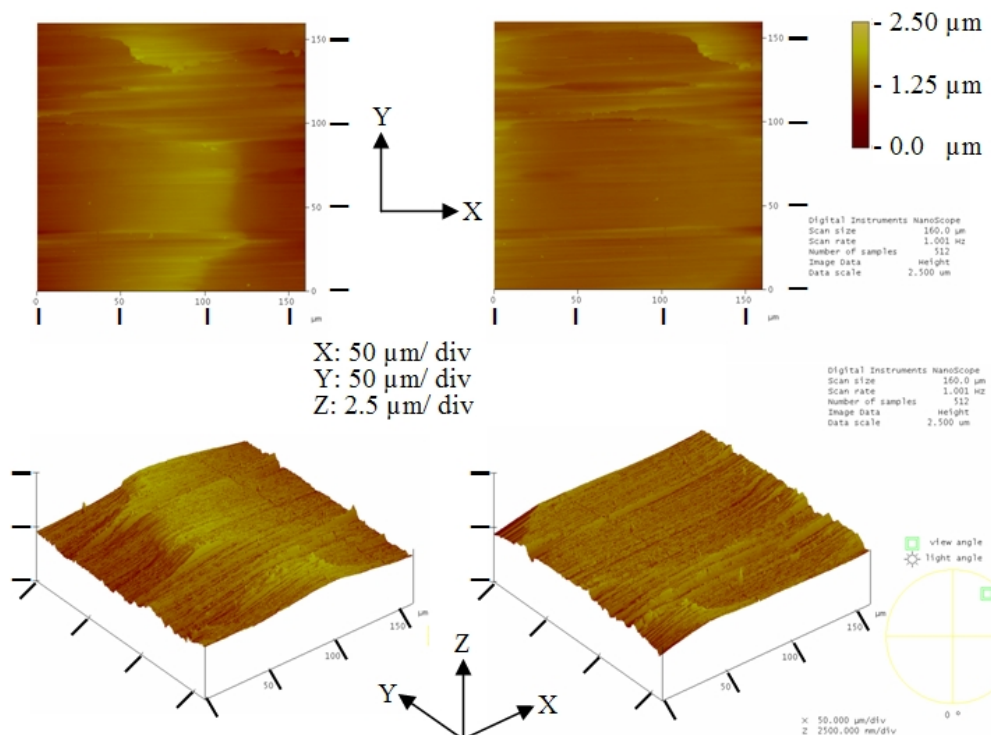


Figura 75- Imagens AFM com topografia 2D e 3D, na estratégia HS

A Figura 76 ilustra imagens de duas regiões analisadas para a estratégia HD, onde os gráficos foram plotados com uma escala de 1,0 μm por divisão no eixo Z.

Com as topografias tridimensionais também fica evidenciado que não existem irregularidades na passagem do gume. Mas, como anteriormente visto, devido a grande ampliação, também fica difícil definir em que região da célula a imagem foi realizada. Pela menor escala no eixo Z, também pode-se interpretar a menor variação da rugosidade e ondulações oriundas de deformações.

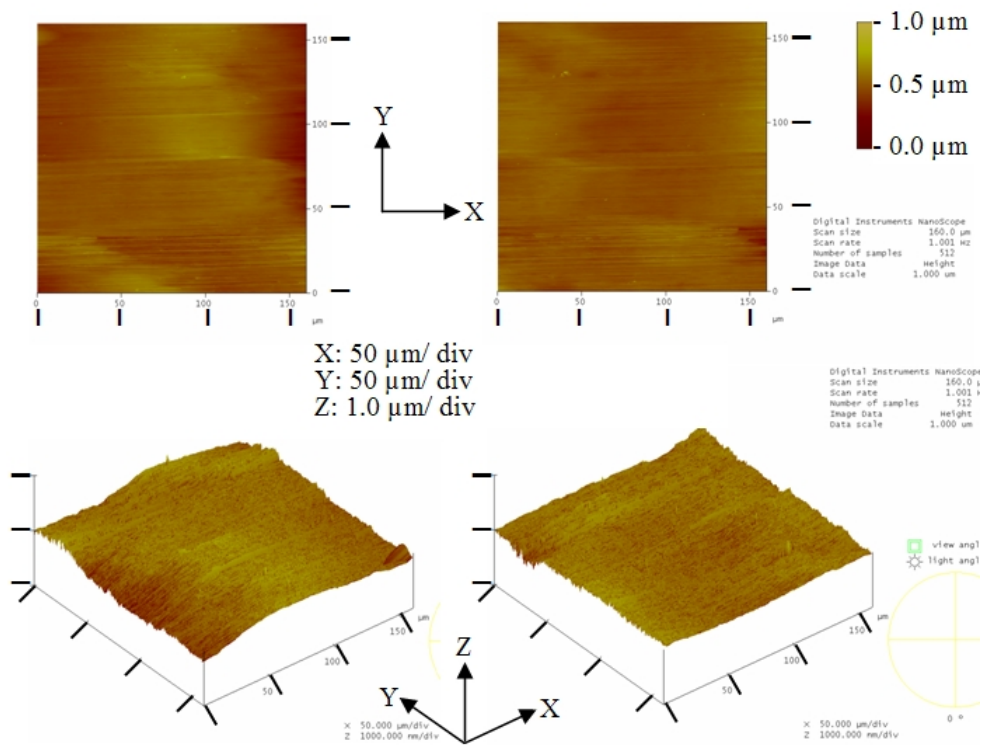


Figura 76- Imagens AFM com topografia 2D e 3D, na estratégia HD

A Figura 77 ilustra imagens de duas regiões analisadas para a estratégia VS, onde os gráficos foram plotados com uma escala de 3,0 micrometers por divisão no eixo Z.

Observando a figura, percebe-se nas imagens tridimensionais da superfície, ao contrário de até então, uma textura totalmente irregular, que não poderia ser formada simplesmente pela passagem da ferramenta. Isto significa que houve uma alteração da região de contato entre o gume e a superfície, com formação de material aderido e ou caldeado sobre a superfície usinada.

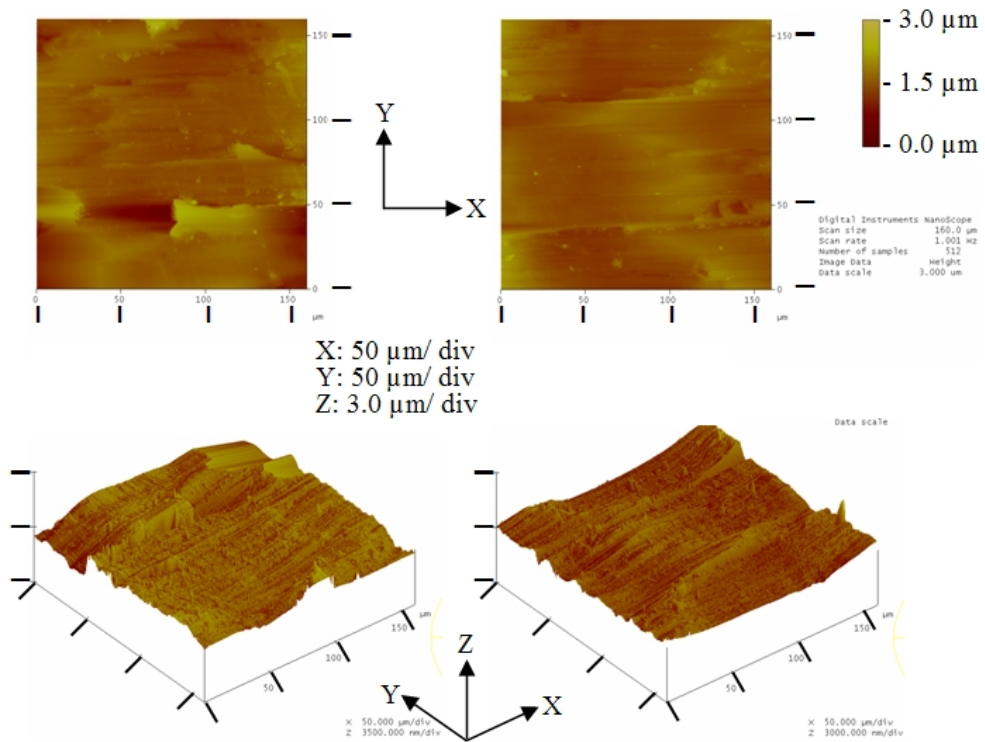


Figura 77- Imagens AFM com topografia 2D e 3D, na estratégia VS

A Figura 78 ilustra imagens de duas regiões analisadas para a estratégia VD, onde os gráficos foram plotados com uma escala de 1,5 micrometers por divisão no eixo Z.

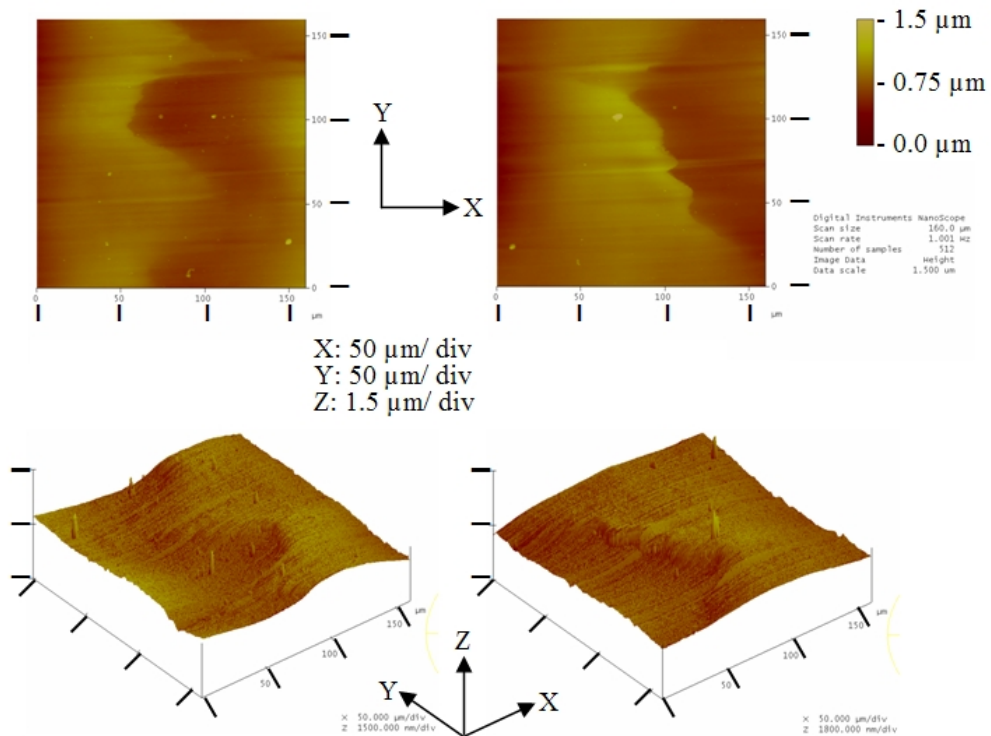


Figura 78- Imagens AFM com topografia 2D e 3D, na estratégia VD

Nas amostras analisadas a área de uma célula que compõe a textura é maior do que a abrangência máxima de varredura do equipamento utilizado, reproduzindo apenas a topografia parcial da mesma. Esta técnica poderia apresentar melhor resultado quando na análise de regiões com dimensões inferiores aos limites do campo de varredura do equipamento. Deste modo para as superfícies geradas nesse trabalho os resultados obtidos expressam uma parte da região de principal interesse de análise, a célula formada pela passagem do gume da ferramenta. Assim como as condições de corte foram pré-definidas no planejamento dos experimentos, não se pode estabelecer uma textura tridimensional que caracterize a formação da superfície usinada. Este método é útil na obtenção da topografia da superfície e medição de sulcos e pequenas regiões onde se deseja analisar as deformações ocorridas no material.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 Conclusões Gerais

O tratamento dos dados e a análise dos resultados obtidos neste trabalho experimental permitem afirmar que as texturas resultantes do processo de usinagem mostram nitidamente a influência da estratégia de corte empregada, caracterizando-se distintamente.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrou-se como um importante e versátil método para a visualização e análise de texturas de superfícies, complementando as medições de rugosidade. A análise da rugosidade, isoladamente, não é suficiente para uma correta análise e caracterização da superfície usinada.

