UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA CAPABILIDADE DE CONTROLE DE SUPERFÍCIES TÉCNICAS USINADAS EM TORNO DE ULTRAPRECISÃO

ROSANA CAMARGO
Mestre em Engenharia Mecânica
Engenheira Mecânica

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço 03/01/06
Ass.:

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

EESC • USP
Biblioteca
CAMPUS DE S. CARLOS

Orientador: Prof. Assoc. **Jaime Gilberto Duduch**

São Carlos
-2005-

DEDALUS - Acervo - EESC
31100053664

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Tecnólogo **ROSANA CAMARGO**

Tese defendida e julgada em 21-11-2005 perante a Comissão Julgadora:

APROVADA

Prof. Associado **JAIME GILBERTO DUDUCH (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Associado **RENATO GOULART JASINEVICIUS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Dr. **MARCELO DE ASSUMPÇÃO PEREIRA DA SILVA**
(Instituto de Física de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Dr. **EDUARDO CARLOS BIANCHI**
(UNESP/Bauru)

APROVADA

Prof. Dr. **PAULO ALBERTO SILVEIRA WREGE**
(FATEC/Sorocaba)

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho a Walter Link

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Assoc. Jaime Gilberto Duduch, pela amizade, oportunidade e orientação.

Ao prof. Assoc. Renato Goulart Jasinevicius, pelas sugestões e orientações técnicas para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao meu grande amigo, prof. Dr. Walter Link, pela força, carinho e amizade ao estar ou se fazer presente nas horas difíceis, e por todas as orientações técnicas.

Por disponibilizar equipamento para a confecção deste trabalho:

À Empresa Taylor e Robsom, em especial ao Gerente de vendas, Eng. Marcello Montagnani;

À Empresa Mitutoyo Sul Americana, em especial a Tatiana Dias Santana;

À Embrapa – Instrumentação Agrícola – de São Carlos, em especial ao Dr. Rubens Bernardes Filho;

Ao Instituto de Química de São Carlos, em especial ao prof. Dr. Sergio Antonio Espínola Machado e a sua orientanda Sonia Tanimoto;

Ao Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação do Núcleo de Manufatura Avançada da USP de São Carlos, em especial ao Dinho e

À Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP – , em especial ao prof. Walter de Melo.

À Empresa NT-MDT – Molecular Devices and Tools for Nano Technology – , em especial à senhora Maria Ovcharenko, por fornecer pontas modo contato para o aparelho AFM.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de São Paulo – CEFET-SP – , aos alunos, amigos e colegas que lá possuo, os quais, de forma direta ou indireta, contribuíram para a confecção deste trabalho.

À Secretaria de Pós-Graduação, em especial a Ana Paula Bueno Bardelotty, sempre muito atenciosa e a Elisabeth Maria Alves Alexandre, pela amizade e apoio.

Ao meu amigo, prof. Josimar Nunes de Oliveira, pela sua amizade, paciência e socorros prestados sempre que o meu computador resolvia fazer greve.

Ao Mestre José Cláudio P. Azevedo, pela amizade, dedicação e carinho.

À minha amiga profª. Elaine Skorzensk G. dos Santos, pelas contribuições técnicas, amizade, paciência e companheirismo.

Ao meu irmão e amigo, Reginaldo Camargo, sua esposa Miriam Regina Davoli e sua filha Juliana Davoli Camargo, pela amizade, carinho e por existirem.

À minha mãe, Antonia Ribeiro Camargo, pela força, carinho, apoio constante e porque ela existe.

Ao meu pai Aristides Camargo(falecido).

A Deus, pela vida e pela força.

Sumário

LISTA DE FIGURAS v

LISTA DE TABELAS xi

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS xiii

LISTA DE SIMBOLOS xv

RESUMO xvi

ABSTRACT xviii

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 01

1.1. Justificativa 04

1.2. Objetivo 05

CAPÍTULO 2 - USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO 06

2.1. Ferramenta de Corte de Diamante 11

2.1.1. Características da Ferramenta de Corte de Diamante 12

2.1.1.1. Lapidação da Ferramenta de Corte de Diamante 13

2.1.2. Geometria da Ferramenta 15

2.2. Material da Peça a ser Usinada 17

2.2.1. Metais não Ferrosos 22

2.2.2. Materiais Frágeis 22

2.2.3. Aço 24

2.3. Velocidade de Corte (Vc) 24

2.4. Profundidade da Usinagem de corte 25

CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE DE ULTRAPRECISÃO 26

3.1. Fundamentos Teóricos sobre o Conceito de Rugosidade Superficial 27

3.1.1. Sistemas de Medição da Rugosidade 29

3.1.1.1. Sistema "M" ou da Linha Média 31

3.1.2. Parâmetros Ra e Rz de Medição da Rugosidade, Baseados na Linha Média "M" 35

3.1.2.1. Desvio Médio Aritmético ou Rugosidade Média (Ra) 35

3.1.2.2. Rugosidade Média (Rz) 37

3.1.3. Medição da Rugosidade 39

3.1.3.1. Medição da Rugosidade Com Contato 42

3.1.3.2. Medição da Rugosidade Sem Contato 52

3.2. Influências Metalúrgicas e Mecânicas na Integridade da Superfície 54

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO LIMITE DA EXATIDÃO DA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL, EM PEÇAS USINADAS EM TORNO DE ULTRAPRECISÃO, COM FERRAMENTA DE DIAMANTE MONOCRISTALINO 56