De uma forma geral, das estratégias de corte consideradas neste trabalho, as que apresentaram texturas de melhor qualidade foram aquelas que exercem sentido de corte descendente: vertical descendente (VD) e horizontal descendente (HD).

5.1.1 Conclusões relativas a influência da estratégia de corte na formação da textura

É possível constatar através das imagens topográficas das superfícies usinadas que as texturas resultantes mostram nitidamente a influência da estratégia de corte empregada, caracterizando-se distintamente. Observa-se que a textura é composta por células onduladas, delimitadas pelas cristas formadas pela ação do gume da ferramenta e pelas raias originadas na direção do avanço (f_z). As cristas que delimitam as raias na direção do incremento lateral (a_e), apresentam-se de forma periódica e definida.

As texturas analisadas revelam um padrão uniforme e repetitivo, com exceção à estratégia vertical ascendente (VS), que originou uma textura irregular, onde as marcas de passagem da ferramenta não são facilmente identificadas. Para esta condição observou-se na

superfície usinada a forte presença de material deformado e aderido, resultante de um corte deficiente.

A textura originada pela estratégia vertical descendente (VD) é caracterizada por marcas de corte regulares, relativamente isotrópica.

A condição horizontal descendente (HD) é a que menos apresentou a formação de micro-rebarbas ou material aderido.

5.1.2 Conclusões relativas a medição de rugosidade

As texturas foram quantificadas por intermédio de alguns parâmetros de rugosidade, representativos em relação a microgeometria e os resultados obtidos expressam claramente que a estratégia vertical ascendente (VS) apresentou os mais elevados valores de rugosidade, sendo que os mais baixos valores de rugosidade foram medidos para as estratégias vertical descendente (VD) e horizontal descendente (HD).

Este resultado foi comprovado estatisticamente, onde os resultados demonstraram que há diferença significativa somente para os comparativos envolvendo a estratégia vertical subindo VS. Assim sendo, conclui-se que a estratégia de corte vertical ascendente (VS) é a que mais influencia no aumento da rugosidade.

5.1.3 Conclusões relativas aos métodos utilizados na análise da textura

Neste trabalho aplicaram-se três métodos distintos para a visualização e obtenção das imagens das texturas, sendo eles a microscopia óptica, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia de força atômica (AFM).

A microscopia óptica para visualização de superfícies é um método comumente empregado por ser acessível e prático. No entanto, com esta técnica não ficam evidenciadas as condições em que o material se encontra, por exemplo, deformações e alterações de

escoamento. Desta forma, esta técnica pode ser uma primeira análise a ser utilizada, com o intuito de identificação e caracterização macro.

Dentre os métodos utilizados, o MEV é o que proporcionou imagens de melhor definição e qualidade para avaliar as características da formação da superfície. Detalhes da textura, tais como as cristas, deformações e adesões do material provenientes da mecânica de corte, podem ser nitidamente observadas e analisadas.

Com o método AFM é possível reproduzir a topografia da superfície com imagens tridimensionais da textura, porém a principal limitação deste equipamento é o campo de varredura, tanto vertical quanto horizontalmente. Nas amostras analisadas a área de uma célula que compõe a textura é maior do que a abrangência máxima de varredura do equipamento utilizado, reproduzindo apenas a topografia parcial da mesma, não sendo possível a visualização total de uma célula ondulada. Este método é útil na obtenção da topografia da superfície e medição de sulcos e pequenas regiões onde se deseja analisar as deformações ocorridas no material.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

Baseando-se nas conclusões apresentadas e para a continuidade e desenvolvimento desta linha de pesquisa, alguns trabalhos são sugeridos à seguir:

- Realização de ensaios utilizando uma ferramenta de corpo mais rígido, por exemplo, substituir a haste constituída de aço por uma de metal-duro, estabelecendo-se as mesmas condições testadas neste trabalho.
- Empregar técnicas que permitam representar as superfícies e sua topografia em 3D, através de equipamentos de apalpamento e varredura óptica, que utilizam um feixe de luz.
- A fim de caracterizar melhor a integridade das superfícies usinadas, avaliar as tensões residuais na sub-superfície após o processo de usinagem.

- Repetir os ensaios mais significativos deste trabalho para outros ângulos de inclinação da superfície: 45 e 75 graus.
- Planejar experimentos com variação de velocidade de corte e avanço, empregando a técnica (2^k).
- Averiguar o efeito das vibrações sobre a rugosidade obtida nas diferentes estratégias de corte.
- Correlacionar o batimento da ferramenta com os resultados de rugosidade.
- Aplicar a técnica da blocagem no planejamento estatístico, a fim de eliminar os erros não controláveis do processo, tais como a fixação ferramenta/ cone/ máquina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARNZT, K., "O fresamento de materiais endurecidos é a solução dos problemas?," *Máquinas e Metais*, vol. Janeiro, pp. 32-37, 2007.
- [2] FALLBOMER, P. e RODRIGUES, C. A., "High speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 104-115, 2000.
- [3] KÖNIG, W. e KLOCKE, F., *Fertigungsverfahren - Drehen, Fräsen, Bohren*, 7º ed. Berlin: Springer- Verlag,2002.
- [4] FERRARESI, D., *Tecnologia da usinagem dos metais*, 9 ed. São Paulo: Edgar Blucher,2003.
- [5] DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., e COPPINI, N. L., *Tecnologia da usinagem dos materiais*, 3 ed. São Paulo: Artliber Editora,2001.
- [6] STEMMER, C. E., *Ferramentas de corte II*, 2º ed. Florianópolis: Editora da UFSC,1995.
- [7] WECK, M., *Handbook of Machine Tools - Metrological Analysis and Performance Tests* vol. 4. Aachen,1984.
- [8] NING, Y., RAHMAN, M., e WONG, Y. S., "Investigation of chip formation in high speed end milling," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 113, pp. 360-367, 2001.
- [9] CAVALER, L. C. D. C., "*Fresamento periférico do aço AISI-SAE D6 temperado e revenido utilizando fresas de metal-duro*," 2003, 95 p, (Dissertação de mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [10] NEVES, D., "*Uma contribuição ao fresamento de matrizes com fresa de topo esférico*," 2002, 142 p, (Dissertação de Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- [11] SANDVIK, *Manual Técnico de Usinagem*. Suécia,2005.
- [12] GOMES, J. D. O., "*Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de alumínio AMP 8000 e na liga de cobre Cu-Be*," 2001, 166 p, (Tese de Doutorado) - Umiversidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [13] JUNG, T.-S., YANG, M.-Y., e LEE, K.-J., "A new approach to analysing machined surfaces by ball-end milling, part I," *Advanced Manufacturing Technology*, 2004.
- [14] SALAMI, R., SADEGHI, M. H., e MOTAKEF, B., "Feed rate optimization for 3-axis ball-end milling of sculptured surfaces," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 47, pp. 760- 767, 2007.

- [15] OLIVEIRA, A. C. D., "*Programação de estratégias de fresamento a altas velocidades (HSM) na manufatura de molde e matrizes através de sistemas CAM*," 2002, 155 p, (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- [16] WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B., POLLI, M. L., e GOMES, J. D. O., "Influência das características do suporte da ferramenta sobre a estabilidade dinâmica na usinagem do aço ABNT H13," *Máquinas e Metais*, vol. Abril, pp. 64-75, 2007.
- [17] POLLI, M. L., "*Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte*," 2005, p, (Tese de Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [18] URBANSKI, J. P., KOSHY, P., DEWES, R. C., e ASPINWALL, D. K., "High Speed Machining of Moulds and Dies for Net Shape Manufacture," *Materials & Design*, vol. 21, pp. 395- 402, 2000.
- [19] DEWES, R. C. e ASPINWALL, D. K., "A review of ultra high speed milling of hardened steels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 69, pp. 1- 17, 1997.
- [20] PIVETTA, C. S., "*Uma contribuição ao estudo do fresamento de aço endurecido com fresa de topo esférico*," 2005, 110 p, (Dissertação de mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- [21] SANDVIK, *Fabricação de Moldes e Matrizes: Guia de Aplicação*: Sandvik Coromant, 1999.
- [22] CHIAVERINI, V., *Aços e Ferros Fundidos*, 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.
- [23] BAPTISTA, A. L. D. B., *Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços*, disponível em: <http://www.scielo.br>, acessado em: Julho/ 2006.
- [24] TOH, C. K., "Cutter path orientations when high-speed finish milling inclined hardened steel," *Advanced Manufacturing Technology*, 2005.
- [25] TÖNSHOFF, H. K., "Die manufacturing by 5 and 3 axes milling," *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 20, pp. 105-119, 1989.
- [26] KANG, M. C., KIM, K. K., LEE, D. W., KIM, J. S., e KIM, N. K., "Characteristics of inclined planes according to the variations of cutting direction in high speed ball end milling," *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, vol. 17, pp. 323-329, 2001.
- [27] TOH, C. K., "Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel," *Precision Engineering*, vol. 28, pp. 386-398, 2004.
- [28] ASPINWALL, D. K., DEWES, R. C., NG, E. G., SAGE, C., e SOO, S. L., "The influence of cutter orientation and workpiece angle on machinability when high-speed

- milling Inconel 718 under finishing conditions," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 47, pp. 1839- 1846, 2007.
- [29] RAMOS, A. M., RELVAS, C., e SIMÕES, J. A., "The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 136, pp. 209-216, 2003.
- [30] FONTAINE, M., DEVILLEZ, A., MOUFKI, A., e DUDZINSKI, D., "Modelling of cutting forces in ball-end milling with tool-surface inclination Part II. Influence of influence of cutting conditions, run-out , plouting and inclination angle," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 189, pp. 85-96, 2007.
- [31] TÖNSHOFF, *Scientific Fundamentals of HSC* Munich: Carl Hanser Verlag,2001.
- [32] SILVA FILHO, M. S. D., "*Fresamento por regiões como uma alternativa na usinagem de cavidades para moldes de injeção através de sistemas CAD/CAM*," 2000, 121 p, (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- [33] ERDIM, H., LAZOGLU, I., e OZTURK, B., "Feedrate scheduling strategies for free-form surfaces," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 46, pp. 747- 757, 2006.
- [34] CHEN, J. S., HUANG, Y. K., e CHEN, M. S., "A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, pp. 1077-1084, 2005.
- [35] CHEN, J. S., HUANG, Y. K., e CHEN, M. S., "Feedrate optimization and tool profile modification for the high-efficiency ball-end milling process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, pp. 1070- 1076, 2005.
- [36] SILVA, A. L. C. e MEI, P. R., *Aços e Ligas Especiais*, 2 ed. Sumaré, SP, Eletrometal S.A.: Metais Especiais,1998.
- [37] WANG, J. J. J. e ZHENG, M. Y., "On the machining characteristics of H13 tool steel in the different hardness states in ball end milling," *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, vol. 22, pp. 855-863, 2003.
- [38] VIECELLI, A., *Propriedades Mecânicas dos Materiais*. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul - Anotações de aula,2005.
- [39] CALLISTER, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução*, 5 ed. Rio de Janeiro: LTC,2002.
- [40] SHACKELFORD, J. F., *Introduction to Materials Science for Engineers*, 5 ed.: Upper Saddle River: Prentice Hall,2000.
- [41] METALS, H., *Heat Treating, Cleaning and Finishing*, 8 ed. vol. 2: American Society for Metals- USA,1964.

- [42] ASM, *Handbook Mechanical Testing and Evaluation* vol. 8,2000.
- [43] OLIVEIRA, J. M., "*Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas*," 2006, p, (Dissertação de Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.
- [44] BET, L., "*Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e sondas ópticas tipo seguidor*," 1999, p, (tese de doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- [45] BETHKE, J., *Surface Technology in Production Engineering*, ed.,1995.
- [46] DIN, D. I. F. N., *Form deviations. Concepts. Classification System*. DIN 4760. Berlin : Beut,Jun., 1982.
- [47] MESQUITA, N. G., "*Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação*," 1992, p, (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.
- [48] DIN, D. I. F. N., *Surface character. Geometrical characteristics of surface texture. Terms/definitions, symbols*. DIN 4761. Berlin : Beut,Dez., 1978.
- [49] SME, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4 ed. vol. IV: Dearborn/ Michigan: SME, Quality control and assembly,cap. 5 Surface tecnologia - surface texture,1987.
- [50] TABENKIN, A., *Surface finish: a machinist's tool. A design necessity*, disponível em: <http://www.mmsonline.com>, acessado em: 30/05/2005.
- [51] BIBVIRT, *Representação de Rugosidade- Biblioteca virtual da USP*, disponível em: http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursprofissionalizante/tc2000/metrologia/aula20.pdf, acessado em: novembro/ 2006.
- [52] HUTCHINGS, I. M., *Tribology - Friction and wear of engineering materials*. London: Edward Arnold,1992.
- [53] ZEILMANN, R. P., SANTIN, R., e NICOLA, G. L., "Qualidade superficial em fresamento de topo esférico," *Máquinas e Metais*, vol. Outubro, pp. 152- 159, 2006.
- [54] WHITEHOUSE, D. J., *Handbook of Surface Metrology*, 1 ed. London: IOP Publishing,1994.
- [55] SANDER, M., *Oberflächenmesstechnik für den Praktiker*, 1 ed. Aufl. Göttingen: Feinprüf GmbH,1989.
- [56] HOBSON, T., *The parameter tree of surface roughness*: Taylor Hobson- Centre of excellence,2000.
- [57] MITUTOYO, *SJ-301 - Surface Roughness Tester- User's Manual*.

- [58] ZEILMANN, R. P., "Ensaio Experimental 03 – EE03: A avaliação dos critérios de usinabilidade do aço AISI H13 – Ensaio de variação dos parâmetros de corte com ferramenta de topo esférico, d = 6 mm," UCS, Caxias do Sul 2003.
- [59] MALISKA, A. M., "Microscopia Eletrônica de Varredura," Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2004.
- [60] GONÇALVES, M. C., *Técnicas de caracterização de polímeros*. São Paulo,2004.
- [61] FINKLER, M., "*Desenvolvimento de Compósitos Utilizando Matriz de Polietileno e Fibras do Resíduo de Malharia*," 2005, p, (Dissertação de Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2005.
- [62] MONTGOMERY, D. C., *Design and analysis of experiments*, 5 ed. New York: J. Wiley,2001.

ANEXOS

ANEXO 1 – RUGOSIDADE ENSAIOS PRELIMINARES

ANEXO 2 – RUGOSIDADE ENSAIOS EFETIVOS

ANEXO 3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA

ANEXO 1

VALORES DE RUGOSIDADE - ENSAIOS PRELIMINARES

Tabela 13- Rugosidade média obtida nos ensaios preliminares

| | | Valores médios de rugosidade (μm) | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | HS | | | HD | | | VS | | | VD | | |
| | | R_a | R_v | R_z | R_a | R_v | R_z | R_a | R_v | R_z | R_a | R_v | R_z |
| Condição | Direção | | | | | | | | | | | | |
| A | f_z | 0,24 | 1,31 | 0,93 | 0,18 | 1,10 | 0,71 | 0,43 | 3,43 | 2,34 | 0,39 | 2,33 | 1,70 |
| | σ | 0,04 | 0,12 | 0,18 | 0,04 | 0,31 | 0,27 | 0,03 | 0,14 | 0,14 | 0,09 | 0,57 | 0,40 |
| | a_e | 0,33 | 2,26 | 1,58 | 0,86 | 2,70 | 2,30 | 0,46 | 2,70 | 1,77 | 0,35 | 1,79 | 1,26 |
| | σ | 0,04 | 0,17 | 0,10 | 0,59 | 0,12 | 0,08 | 0,05 | 0,29 | 0,21 | 0,03 | 0,12 | 0,13 |
| B | f_z | 0,18 | 1,09 | 0,68 | 0,15 | 1,04 | 0,65 | 0,44 | 2,79 | 1,90 | 0,46 | 2,74 | 2,21 |
| | σ | 0,02 | 0,17 | 0,10 | 0,04 | 0,36 | 0,26 | 0,14 | 0,56 | 0,37 | 0,05 | 0,37 | 0,25 |
| | a_e | 0,61 | 2,90 | 2,45 | 0,48 | 2,17 | 1,87 | 0,35 | 2,03 | 1,34 | 0,41 | 2,19 | 1,56 |
| | σ | 0,01 | 0,06 | 0,03 | 0,03 | 0,20 | 0,09 | 0,03 | 0,19 | 0,15 | 0,05 | 0,17 | 0,17 |
| C | f_z | 0,27 | 1,45 | 0,98 | 0,20 | 0,99 | 0,71 | 1,46 | 7,50 | 5,12 | 0,57 | 2,95 | 2,62 |
| | σ | 0,05 | 0,24 | 0,14 | 0,04 | 0,17 | 0,14 | 0,10 | 0,26 | 0,16 | 0,06 | 0,25 | 0,13 |
| | a_e | 0,62 | 3,08 | 2,51 | 0,32 | 2,29 | 1,84 | 0,88 | 5,20 | 3,42 | 0,31 | 1,48 | 0,98 |
| | σ | 0,02 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,11 | 0,05 | 0,12 | 0,64 | 0,37 | 0,02 | 0,08 | 0,08 |
| D | f_z | 0,28 | 1,50 | 1,00 | 0,19 | 1,10 | 0,74 | 1,41 | 7,92 | 5,52 | 0,31 | 2,10 | 1,82 |
| | σ | 0,04 | 0,21 | 0,12 | 0,11 | 0,52 | 0,49 | 0,21 | 0,88 | 0,40 | 0,03 | 0,21 | 0,18 |
| | a_e | 0,78 | 3,69 | 3,31 | 0,27 | 1,96 | 1,62 | 1,43 | 8,09 | 5,22 | 0,23 | 1,32 | 0,86 |
| | σ | 0,01 | 0,07 | 0,07 | 0,01 | 0,09 | 0,04 | 0,32 | 1,42 | 0,97 | 0,04 | 0,16 | 0,13 |

ANEXO 2

VALORES DE RUGOSIDADE - ENSAIOS EFETIVOS

Tabela 14- Rugosidade média obtida nos ensaios efetivos

| | | Rugosidade (μm) | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | HS | | | HD | | | VS | | | VD | | |
| | | R _a | R _v | R _z | R _a | R _v | R _z | R _a | R _v | R _z | R _a | R _v | R _z |
| CP | Direção | | | | | | | | | | | | |
| 2 | f _z | 0.17 | 1.15 | 0.97 | 0.21 | 1.16 | 1.02 | 0.64 | 4.74 | 4.01 | 0.26 | 1.56 | 1.35 |
| | σ | 0.03 | 0.21 | 0.17 | 0.02 | 0.11 | 0.02 | 0.08 | 0.30 | 0.20 | 0.04 | 0.22 | 0.22 |
| | incerteza | 0.02 | 0.12 | 0.10 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.18 | 0.12 | 0.02 | 0.13 | 0.13 |
| | a _e | 0.25 | 1.63 | 1.42 | 0.29 | 1.63 | 1.46 | 0.62 | 3.93 | 3.53 | 0.29 | 1.59 | 1.43 |
| | σ | 0.01 | 0.07 | 0.05 | 0.00 | 0.09 | 0.07 | 0.10 | 0.58 | 0.50 | 0.02 | 0.12 | 0.16 |
| | incerteza | 0.00 | 0.04 | 0.03 | 0.00 | 0.05 | 0.04 | 0.06 | 0.33 | 0.29 | 0.01 | 0.07 | 0.09 |
| 3 | f _z | 0.16 | 1.17 | 0.88 | 0.15 | 1.10 | 0.88 | 0.66 | 4.87 | 4.29 | 0.18 | 1.12 | 1.00 |
| | σ | 0.01 | 0.15 | 0.04 | 0.02 | 0.18 | 0.08 | 0.11 | 1.20 | 1.01 | 0.06 | 0.27 | 0.28 |
| | incerteza | 0.01 | 0.09 | 0.02 | 0.01 | 0.10 | 0.05 | 0.06 | 0.69 | 0.58 | 0.03 | 0.16 | 0.16 |
| | a _e | 0.33 | 2.14 | 1.81 | 0.44 | 2.20 | 2.07 | 0.65 | 4.85 | 3.81 | 0.31 | 1.96 | 1.55 |
| | σ | 0.02 | 0.38 | 0.13 | 0.02 | 0.13 | 0.08 | 0.09 | 0.66 | 0.28 | 0.02 | 0.12 | 0.09 |
| | incerteza | 0.01 | 0.22 | 0.08 | 0.01 | 0.08 | 0.04 | 0.05 | 0.38 | 0.16 | 0.01 | 0.07 | 0.05 |
| 4 | f _z | 0.18 | 1.19 | 0.96 | 0.19 | 1.09 | 0.88 | 0.97 | 6.69 | 5.46 | 0.21 | 1.27 | 1.12 |
| | σ | 0.04 | 0.39 | 0.13 | 0.05 | 0.24 | 0.19 | 0.07 | 1.12 | 0.42 | 0.03 | 0.03 | 0.04 |
| | incerteza | 0.02 | 0.22 | 0.07 | 0.03 | 0.14 | 0.11 | 0.04 | 0.64 | 0.24 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| | a _e | 0.28 | 1.77 | 1.64 | 0.24 | 1.65 | 1.46 | 0.76 | 6.05 | 4.38 | 0.23 | 1.36 | 1.11 |
| | σ | 0.01 | 0.04 | 0.06 | 0.01 | 0.10 | 0.06 | 0.08 | 0.40 | 0.22 | 0.01 | 0.02 | 0.03 |
| | incerteza | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.05 | 0.03 | 0.04 | 0.23 | 0.12 | 0.00 | 0.01 | 0.02 |

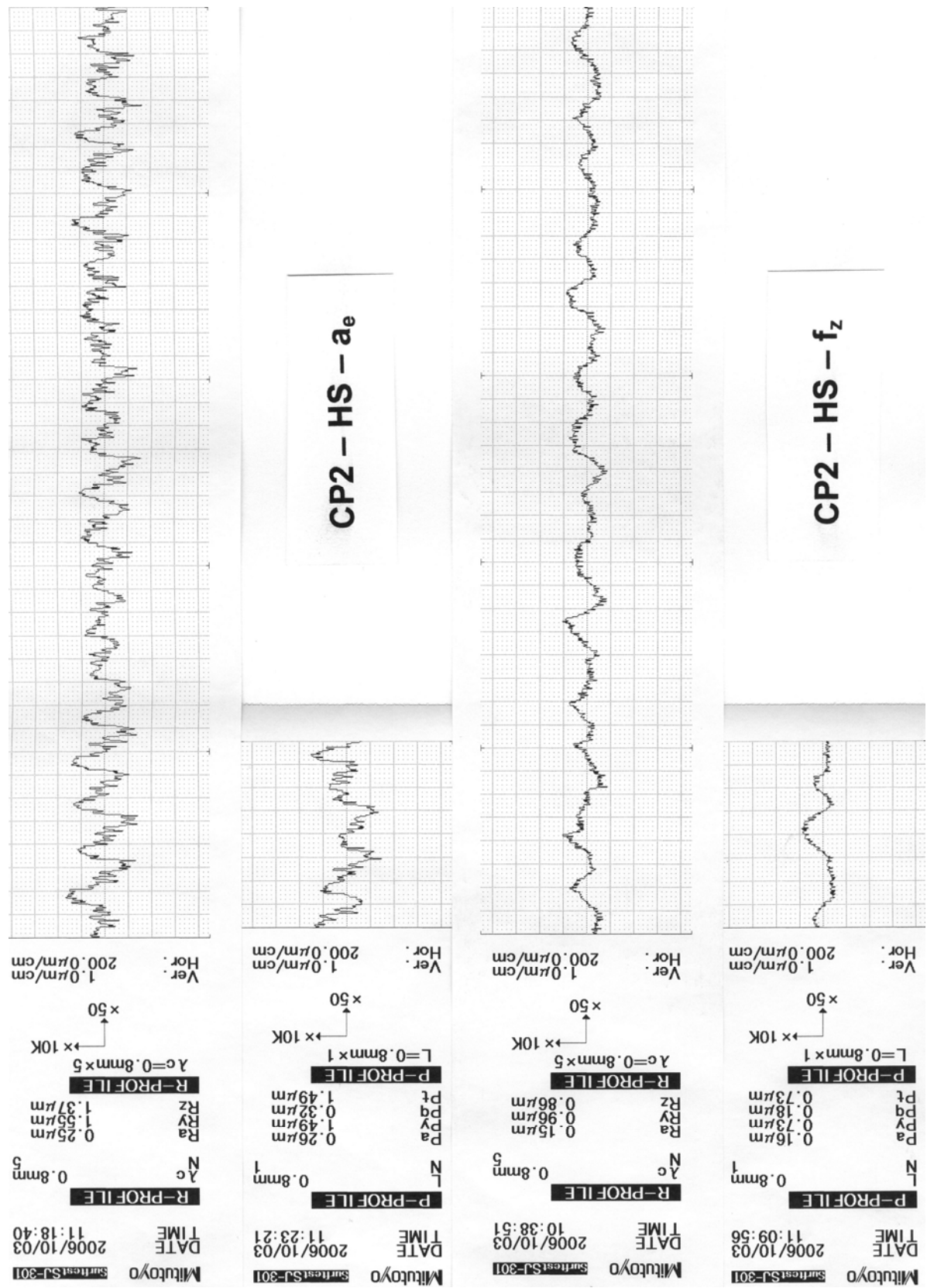


Figura 79- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP2, estratégia HS nas direções do a_e e f_z