4.1. Geração da Peça 58

4.1.1. Máquina-Ferramenta 59

4.1.2. Ferramenta de Corte 60

4.1.3. Material da Peça 60

4.1.4. Imagem Fotográfica da Superfície da Peça 63

4.2. Caracterização da Rugosidade Superficial 63

4.2.1. Medição da Rugosidade Superficial com o Perfilômetro Mecânico (PM) 64

4.2.2. Medição da Rugosidade Superficial por Interferometria Óptica (IO) 65

4.2.3. Medição da Rugosidade Superficial com AFM 66

4.2.4. Alcance versus Resolução dos Três Equipamentos 67

4.3. Função da Superfície 68

CAPÍTULO 5 - DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA PROPOSTA 70

5.1. Peça 1 73

5.1.1. Imagens Fotográficas das Superfícies da Peça Usinada 73

5.1.2. Resultados das Medições da Rugosidade com o Aparelho PM, Medição Mecânica por Contato 75

5.1.3. Resultados das Medições da Rugosidade com os Aparelhos TE e TD, Microscópios de Força Atômica (modo contato) 76

5.1.4. Resultados das Medições da Rugosidade com o Aparelho IO, Medição por Interferometria óptica, sem Contato 79

5.2. Peça 2 85

5.2.1. Imagens Fotográficas das Superfícies da Peça Usinada 85

5.2.2. Resultados das Medições da Rugosidade com o Aparelho PM, Medição Mecânica por Contato 85

5.2.3. Resultados das Medições da Rugosidade com os Aparelhos TE e TD, Microscópios de Força Atômica (modo contato) 85

5.2.4. Resultados das Medições da Rugosidade com o Aparelho IO, Medição por Interferometria Óptica, Sem Contato 86

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS 94

6.1. Análise dos Resultados das Medições Efetuadas na Peça 1 94

6.1.1. Avaliação das Imagens Obtidas pelo Microscópio Vertical 94

6.1.2. Avaliação das Medições da Rugosidade Obtida com o Instrumento PM 94

6.1.3 – Avaliação das Medições da Rugosidade Obtida com Contato 96

6.1.4. Avaliação das Medições de Rugosidade Obtidas com o IO 100

6.1.5. Avaliação Através da Comparação dos Resultados Obtidos entre os Quatros Aparelhos... 102

6.1.6. Avaliação Através da Comparação dos dados Técnicos entre os Três Aparelhos 106

6.2. Análise dos Resultados das Medições Efetuadas na Peça 2 107

6.2.1. Avaliação das Medições da Rugosidade Obtidas com os Instrumentos PM e IO 107

6.2.2. Cálculo da Incerteza dos Resultados das Medições de Ra Realizadas com os Instrumentos PM e IO 110

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES 114

7.1. O que controlar 115

7.2. Como Controlar 115

7.2.1. Perfilômetro Mecânico (PM) 115

7.2.2. Microscópio de Força Atômica (AFM) 116

7.2.3. Interferometria Óptica (IO) 116

7.3. Qual o Equipamento mais Adequado para se Realizar esse Controle 117

7.4. Conclusões sobre a Incerteza do Resultado da Medição 117

7.5. Comentário Final 118

CAPÍTULO 8 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 118

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 119

BIBLIOGRAFIA 128

APÊNDICE I – Metais de Transição 130

APÊNDICE II – Avaliação das Incertezas das Medições 130

APÊNDICE III – Tabela das Medições Realizadas com o PM 139

APÊNDICE IV – Tabela das Medições Realizadas com IO 141

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - O desenvolvimento da exatidão da usinagem de ultraprecisão (TANIGUCHI,1983) 09

FIGURA 2.2 - Aresta de corte da ferramenta de diamante 11

FIGURA 2.3 - Símbolos que representam os planos cristalográficos do diamante (YUAN, 2003) 14