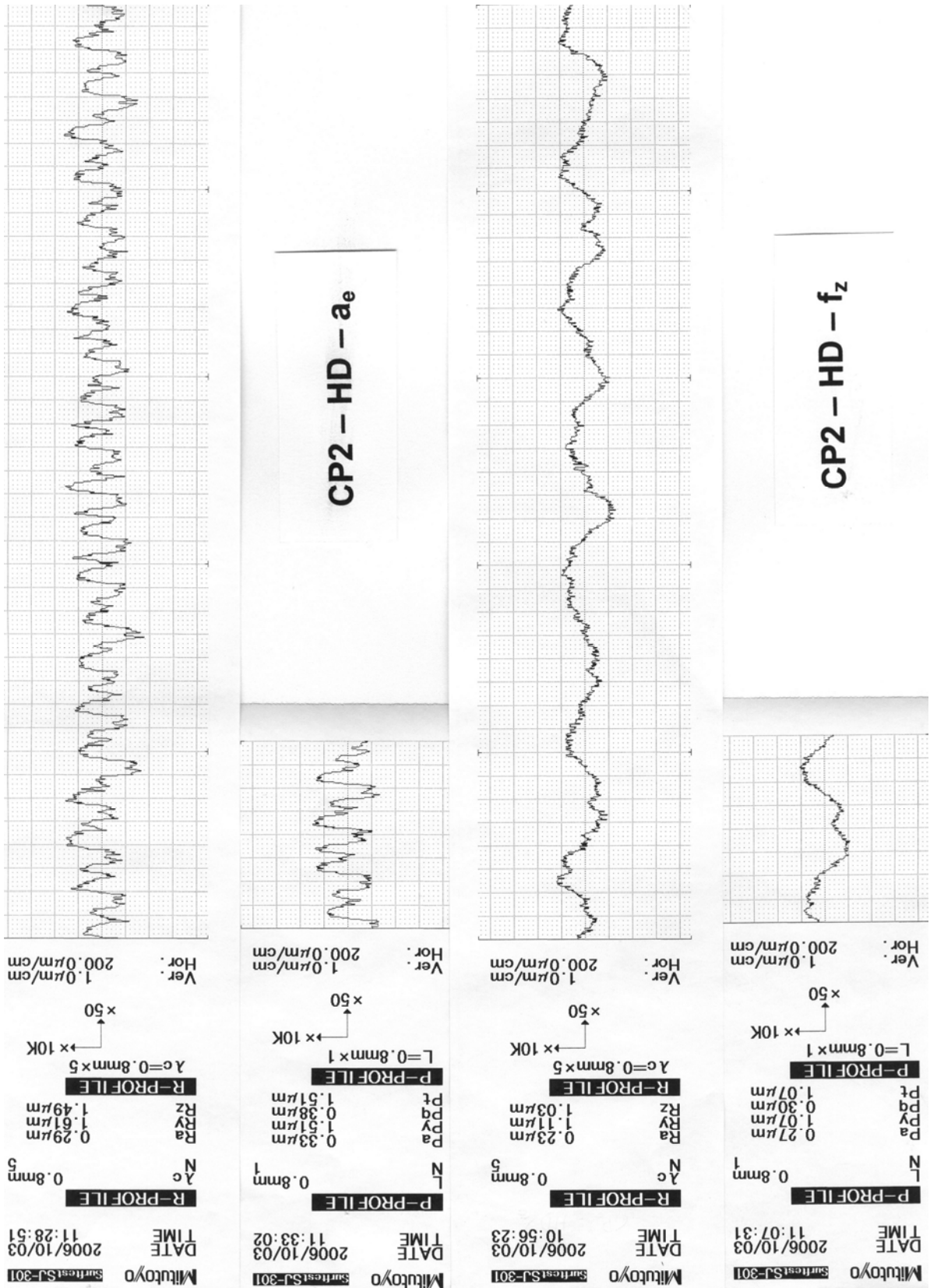


Figura 80- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP2, estratégia HD nas direções do a_e e f_z

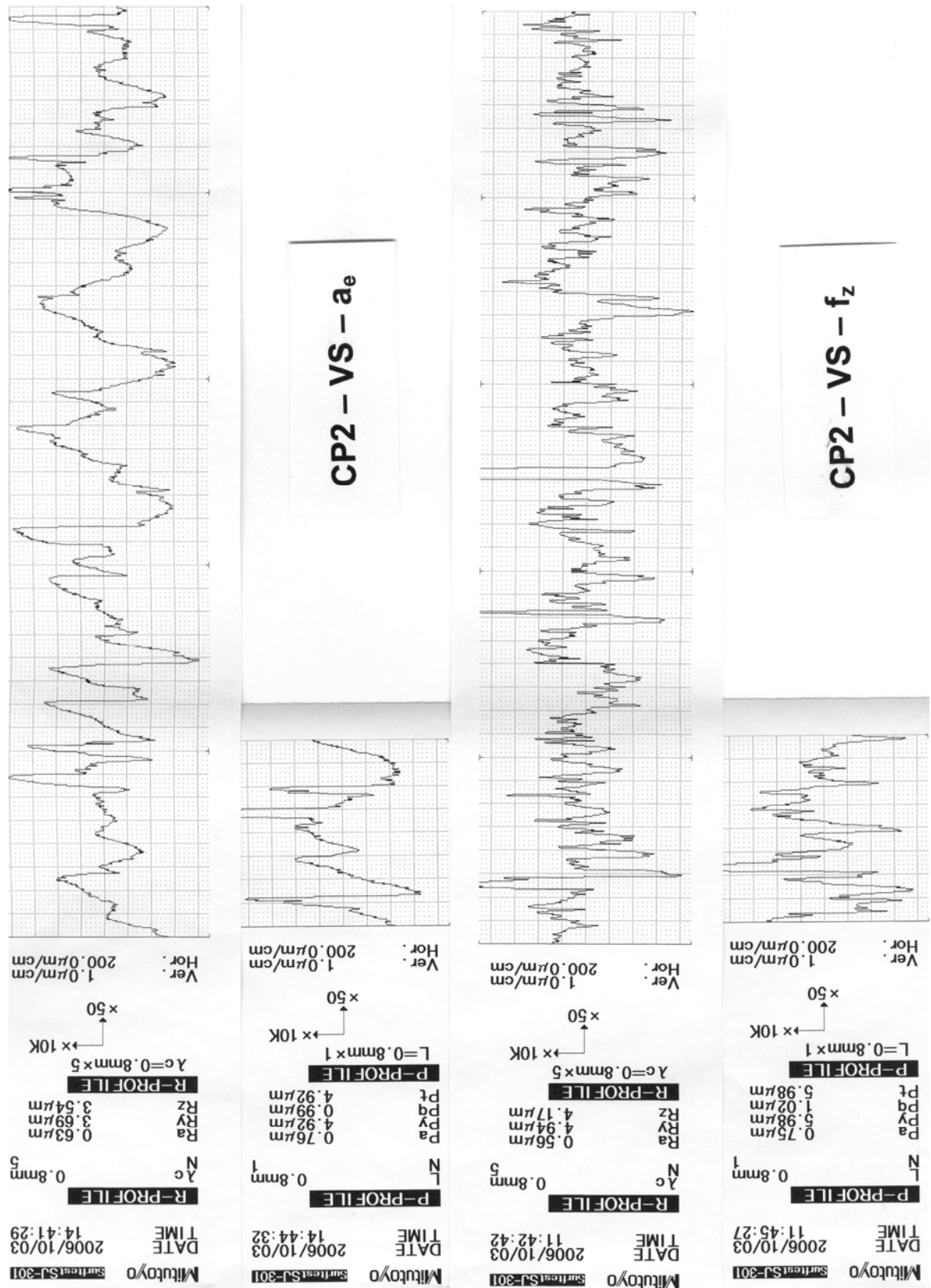


Figura 81- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP2, estratégia VS nas direções do a_e e f_z

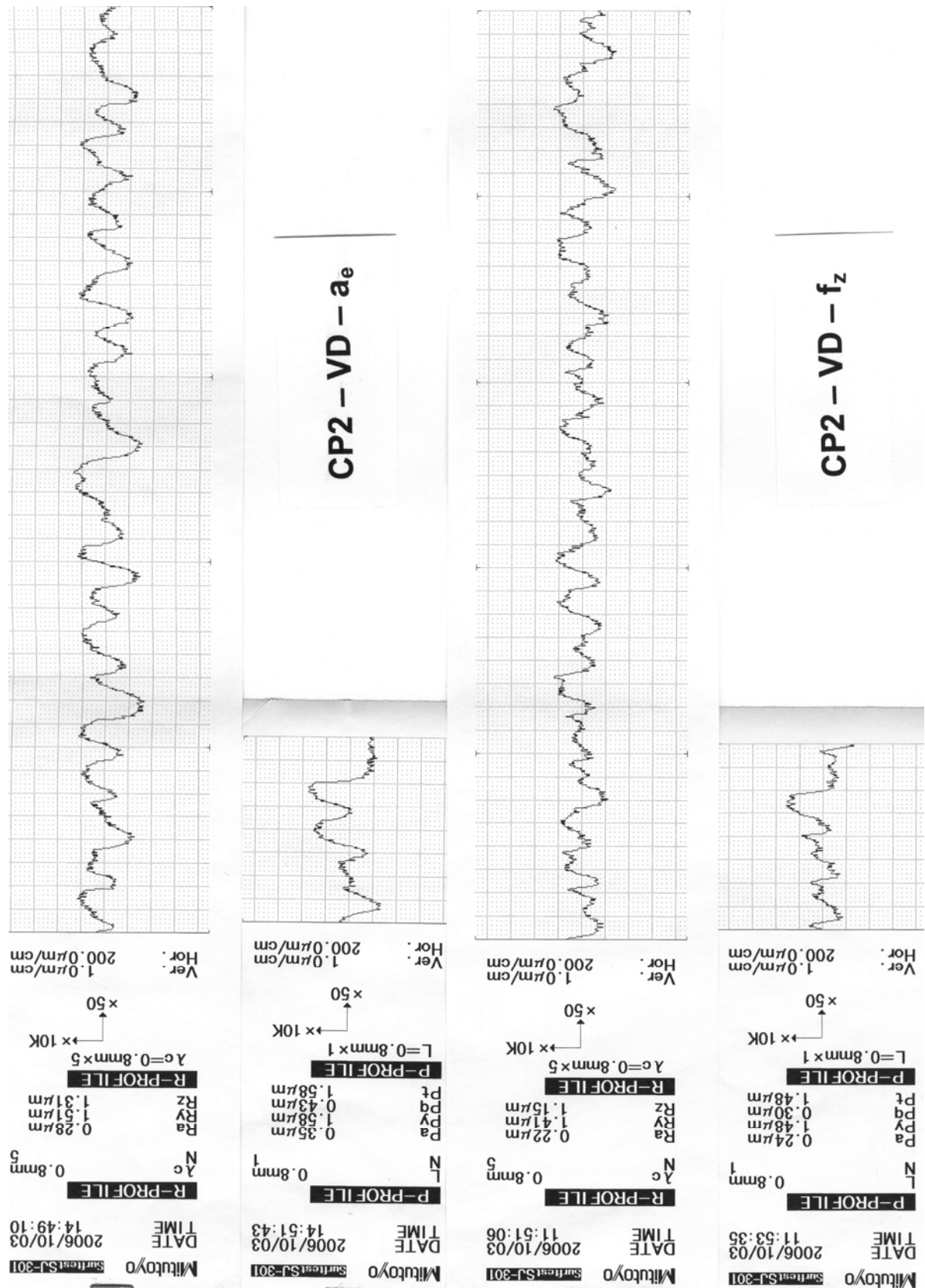


Figura 82- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP2, estratégia VD nas direções do a_e e f_z