FIGURA 2.4 - Planos cristalográficos em diamante octaedro (YUAN, 2003) 14

FIGURA 2.5 - Influência de θ no processo de lapidação (YUAN, 2003) 15

FIGURA 2.6 - Geometria da ferramenta (PORTO, 2004) 16

FIGURA 2.7 - (a) Perfil ideal, (b) Perfil real (TO et al, 2001) 20

FIGURA 2.8 - Imagem topográfica 21

FIGURA 2.9 -Gráfico do perfil medido 21

FIGURA 2.10 - Gráfico espectral 21

FIGURA 2.11 - Influência da velocidade de corte na avaliação da rugosidade do cobre (KÖNIG, 1991) 25

FIGURA 3.1 - Rugosidade e ondulação (BUSCH, 1989) 28

FIGURA 3.2 - Medição de rugosidade (Ra) 29

FIGURA 3.3 - Sistema "M" ou da linha média 31

FIGURA 3.4 - Linha média e comprimento de amostragem 32

FIGURA 3.5 - Percurso de apalpamento e de medição (GONZÁLEZ, 1995) 32

FIGURA 3.6 - Desvio médio aritmético, Ra (HIPÓLITO, 2005) 35

FIGURA 3.7 - Rugosidade média Rz (GONZÁLEZ, 1995) 37

FIGURA 3.8 - Diagrama do comprimento de onda x amplitude (cortesia do PTB in DE CHIFFE et al, 2003) 41

FIGURA 3.9 - Representação esquemática de um PM (NBR ISO 3274:2003) 42

FIGURA 3.10 - Ciclo de medição de um PM (NBR iso 3274:2003) 43

FIGURA 3.11 - Superfície marcada pelo apalpador de um PM (imagem adquirida com AFM) 44

FIGURA 3.12 - (a) ponta cônica com PM (b) sonda cilíndrica (LONARDO, 2002) 45

FIGURA 3.13 - Raio de incidência obliquo, formado pelo apalpador e a normal a superfície, não detectam parte do perfil (LONARDO, 2002) 46

FIGURA 3.14 - Efeitos da forma e tamanho do apalpador na medição (LEACH & HART, 2001) 46

FIGURA 3.15 - Sonda do AFM e do STM (SBPC, 2005) 48

FIGURA 3.16 - Propriedades mecânicas das hastes de AFM, que podem ser em forma de "V" (a), ou em forma de "I" (retangular) (b), com a ponta de prova no lado de baixo, na extremidade da haste (HERRMANN et al, 2005) 49

FIGURA 3.17 - Deflexão da haste devido a força de interação entre os átomos do apalpador e da superfície da peça (HERRMANN et al, 2005) 50

FIGURA 3.18 - Diagrama ilustrativo de um AFM operando no modo contato (HERRMANN et al, 2005) 51

FIGURA 3.19 - Agulha do AFM contendo o DNA de um cromossomo (HERRMANN et al, 2005). 52

FIGURA 3.20 - Esquema do funcionamento do TalySurf CCI 3000 (catálogo da Taylor & Robson) 54

FIGURA 3.21 - Imagem feita com Microscópio óptico com contraste de interferência Normarski, de uma amostra de cobre após ataque químico 55

FIGURA 4.1 - Diagrama conceitual de um sistema de usinagem com torneamento de ultraprecisão com diamante 57

FIGURA 4.2 - Diagrama de causa e efeito 58

FIGURA 4.3 - Geradora de superfícies anesféricas, ASG 2500 da Taylor Hobson Pneumo 59