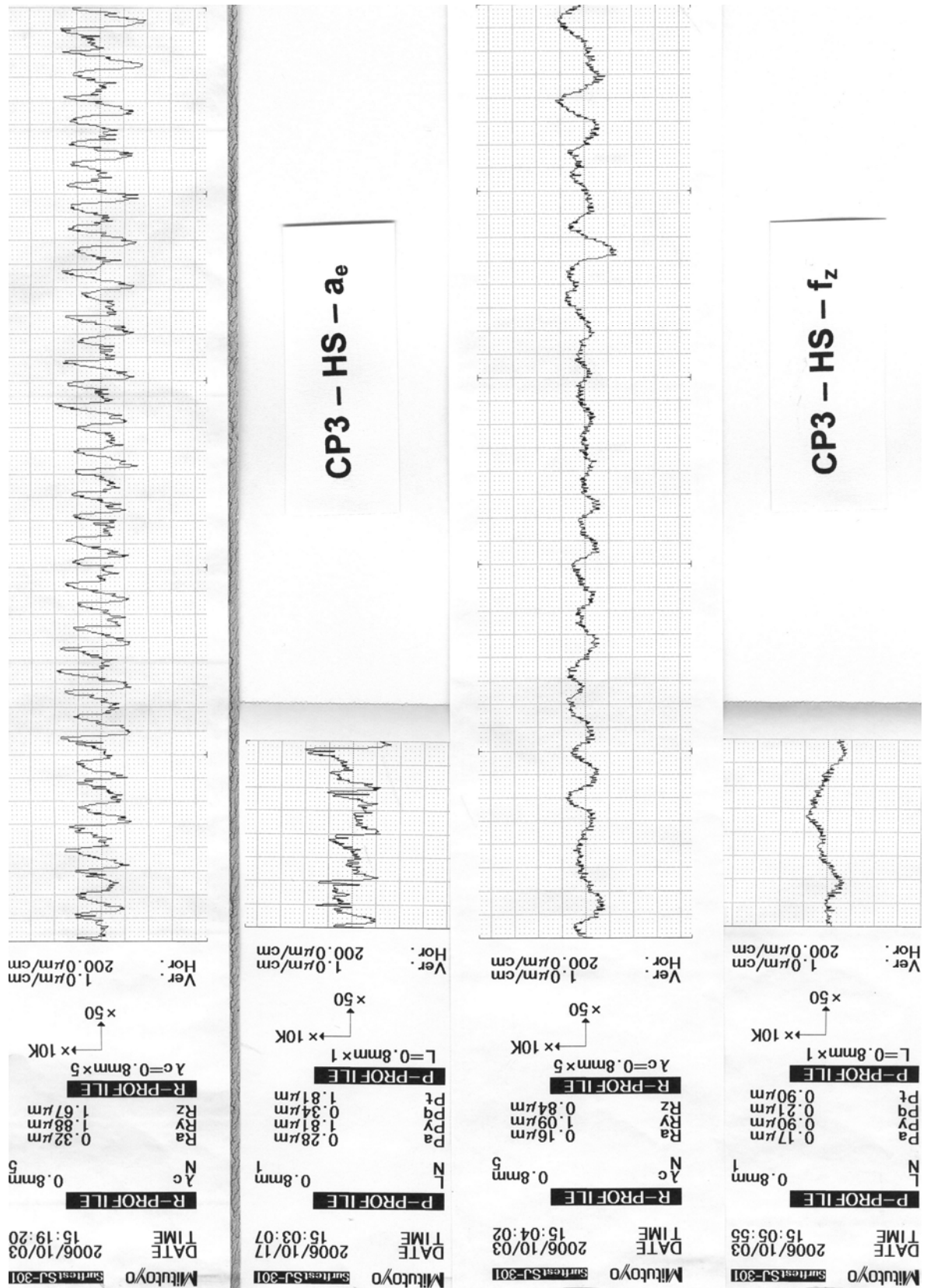


Figura 83- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP3, estratégia HS nas direções do a_e e f_z

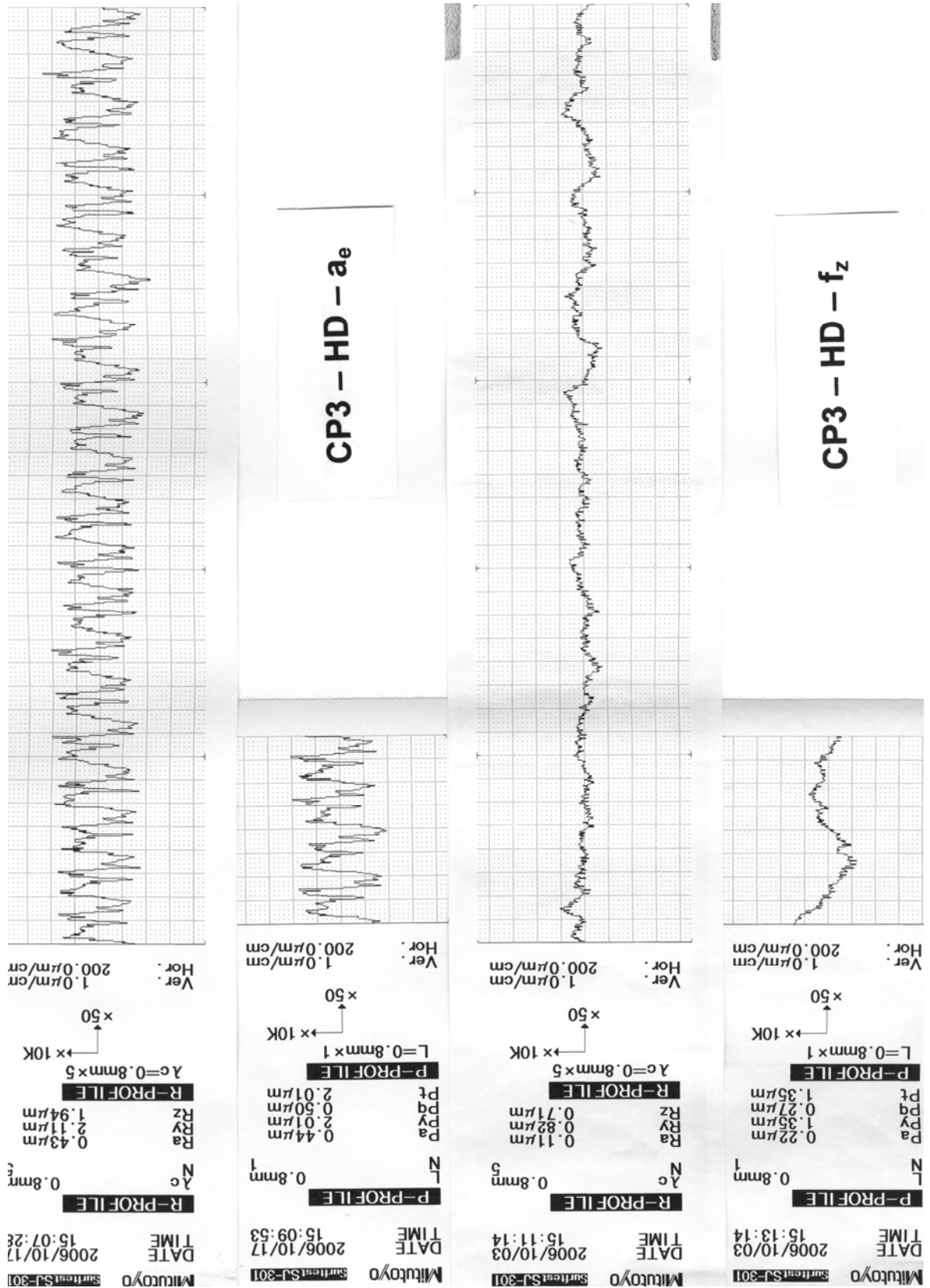


Figura 84- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP3, estratégia HD nas direções do a_e e f_z

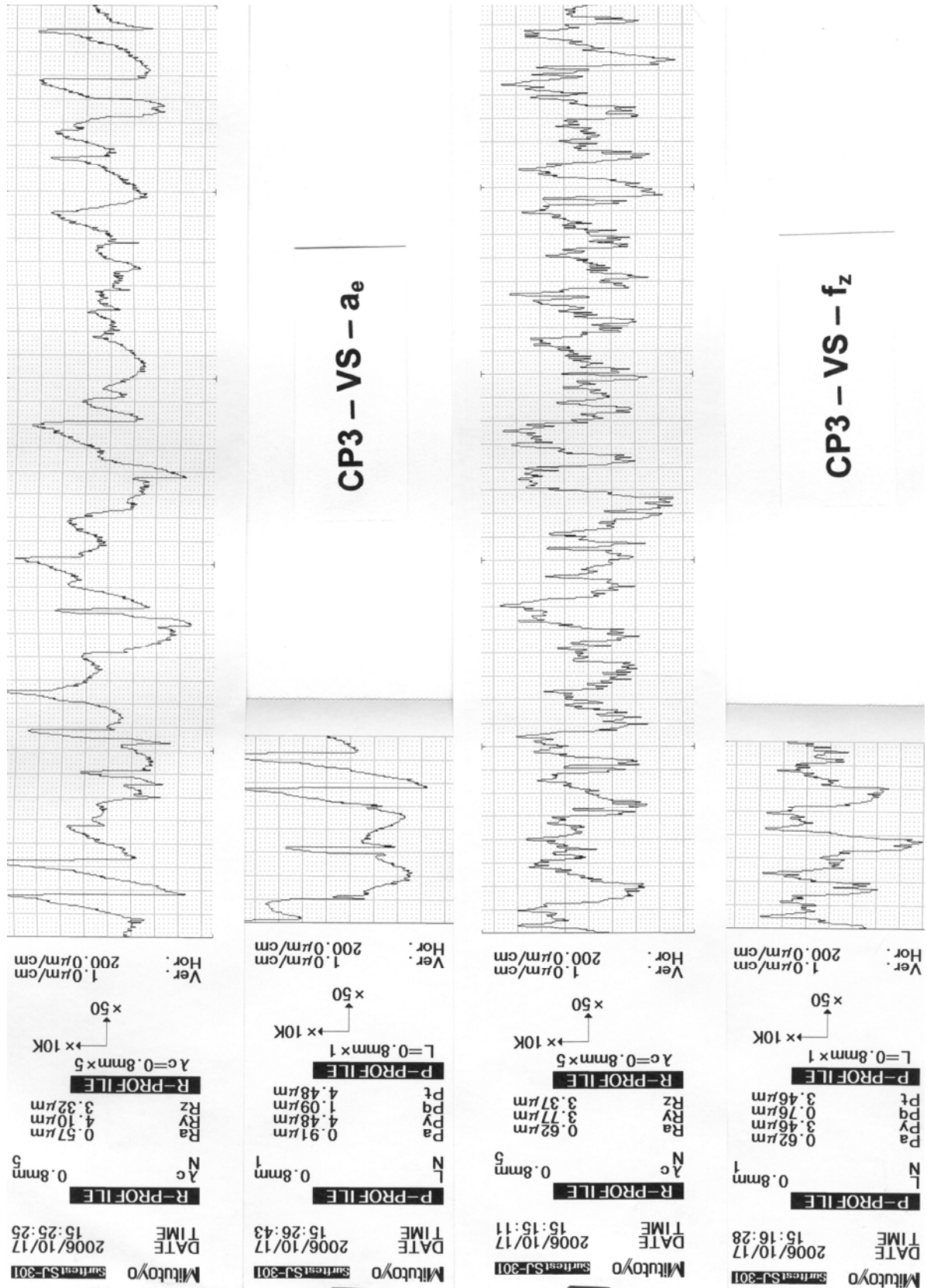


Figura 85- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP3, estratégia VS nas direções do a_e e f_z