FIGURA 4.4 - Corpo de prova de cobre 61

FIGURA 4.5 - Vista superior da peça usinada, mostrando os 12 setores 61

FIGURA 4.6 - Microscópio vertical, modelo Axiotech Hal 100, da Carl Zeiss 63

FIGURA 4.7 - Rugosímetro SV-C500, da Mitutoyo 64

FIGURA 4.8 - TalySurf CCI 3000 65

FIGURA 4.9 - Topometrix, modelo Discovery TMX 2010 67

FIGURA 4.10 - Diagrama do alcance x resolução 68

FIGURA 5.1 - Foto do setor 1 71

FIGURA 5.2 - Foto do setor 2 71

FIGURA 5.3 - Foto do setor 3 71

FIGURA 5.4 - Foto do setor 4 71

FIGURA 5.5 - Foto do setor 5 72

FIGURA 5.6 - Foto do setor 6 72

FIGURA 5.7 - Foto do setor 7 72

FIGURA 5.8 - Foto do setor 8 72

FIGURA 5.9 - Foto do setor 9 72

FIGURA 5.10 - Foto do setor 10 72

FIGURA 5.11 - Foto do setor 11 73

FIGURA 5.12 - Foto do setor 12 73

FIGURA 5.13 – Imagem do setor 1 75

FIGURA 5.14 – Imagem do setor 2 75

FIGURA 5.15 – Imagem do setor 3 75

FIGURA 5.16 – Imagem do setor 4 75

FIGURA 5.17 – Imagem do setor 5 76

FIGURA 5.18 – Imagem do setor 6 76

FIGURA 5.19 – Imagem do setor 7 76
FIGURA 5.20 – Imagem do setor 8 76
FIGURA 5.21 – Imagem do setor 9 76
FIGURA 5.22 – Imagem do setor 10 76
FIGURA 5.23 – Imagem do setor 11 77
FIGURA 5.24 – Imagem do setor 12 77
FIGURA 5.25 – Rugosidade do setor 1 79
FIGURA 5.26 – Rugosidade do setor 2 79
FIGURA 5.27 – Rugosidade do setor 3 79
FIGURA 5.28 – Rugosidade do setor 4 79
FIGURA 5.29 – Rugosidade do setor 5 80
FIGURA 5.30 – Rugosidade do setor 6 80
FIGURA 5.31 – Rugosidade do setor 7 80
FIGURA 5.32 – Rugosidade do setor 8 80
FIGURA 5.33 – Rugosidade do setor 9 81
FIGURA 5.34 – Rugosidade do setor 10 81
FIGURA 5.35 – Rugosidade do setor 11 81
FIGURA 5.36 – Rugosidade do setor 12 81
FIGURA 5.37 – Superfície topográfica do setor 1 82
FIGURA 5.38 – Superfície topográfica do setor 2 82
FIGURA 5.39 – Superfície topográfica do setor 3 82
FIGURA 5.40 – Superfície topográfica do setor 4 82
FIGURA 5.41 – Superfície topográfica do setor 5 83
FIGURA 5.42 – Superfície topográfica do setor 6 83
FIGURA 5.43 – Superfície topográfica do setor 7 83

FIGURA 5.44 – Superfície topográfica do setor 8 83

FIGURA 5.45 – Superfície topográfica do setor 9 84

FIGURA 5.46 – Superfície topográfica do setor 10 84

FIGURA 5.47– Superfície topográfica do setor 11 84

FIGURA 5.48 – Superfície topográfica do setor 12 84

FIGURA 5.49 – Rugosidade Ra do setor 1 86

FIGURA 5.50 – Rugosidade Ra do setor 2 87

FIGURA 5.51 – Rugosidade Ra do setor 3 87

FIGURA 5.52 – Rugosidade Ra do setor 4 87

FIGURA 5.53 – Rugosidade Ra do setor 5 87

FIGURA 5.54 – Rugosidade Ra do setor 6 88

FIGURA 5.55 – Rugosidade Ra do setor 7 88

FIGURA 5.56 – Rugosidade Ra do setor 8 88

FIGURA 5.57 – Rugosidade Ra do setor 9 88

FIGURA 5.58 – Rugosidade Ra do setor 10 89

FIGURA 5.59 – Rugosidade Ra do setor 11 89

FIGURA 5.60 – Rugosidade Ra do setor 12 89

FIGURA 5.61 – Imagem topográfica do setor 1 89

FIGURA 5.62 – Imagem topográfica do setor 2 90

FIGURA 5.63 – Imagem topográfica do setor 3 90

FIGURA 5.64 – Imagem topográfica do setor 4 90

FIGURA 5.65 – Imagem topográfica do setor 5 91

FIGURA 5.66 – Imagem topográfica do setor 6 91

FIGURA 5.67 – Imagem topográfica do setor 7 91

FIGURA 5.68 – Imagem topográfica do setor 8 92

FIGURA 5.69 – Imagem topográfica do setor 9 92

FIGURA 5.70 – Imagem topográfica do setor 10 92

FIGURA 5.71 – Imagem topográfica do setor 11 93

FIGURA 5.72 – Imagem topográfica do setor 12 93

FIGURA 6.1 – Comparação entre os valores de Ra e Rz, obtidos com o PM 95

FIGURA 6.2 – Imagem do setor 5 (TE) 95

FIGURA 6.3 – Comparação entre os valores de Ra e Rz obtidos com o TE 96

FIGURA 6.4 – Comparação entre os valores de Ra (TE) e Ra (PM), com os valores dos setores 5, 6 e 8 rechaçados 97

FIGURA 6.5 - Comparação entre os valores de Rz (TE) e Rz (PM), com os valores dos setores 5, 6 e 8 rechaçados 98

FIGURA 6.6 – Comparação entre os valores de Rz (TE) e RZ(PM), com os valores dos setores 5, 6 e 8 rechaçados 98

FIGURA 6.7 – Comparação entre as linhas de tendência dos valores de Rz 99

FIGURA 6.8 – Avaliação da medições de Rugosidade obtidas com o IO 100

FIGURA 6.9 – Imagem topográfica do setor 7 101

FIGURA 6.10 – Gráficos das medições efetuadas no setor 7 101

FIGURA 6.11 – Imagem topográfica do setor 8 102

FIGURA 6.12 – Gráfico da medição de Ra efetuadas no setor 8 102

FIGURA 6.13 – Comparação entre os valores de Ra obtidos com os três aparelhos 104

FIGURA 6.14 – Comparação entre os valores de Rz obtidos com os três aparelhos 104

FIGURA 6.15 – Valores de Ra e parâmetros de usinagem 105

FIGURA 6.16 – Valores de Rz e parâmetros de usinagem 105

FIGURA 6.17 – Imagens topográficas do setor 4 108

FIGURA 6.18 – Imagens topográficas do setor 12 108

FIGURA 6.19 – Valores de Ra e parâmetros de usinagem 109

FIGURA 6.20 – Diagrama de causa e efeito para a medição de rugosidade..... 110

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Campo e aplicação, materiais e especificações para tecnologia de torneamento com diamante 8

TABELA 2.2 – Geometria da ferramenta, para metais não ferrosos 17

TABELA 2.3 – Materiais utilizados na usinagem de ultraprecisão 20

TABELA 2.4 – Parâmetros de corte para metais não ferrosos 23

TABELA 3.1 – OS Parâmetros mais utilizados em diferentes países 31

TABELA 3.2 – Comprimento de amostragem e avaliação para medição em Ra 34

TABELA 3.3. – Comprimento de amostragem e avaliação para medição em Rz 34

TABELA 3.4 – Valor do *cut-off* 35

TABELA 3.5 – Valor do *cut-off* 35

TABELA 3.6 – Valores de Ra 37

TABELA 4.1 – Características geométricas da ferramenta de diamante monocristalino 60

TABELA 4.2 – Parâmetros de usinagem da peça 1 62

TABELA 4.3 – Parâmetros de usinagem da peça 2 62

TABELA 4.4 – Especificações do rugosimetro SV-C500 65

TABELA 4.5 – Especificações técnicas do TalySurf CCI 3000 66

TABELA 4.6 – Características do topometrix TMX 2010 e Explorer 67

TABELA 4.7 – Exigências de qualidade de componentes para aplicações ópticas 69

TABELA 5.1 – Valores de Ra em nm 73

TABELA 5.2 – Valores de Rz em nm 74

TABELA 5.3 – Valores de Ra e Rz obtidos com o TE..... 75

TABELA 5.4 – Valores de Ra com o TD..... 77

TABELA 5.5 – Valores de Ra e Rz em nm..... 77

TABELA 5.6 – Valores de Ra em nm..... 85

TABELA 5.7 – Valores de Ra em nm..... 85

TABELA 6.1 – Valor de Rc em função do número de medições efetuadas..... 97

TABELA 6.2 – Valor de Ra em nm, efetuados com o TE..... 97

TABELA 6.3 – Valor de Ra obtidos com os 4 aparelhos- peça 1..... 103

TABELA 6.4 – Valor de Rz obtidos com os 4 aparelhos- peça 1 103

TABELA 6.5 – Especificações técnicas aplicadas durante as medições..... 106

TABELA 6.6 – Valores de Ra e parâmetros de usinagem..... 107

TABELA 6.7 – Valor de Rz e parâmetros de usinagem..... 109

TABELA 6.8 – Valores da rugosidade Ra em nm..... 110

TABELA 6.9 – Cálculo da incerteza do resultado da medição, com o IO, no setor 7..... 111

TABELA 6.10 – Cálculo da incerteza do resultado da medição, com o IO, no setor 10..... 111

TABELA 6.11 – Cálculo da incerteza do resultado da medição, com o PM, no setor 7..... 111

TABELA 6.12 – Cálculo da incerteza do resultado da medição, com o PM, no setor 10..... 111