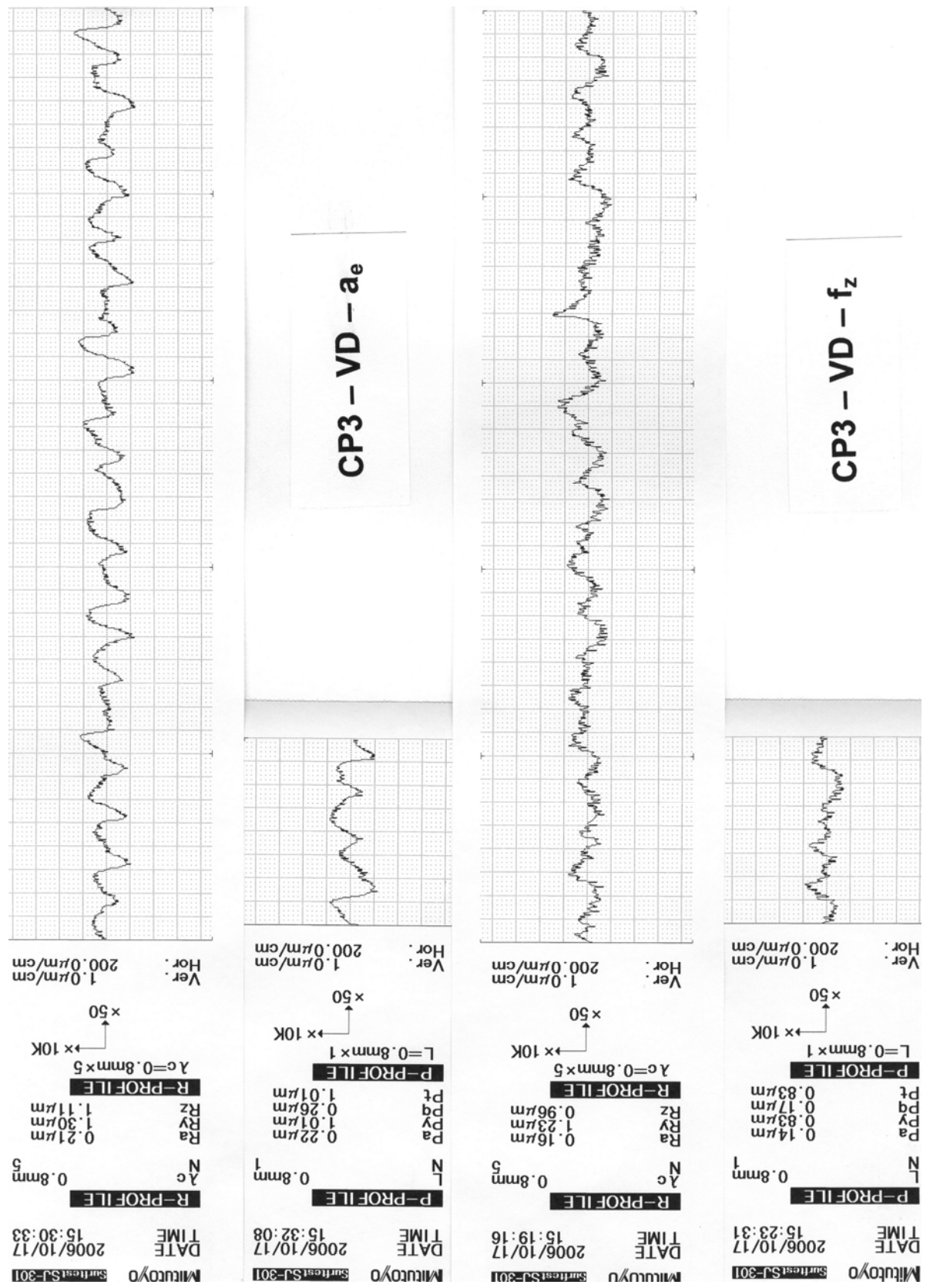
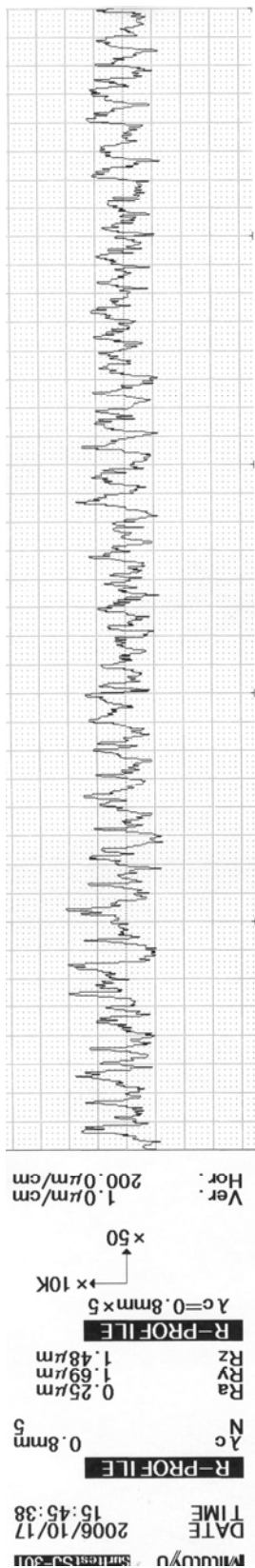
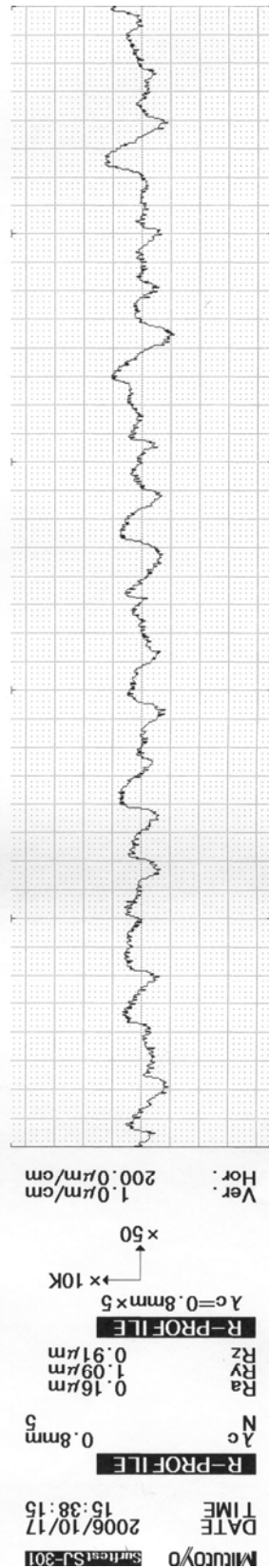


Figura 86- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP3, estratégia VD nas direções do a_e e f_z



CP4 – HS – a_e



CP4 – HS – f_z

Figura 87- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP4, estratégia HS nas direções do a_e e f_z

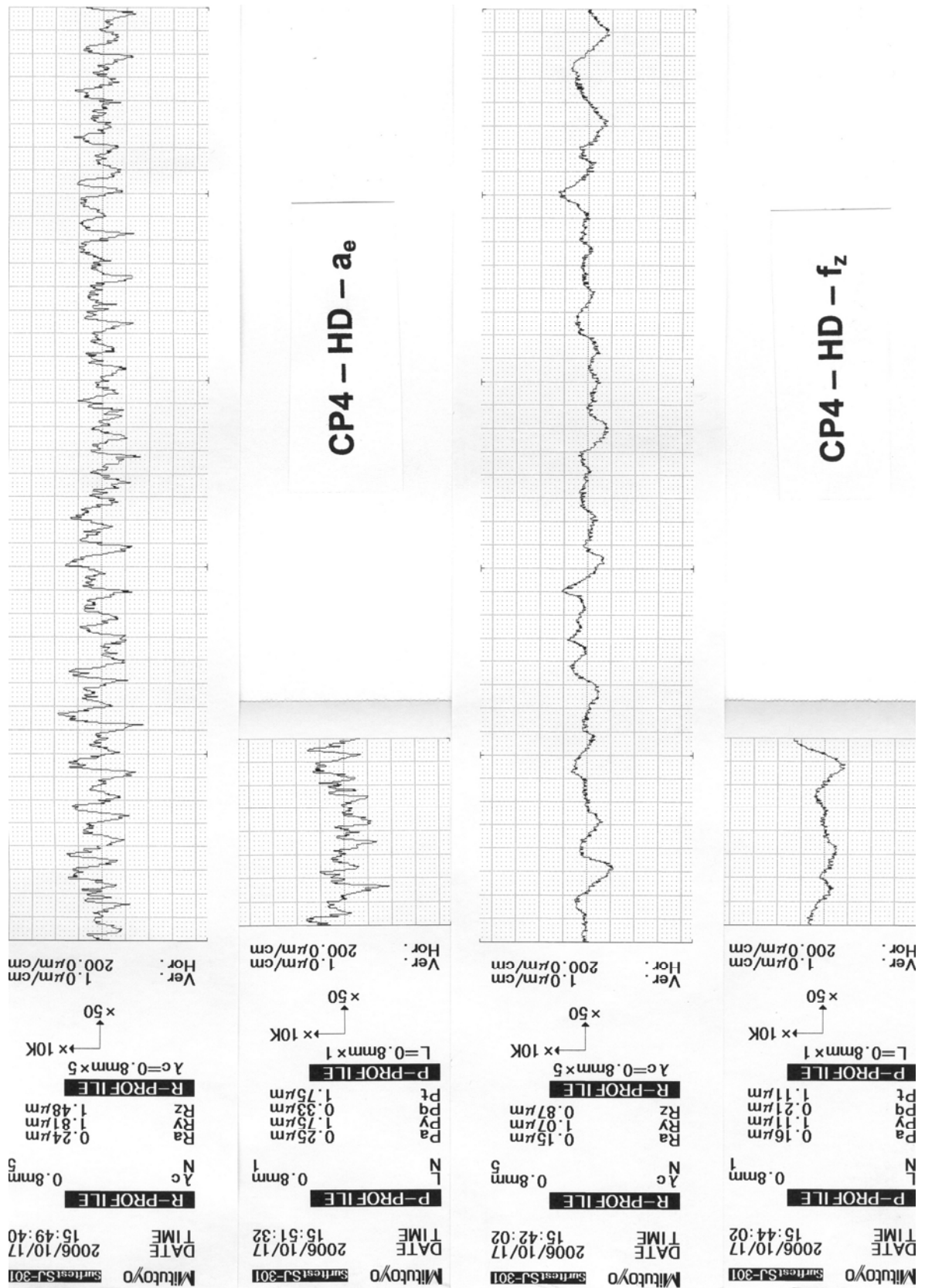


Figura 88- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP4, estratégia HD nas direções do a_e e f_z

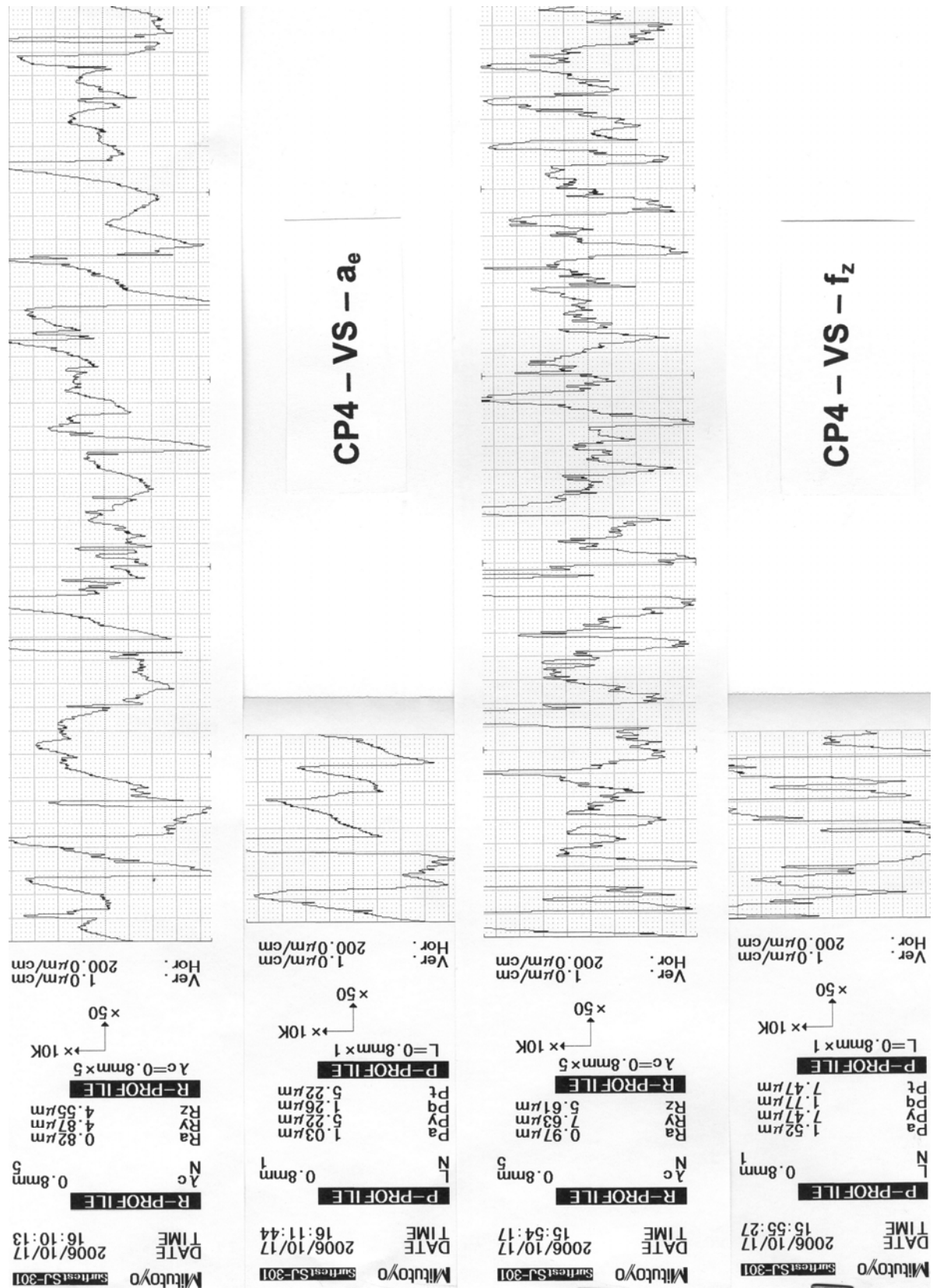


Figura 89- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP4, estratégia VS nas direções do a_e e f_z

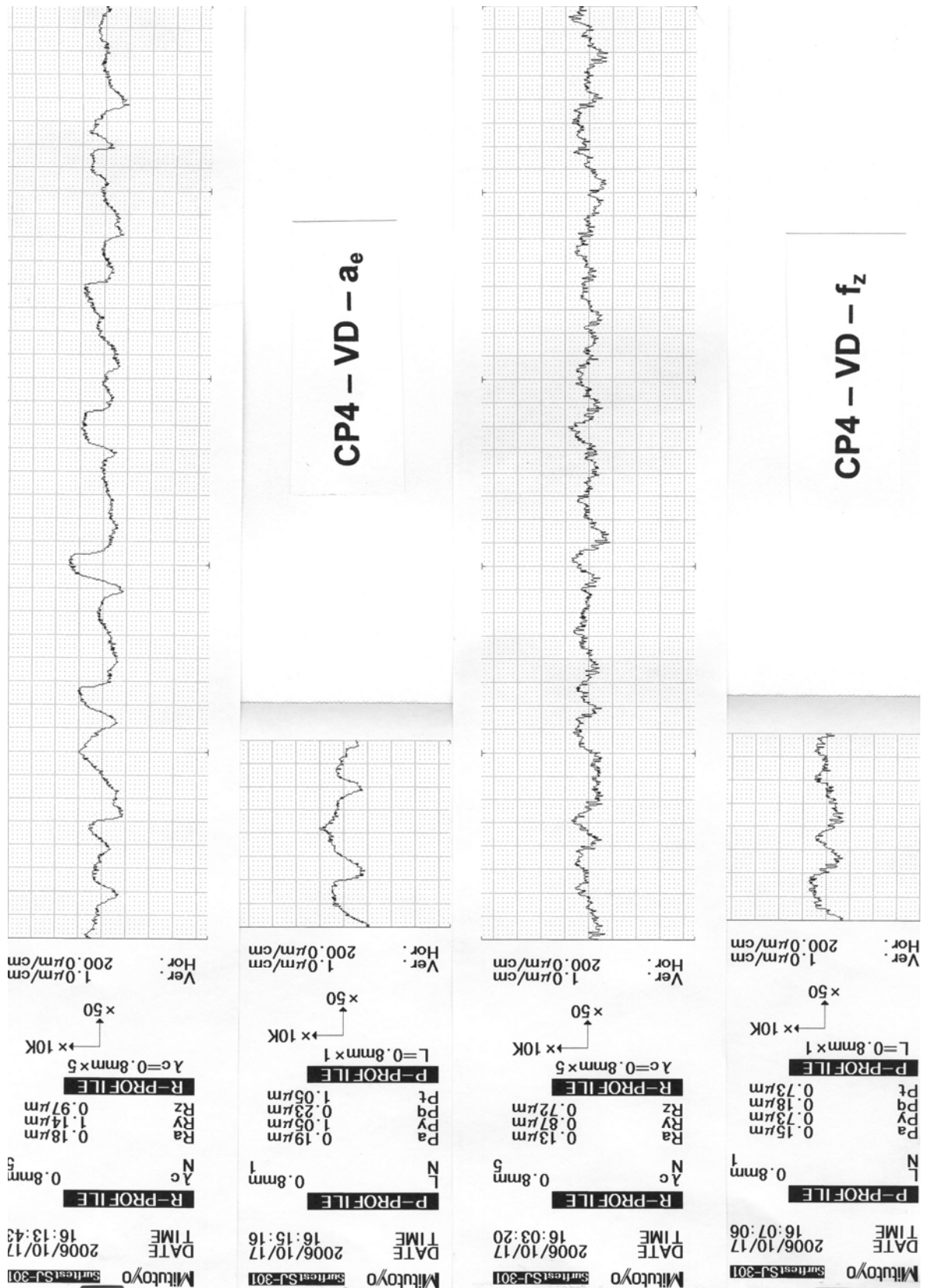


Figura 90- Gráficos de rugosidade e perfil para o CP4, estratégia VD nas direções do a_e e f_z

ANEXO 3

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os valores de rugosidade empregados na análise estão expressos nas Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17, para os parâmetros medidos R_a , R_y e R_z , respectivamente.

Tabela 15- tabela de dados de rugosidade R_a para tratamento estatístico

| Rugosidade parâmetro R_a (μm) | | | | | | | | | | |
|--|---------------|------|------|-------|-------|---------------|------|------|-------|-------|
| Estratégia | Direção f_z | | | | | Direção a_e | | | | |
| | CP 2 | CP 3 | CP 4 | Soma | Média | CP 2 | CP 3 | CP 4 | Soma | Média |
| HS | 0.15 | 0.17 | 0.22 | 0.54 | 0.18 | 0.25 | 0.32 | 0.27 | 0.84 | 0.28 |
| | 0.15 | 0.15 | 0.17 | 0.47 | 0.16 | 0.25 | 0.35 | 0.29 | 0.89 | 0.30 |
| | 0.21 | 0.16 | 0.14 | 0.51 | 0.17 | 0.26 | 0.32 | 0.28 | 0.86 | 0.29 |
| HD | 0.19 | 0.14 | 0.23 | 0.56 | 0.19 | 0.29 | 0.45 | 0.24 | 0.98 | 0.33 |
| | 0.21 | 0.14 | 0.14 | 0.49 | 0.16 | 0.29 | 0.45 | 0.23 | 0.97 | 0.32 |
| | 0.23 | 0.18 | 0.19 | 0.60 | 0.20 | 0.29 | 0.41 | 0.25 | 0.95 | 0.32 |
| VS | 0.71 | 0.54 | 0.93 | 2.18 | 0.73 | 0.72 | 0.75 | 0.75 | 2.22 | 0.74 |
| | 0.64 | 0.68 | 1.05 | 2.37 | 0.79 | 0.52 | 0.63 | 0.84 | 1.99 | 0.66 |
| | 0.56 | 0.76 | 0.94 | 2.26 | 0.75 | 0.63 | 0.57 | 0.69 | 1.89 | 0.63 |
| VD | 0.26 | 0.13 | 0.19 | 0.58 | 0.19 | 0.27 | 0.33 | 0.23 | 0.83 | 0.28 |
| | 0.29 | 0.24 | 0.20 | 0.73 | 0.24 | 0.28 | 0.30 | 0.22 | 0.80 | 0.27 |
| | 0.22 | 0.17 | 0.24 | 0.63 | 0.21 | 0.31 | 0.31 | 0.23 | 0.85 | 0.28 |
| total | | | | 11.92 | 0.33 | | | | 14.07 | 0.39 |

Tabela 16- tabela de dados de rugosidade R_y para tratamento estatístico

| Rugosidade parâmetro R_y (μm) | | | | | | | | | | |
|--|---------------|------|------|-------|-------|---------------|------|------|-------|-------|
| Estratégia | Direção f_z | | | | | Direção a_e | | | | |
| | CP 2 | CP 3 | CP 4 | Soma | Média | CP 2 | CP 3 | CP 4 | Soma | Média |
| HS | 0.96 | 1.08 | 1.64 | 3.68 | 1.23 | 1.67 | 1.97 | 1.79 | 5.43 | 1.81 |
| | 1.10 | 1.35 | 0.94 | 3.39 | 1.13 | 1.55 | 2.57 | 1.79 | 5.91 | 1.97 |
| | 1.38 | 1.09 | 1.00 | 3.47 | 1.16 | 1.68 | 1.88 | 1.72 | 5.28 | 1.76 |
| HD | 1.09 | 1.28 | 1.30 | 3.67 | 1.22 | 1.56 | 2.35 | 1.55 | 5.46 | 1.82 |
| | 1.29 | 0.92 | 0.82 | 3.03 | 1.01 | 1.61 | 2.16 | 1.65 | 5.42 | 1.81 |
| | 1.11 | 1.11 | 1.14 | 3.36 | 1.12 | 1.73 | 2.10 | 1.74 | 5.57 | 1.86 |
| VS | 4.39 | 3.50 | 5.79 | 13.68 | 4.56 | 4.59 | 5.60 | 5.66 | 15.85 | 5.28 |
| | 4.89 | 5.38 | 7.94 | 18.21 | 6.07 | 3.52 | 4.59 | 6.02 | 14.13 | 4.71 |
| | 4.94 | 5.73 | 6.34 | 17.01 | 5.67 | 3.69 | 4.35 | 6.46 | 14.50 | 4.83 |
| VD | 1.46 | 0.85 | 1.25 | 3.56 | 1.19 | 1.53 | 2.08 | 1.37 | 4.98 | 1.66 |
| | 1.82 | 1.39 | 1.31 | 4.52 | 1.51 | 1.51 | 1.84 | 1.34 | 4.69 | 1.56 |
| | 1.41 | 1.13 | 1.26 | 3.80 | 1.27 | 1.73 | 1.97 | 1.38 | 5.08 | 1.69 |
| total | | | | 81.38 | 2.26 | | | | 92.30 | 2.56 |

Tabela 17- tabela de dados de rugosidade R_z para tratamento estatístico

| Estratégia | Rugosidade parâmetro R_z (μm) | | | | | | | | | |
|------------|--|------|------|-------|-------|---------------|------|------|-------|-------|
| | Direção f_z | | | | | Direção a_e | | | | |
| | CP 2 | CP 3 | CP 4 | Soma | Média | CP 2 | CP 3 | CP 4 | Soma | Média |
| HS | 0.86 | 0.91 | 1.11 | 2.88 | 0.96 | 1.42 | 1.83 | 1.66 | 4.91 | 1.64 |
| | 0.89 | 0.88 | 0.88 | 2.65 | 0.88 | 1.37 | 1.93 | 1.68 | 4.98 | 1.66 |
| | 1.16 | 0.84 | 0.90 | 2.90 | 0.97 | 1.46 | 1.67 | 1.57 | 4.70 | 1.57 |
| HD | 1.00 | 0.93 | 1.06 | 2.99 | 1.00 | 1.38 | 2.12 | 1.40 | 4.90 | 1.63 |
| | 1.02 | 0.78 | 0.69 | 2.49 | 0.83 | 1.49 | 2.10 | 1.49 | 5.08 | 1.69 |
| | 1.03 | 0.92 | 0.88 | 2.83 | 0.94 | 1.52 | 1.98 | 1.50 | 5.00 | 1.67 |
| VS | 4.08 | 3.16 | 5.00 | 12.24 | 4.08 | 4.02 | 4.03 | 4.59 | 12.64 | 4.21 |
| | 3.78 | 4.60 | 5.57 | 13.95 | 4.65 | 3.03 | 3.91 | 4.16 | 11.10 | 3.70 |
| | 4.17 | 5.11 | 5.81 | 15.09 | 5.03 | 3.54 | 3.50 | 4.39 | 11.43 | 3.81 |
| VD | 1.32 | 0.74 | 1.08 | 3.14 | 1.05 | 1.37 | 1.62 | 1.08 | 4.07 | 1.36 |
| | 1.58 | 1.29 | 1.12 | 3.99 | 1.33 | 1.31 | 1.44 | 1.13 | 3.88 | 1.29 |
| | 1.15 | 0.98 | 1.15 | 3.28 | 1.09 | 1.61 | 1.58 | 1.12 | 4.31 | 1.44 |
| total | | | | 68.43 | 1.90 | | | | 77.00 | 2.14 |

Os resultados da análise de resíduos estão ilustrados na forma de gráficos, conforme as Figura 91, Figura 92 e Figura 93, para os parâmetros R_a , R_y e R_z , respectivamente, nas direções de f_z e a_e .