Lista de Abreviaturas e Siglas

AA – *Arithmetic average*

Ai – Área inferior

As – Área superior

ap – Profundidade de corte

AFM – *Atomic Force Microscopy*

CD – *Compact disk*

CLA – CenterLine Average

Cut-off – Comprimento de amostragem

ddp – Diferença de potencial

DNA – Ácido Desoxirribonucleico

Do – Profundidade da marca da ferramenta na superfície ideal

Ds – Profundidade da marca da ferramenta após a usinagem

E – Sistema da envolvente

f – Avanço

HSC – *High Spot Count*

IO – Interferômetro óptico

ISO – International Organization for Standardization

Pc – *Peak Count*

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

Le – Comprimento de amostragem

Lm – Percurso de medição

Ln – Trecho final

Lt - Percurso total de apalpamento

Lv – Trecho inicial

M – Sistema da linha média

N – Normal

NBR – Norma Brasileira

nm – Nanometro

PM – Perfilômetro mecânico

R – Retangular

Ra – Rugosidade média

Rku – *Kurtosis*

RMS – *Root mean square*

Rq – Rugosidade média quadrática

Rsk – *Skwwness*

Rt – Rugosidade da altura total

Ry – *None Standard*

Rz – Rugosidade da máxima altura

Sm – *Mean Spacing*

SEM– *Scanning electronic microscopy*

SPM – *Scanning probe microscopy*

STM – *Scanning tunneling microscopy*

TD – Topometrix, modelo Discovery

TE – Topometrix, modelo Explorer

U – Incerteza expandida

USA – *United States of America*

Wo – Largura da marca da ferramenta na superfície ideal

Ws – Largura da marca da ferramenta após a usinagem

Z – Rugosidade parcial

3D – Tri-dimensional

2D – Bi-dimensional

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado	Unidade
θ	Ângulo entre a superfície e o plano de clivagem	graus
r	Raio de ponta da ferramenta	mm
r_ε	Raio de ponta da ferramenta	mm
α	Ângulo de folga	graus
α_2	Ângulo de folga extra	graus
ε	Ângulo de ponta da ferramenta	
γ	Ângulo de saída	graus
λ	comprimento de onda	nm

Resumo

CAMARGO, R.(2005). *Metodologia para avaliação da capabilidade de controle de superfícies técnicas usinadas em torno de ultraprecisão*. 118p. Tese (Doutorado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A nonotecnologia não é mais um sonho, já faz parte da nossa realidade, do nosso dia a dia. É considerada, por muitos, a 5ª. Revolução Industrial, uma revolução tecnológica de grande abrangência, que poderá causar impactos talvez sem precedentes na história. A soma anual dos investimentos nesta nova tecnologia é de bilhões de dólares. Devido às inovações oriundas da nanotecnologia, os processos da manufatura e a medição de ultra-precisão vêm se desenvolvendo a cada dia. A nonotecnologia fez da usinagem de ultraprecisão com ferramenta de diamante uma grande aplicação na produção de itens de alto volume, tais como: disco de memória de computadores, lentes de contato, moldes de dentes, cilindros para impressão, espelhos metálicos. A alta integridade da superfície é requerida em todos os itens obtidos por este processo. Em conseqüência, é necessário um método de medição que seja o mais exato possível, isto é, que chegue a resultados o mais próximo possível do valor verdadeiro. Mas o que significa exatidão para uma análise ideal da superfície, uma vez que não existe referência para isso? Superfícies têm sido avaliadas por meio da medição da rugosidade, a qual consiste na determinação de um valor médio, de vários setores, dentro de valores limites preestabelecidos. A metrologia, através de seus métodos e princípios, é um importante instrumento para validar modelos e teorias. O conceito que "uma vez testado, passa a ser aceito em qualquer lugar". Daí a crescente necessidade de resultados de medições confiáveis que possam ser validados em qualquer lugar e a qualquer tempo. Assim, um caminho a ser seguido é o de se entenderem profundamente todos os métodos e princípios envolvidos nas operações de medição de rugosidade. E para que um método seja "metrologicamente válido" (ou aceitável), faz-se necessário realizarem-se comparações de diversas medições, de um mesmo mensurando, utilizando métodos diversos. Havendo discrepância nos resultados, é uma evidência de que as premissas e hipóteses levaram a acreditar que a teoria ou modelo adotado deve ser reavaliado. Este trabalho selecionou os três métodos mais utilizados na caracterização da integridade de superfícies técnicas obtida em torneamento de ultraprecisão com diamante, e

descreveu uma metodologia para a avaliação da capabilidade do processo de controle de superfícies técnicas usinadas em torno de ultraprecisão.

Palavras-chaves: usinagem de ultraprecisão, torneamento com diamante, rugosidade superficial.

Abstract

CAMARGO, R.(2005). *Methodology to assess the capability of the control technical surfaces in ultraprecision turning manufacturing*. 118p. Ph.D. Thesis – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Nanotechnology is no longer a dream. It is part of the real world. It is considered by many people as the 5th Industrial Revolution, a technological revolution of great impact in history. The world annual investment in this technology reaches billions of dollars. Due to innovations related to nanotechnology, ultraprecision manufacturing processes and metrology is developing steeply. Nanotechnology made single point diamond turning an important mass production process of, for instance, computer hard discs, contact lenses, moulds, printer cylinders, metallic mirrors, etc. High grade surface integrity is required of items produced by this process. As a consequence, it is necessary to use a measurement method which is most accurate as possible, i.e., resulting in a value as close as possible to the true. But what does true mean if there is no reference for that? Surfaces have been assessed by roughness measurements which determines a mean value of several sectors within pre-determined limits. Metrology, with its methods and principles, is an important instrument to validate models and theories. The concept, once tested, becomes accepted everywhere. Therefore the increasing necessity of reliable measurement results which may be validated anywhere and any time. Thus, it is essential a deep understanding of all methods and principles involved in roughness metrology operations. For a method to be metrologically accepted, it is necessary that it is compared with different methods. In the event of existing discrepancies, the premises and hypotheses which fundamented the theory or model should be reassessed. Three of the most used methods have been selected to characterize the surface integrity of technical surfaces generated by diamond turning. A methodology to assess the capability of the process of control of those surfaces is proposed.

Keywords: ultraprecision manufacturing, single point diamond turning, roughness surface.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Ainda era um sonho, quarenta anos atrás, quando cientistas, antes mesmo de desenvolverem instrumentos para ver e manipular átomos individuais, já se perguntavam: o que aconteceria se pudéssemos construir novos materiais, átomo a átomo? Richard Feynman, um dos maiores físicos do século XX, foi um pioneiro. Em 1959, em uma palestra no Instituto de Tecnologia da Califórnia, Feynman sugeriu que, em um futuro não muito distante, os engenheiros poderiam pegar átomos e colocá-los onde bem entendessem, desde que, é claro, não fossem violadas as leis da natureza. Com isso, materiais com propriedades inteiramente novas poderiam ser criados, materiais estes que não aparecem naturalmente, e, assim, não se precisaria aceitar os materiais que a natureza nos apresenta como os únicos possíveis no universo. Ainda nesta palestra, ele menciona que, "para que este sonho se torne realidade, é apenas uma questão de conhecimento e tecnologia". Esta palestra, intitulada "Há muito espaço lá embaixo", é, hoje, tomada como o ponto inicial da nanotecnologia (SILVA, 2002). Porém o termo nanotecnologia foi introduzido pela primeira vez por Taniguchi,, em 1974, em um artigo para a Conferência Internacional de Engenharia de Produção, em Tókio (TANIGUCHI, 1994).

O prefixo "nano" vem do grego e significa "anão". Para se ter uma idéia desta dimensão, basta saber que um nanômetro (1nm), que corresponde a um bilionésimo de metro $\left(10^{-9}m\right)$, é aproximadamente 80.000 vezes menor que a média do diâmetro de um fio de cabelo humano e 10 vezes o diâmetro do átomo de hidrogênio (CORBETT et al, 2000).

A nanotecnologia pode ser considerada uma revolução tecnológica de grande abrangência e impacto talvez sem precedentes na história. Ela é o passo final, ou quase, na busca do homem pelo controle sobre a matéria, o controle de átomo por átomo, molécula por molécula, enfim, a engenharia na escala atômica, a escala última da matéria ordinária. Suas conseqüências serão enormes avanços para o bem- estar material das pessoas e para sua saúde, e redução do impacto da atividade industrial sobre o planeta, tanto pela produção de bens mais duráveis quanto pela maior eficiência na utilização da energia (CHAVES, 2002).

Com base no conhecimento de que a matéria é feita de átomos que se ligam formando moléculas, e que muito já se conhece sobre a forma como átomos ou moléculas se agregam – na linguagem técnica, se condensam – para formar sólidos ou líquidos, foram obtidos importantes avanços na ciência e tecnologia dos materiais. Tal tecnologia permite a produção de cristais sintéticos diversos: de diamantes aos cristais de silício com os quais fabricamos os *chips* dos computadores; materiais magnéticos para gravação e armazenamento de dados; ligas diversas para a indústria mecânica; materiais plásticos e vítreos, e mais uma grande variedade de materiais com propriedades específicas e otimizadas para aplicações industriais diversas. Apesar de esses desenvolvimentos ainda estarem no seu início, em uma fase exploratória, as possibilidades já parecem quase sem limites e a nanotecnologia promete ser uma grande revolução tecnológica (CHAVES, 2002).

Segundo Teixeira (2005), "*engana-se quem pensa que nanotecnologia é coisa para um futuro distante*". Muitos já a consideram como a 5ª. Revolução Industrial. Países desenvolvidos e alguns em desenvolvimento, como a China e a Índia, investiram, no ano de 2004, mais de setenta e cinco bilhões de dólares nessa nova área do conhecimento científico, sendo que a maioria desses recursos foi alocada por empresas e investidores privados. E a previsão para 2015 é superior a um trilhão de euros (NANOTEC, 2005).

Nanotecnologia não é uma tecnologia específica, mas todo um conjunto de técnicas baseadas na física, na química, na biologia, na ciência e engenharia de materiais e na computação, que visam estender a capacidade humana de manipular a matéria até os limites do átomo. As aplicações possíveis incluem: aumentar espetacularmente a capacidade de armazenamento e processamento de dados dos computadores; criar novos mecanismos para entrega de medicamentos, mais seguros e menos prejudiciais ao paciente do que os disponíveis hoje; criar materiais mais leves e mais resistentes do que metais e plásticos, para prédios, automóveis, aviões e muito mais inovações em desenvolvimento ou que ainda não foram sequer imaginadas. Economia de energia, proteção ao meio ambiente, menor uso de matérias-primas escassas são possibilidades muito concretas dos desenvolvimentos em nanotecnologia que estão ocorrendo hoje (SILVA, 2002).