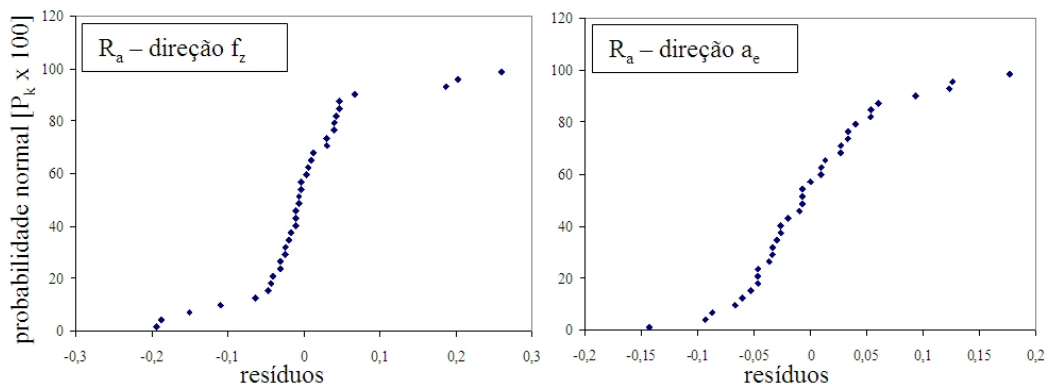


Figura 91- Gráfico de distribuição normal de resíduos para o parâmetro R_a

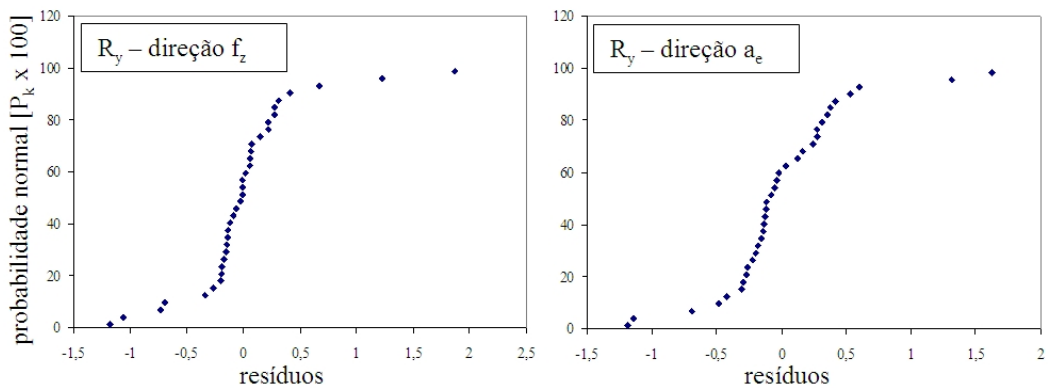


Figura 92- Gráfico de distribuição normal de resíduos para o parâmetro R_y

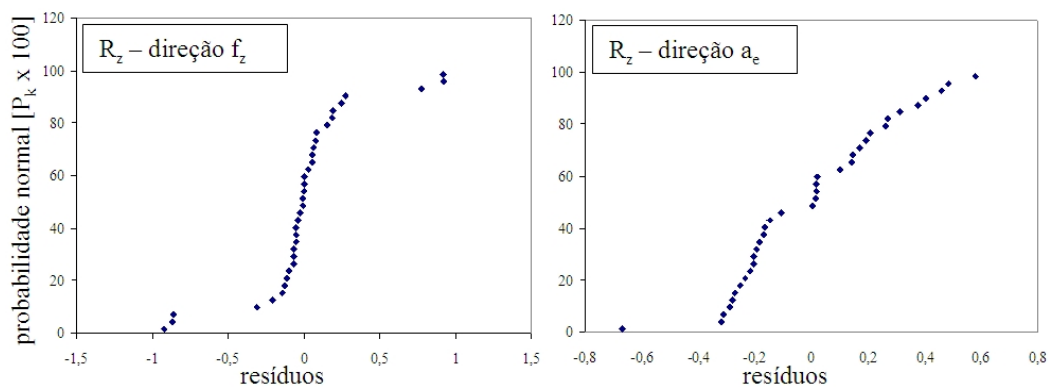


Figura 93- Gráfico de distribuição normal de resíduos para o parâmetro R_z

As Tabela 18 a Tabela 23, agrupam as grandezas calculadas para a ANOVA. Trazem também o valor F obtido da tabela de distribuição normal F para 99 % de confiança, tido como valor crítico que define a linha de rejeição da hipótese nula. O valor F_o calculado é confrontado com o valor tabelado F .

Tabela 18- Grandezas e resultados ANOVA para o parâmetro R_a na direção de f_z

| Fonte de Variação | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática | F_o calculado | $F_{0,99;11;24}$ tabelado |
|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|
| Estratégia | 2.20 | 11 | 0.20 | 17.10 | 3.10 |
| Erro | 0.28 | 24 | 0.01 | $F_o > F$: rejeita-se H_o | |
| Total | 2.48 | 35 | 0.07 | | |

Tabela 19- Grandezas e resultados ANOVA para o parâmetro R_a na direção de a_e

| Fonte de Variação | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática | F_o calculado | $F_{0,99;11;24}$ tabelado |
|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|
| Estratégia | 1.02 | 11 | 0.09 | 15.14 | 3.10 |
| Erro | 0.15 | 24 | 0.01 | $F_o > F$: rejeita-se H_o | |
| Total | 1.17 | 35 | 0.03 | | |

Tabela 20- Grandezas e resultados ANOVA para o parâmetro R_y na direção de f_z

| Fonte de Variação | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática | F_o calculado | $F_{0,99;11;24}$ tabelado |
|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|
| Estratégia | 124.92 | 11 | 11.36 | 27.32 | 3.10 |
| Erro | 9.98 | 24 | 0.42 | $F_o > F$: rejeita-se H_o | |
| Total | 134.89 | 35 | 3.85 | | |

Tabela 21- Grandezas e resultados ANOVA para o parâmetro R_y na direção de a_e

| Fonte de Variação | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática | F_o calculado | $F_{0,99;11;24}$ tabelado |
|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|
| Estratégia | 68.77 | 11 | 6.25 | 15.04 | 3.10 |
| Erro | 9.97 | 24 | 0.42 | $F_o > F$: rejeita-se H_o | |
| Total | 78.74 | 35 | 2.25 | | |

Tabela 22- Grandezas e resultados ANOVA para o parâmetro R_z na direção de f_z

| Fonte de Variação | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática | F_o calculado | $F_{0,99;11;24}$ tabelado |
|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|
| Estratégia | 88.44 | 11 | 8.04 | 37.67 | 3.10 |
| Erro | 5.12 | 24 | 0.21 | $F_o > F$: rejeita-se H_o | |
| Total | 93.56 | 35 | 2.67 | | |

Tabela 23- Grandezas e resultados ANOVA para o parâmetro R_z na direção de a_e

| Fonte de Variação | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática | F_o calculado | $F_{0,99;11;24}$ tabelado |
|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|
| Estratégia | 38.52 | 11 | 3.50 | 30.19 | 3.10 |
| Erro | 2.78 | 24 | 0.12 | $F_o > F$: rejeita-se H_o | |
| Total | 41.30 | 35 | 1.18 | | |

Os resultados do comparativo das médias entre os tratamentos avaliados (estratégia de usinagem) para o emprego do método da mínima diferença significativa MDS, estão expressos nas Tabela 24 a Tabela 29. As tabelas trazem o valor tabelado t , extraído da tabela de distribuição de probabilidade t para 99 % de confiança e o valor MDS calculado.

Tabela 24- Valores de MDS para o parâmetro R_a na direção de f_z

| | | |
|-------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Confiança : 99% | | $t_{0,005;24} =$ 2.797 |
| Estatística de Teste : | | MDS = 0.247 |
| Comparativo de Médias | Resultado | Significante |
| / HS - HD / | 0.014 | NÃO |
| / HS - VS / | 0.588 | SIM |
| / HS - VD / | 0.047 | NÃO |
| / HD - VS / | 0.573 | SIM |
| / HD - VD / | 0.032 | NÃO |
| / VS - VD / | 0.541 | SIM |

Tabela 25- Valores de MDS para o parâmetro R_a na direção de a_e

| | | |
|-------------------------------|------------------|------------------------|
| Confiança : 99% | | $t_{0,005;24} = 2.797$ |
| Estatística de Teste : | | MDS = 0.179 |
| Comparativo de Médias | Resultado | Significante |
| / HS - HD / | 0.034 | NÃO |
| / HS - VS / | 0.390 | SIM |
| / HS - VD / | 0.012 | NÃO |
| / HD - VS / | 0.356 | SIM |
| / HD - VD / | 0.047 | NÃO |
| / VS - VD / | 0.402 | SIM |

Tabela 26- Valores de MDS para o parâmetro R_y na direção de f_z

| | | |
|-------------------------------|------------------|------------------------|
| Confiança : 99% | | $t_{0,005;24} = 2.797$ |
| Estatística de Teste : | | MDS = 1.472 |
| Comparativo de Médias | Resultado | Significante |
| / HS - HD / | 0.053 | NÃO |
| / HS - VS / | 4.262 | SIM |
| / HS - VD / | 0.149 | NÃO |
| / HD - VS / | 4.316 | SIM |
| / HD - VD / | 0.202 | NÃO |
| / VS - VD / | 4.113 | SIM |

Tabela 27- Valores de MDS para o parâmetro R_y na direção de a_e

| | | |
|-------------------------------|------------------|------------------------|
| Confiança : 99% | | $t_{0,005;24} = 2.797$ |
| Estatística de Teste : | | MDS = 1.472 |
| Comparativo de Médias | Resultado | Significante |
| / HS - HD / | 0.019 | NÃO |
| / HS - VS / | 3.096 | SIM |
| / HS - VD / | 0.208 | NÃO |
| / HD - VS / | 3.114 | SIM |
| / HD - VD / | 0.189 | NÃO |
| / VS - VD / | 3.303 | SIM |

Tabela 28- Valores de MDS para o parâmetro R_z na direção de f_z

| | | |
|-------------------------------|------------------|------------------------|
| Confiança : 99% | | $t_{0,005;24} = 2.797$ |
| Estatística de Teste : | | MDS = 1.055 |
| Comparativo de Médias | Resultado | Significante |
| / HS - HD / | 0.013 | NÃO |
| / HS - VS / | 3.650 | SIM |
| / HS - VD / | 0.220 | NÃO |
| / HD - VS / | 3.663 | SIM |
| / HD - VD / | 0.233 | NÃO |
| / VS - VD / | 3.430 | SIM |

Tabela 29- Valores de MDS para o parâmetro R_z na direção de a_e

| | | |
|-------------------------------|------------------|------------------------|
| Confiança : 99% | | $t_{0,005;24} = 2.797$ |
| Estatística de Teste : | | MDS = 0.778 |
| Comparativo de Médias | Resultado | Significante |
| / HS - HD / | 0.043 | NÃO |
| / HS - VS / | 2.287 | SIM |
| / HS - VD / | 0.259 | NÃO |
| / HD - VS / | 2.243 | SIM |
| / HD - VD / | 0.302 | NÃO |
| / VS - VD / | 2.546 | SIM |