A nanociência e a nanotecnologia visam, respectivamente, à compreensão e controle da matéria na escala nanométrica, concernentes à nanoescala, ou seja, resoluções da ordem de 1 nanômetro. Há quem chame a nanotecnologia de "tecnologia extrema" por causa da teoria da exatidão na fabricação de substâncias, ou melhor, o limite da resolução do comprimento de medição de um sólido, que é a distância entre átomos ou distância "lattice atômica", que está ao redor de 0,3 nanômetros (MAMALIS et al, 2004).

A tecnologia de usinagem de ultraprecisão é uma das propostas da nanotecnologia, a qual tem por objetivo final no processo trabalhar próximo do extremo ou limite máximo, que deve ser da ordem de 1 nanômetro, o que corresponde a algumas distâncias "lattice atômica" (TANIGUCHI, 1994). Atualmente, qualquer toca-disco de CDs é uma prova da verdade do que Feynman dizia. Os materiais empregados na construção dos lasers desses toca-discos não ocorrem naturalmente, mas são fabricados pelo homem, camada atômica sobre camada atômica. Porém estes produtos, "*CD players*", assim como os componentes para aeroespaço e aplicações automotivas, dependem enormemente da alta precisão geométrica da superfície (LUCCA et al, 1998).

Dentre os fatores que contribuem para a geometria da superfície, está a rugosidade, a qual está presente em todas as superfícies obtidas em processos de usinagem. Desde que a rugosidade foi ouvida como um som vindo de um gramofone, sendo a intensidade do som conectada à altura da aspereza, a quantificação do conceito de rugosidade superficial tem recebido enorme atenção da ciência e indústria. A princípio analogicamente, e, nos últimos 30 anos, digitalmente (CHIFFRE et al, 2000). Assim, a natureza da superfície obtida em processos de manufatura tem sido longamente reconhecida e também causado um impacto significante no desempenho do produto (LUCCA et al, 1998).

A rugosidade é parte da constituição da topografia da superfície. Segundo Li et al (2004), "*superfície topográfica são as estruturas residuais microgeométricas de diferentes formas e tamanhos como um resultado do efeito integrado por muitos fatores em processo de manufatura*". Os primeiros a estudarem e analisarem a topografia de superfícies foram Schmalz (1936), Thomas & Whitehouse (1982), Sherrington & Smith (1986). Desde então, em engenharia industrial, a rugosidade superficial tem um grande destaque pela sua importância. Esta importância está ligada ao fato de a rugosidade superficial estar diretamente associada à função da superfície. Também as indústrias automotivas colocam o acabamento das superfícies como chave certa para se obter qualidade óptica (CORBETT et al, 2000).

Assim, pelo desejo de se criarem superfícies de excepcional exatidão e qualidade, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos para um melhor entendimento sobre os efeitos resultantes de um processo de usinagem de ultraprecisão. Afinal, tecnologias em manufatura e medição de ultraprecisão precisam ser desenvolvidas para assegurar que as indústrias obtenham vantagens das inovações nanotecnológicas (SILVA, 2002).

A metrologia é uma das tecnologias de suporte da usinagem de ultraprecisão por possuir instrumentos de medição de rugosidade que permitem a análise da topografia de superfícies com precisão submicrométrica (MONTANARI, 2004). A busca de um método de medição que chegasse a um resultado o mais próximo possível do seu valor verdadeiro levou ao desenvolvimento

de muitas técnicas de medições para aquisição de projetos aperfeiçoados, com métodos de medição mais exatos, coincidindo com o desejo de se obter maior compreensão da relação entre as propriedades e as funções da superfície, comparadas a métodos quantitativos de avaliação. Conseqüentemente, são vários os métodos de medição e controle da rugosidade.

Por esta razão, e em se tratando de nanoescala – um bilionésimo de metro impossível de se visualizar a olho nu – instrumentos especiais foram desenvolvidos. Instrumentos estes que vão desde um instrumento *stylus*, perfilômetro mecânico (PM), que faz medições por apalpação e que tem elementos normalizados pela ISO – um dos motivos que o tornam um dos mais utilizados pelas indústrias –, até um instrumento de visualização e manipulação na escala atômica, o microscópio de força atômica, mais conhecido pela sigla, em inglês, AFM (*Atomic Force Microscopy*).

Porém a interpretação de um dado sobre a textura de superfície requer cuidado especial, ou seja, deve haver um procedimento formal de calibração do instrumento, e que este seja aplicado, para prover confiança no resultado das medições (LEACH & HEART, 2002). O ideal seria um método rápido, fácil e efetivamente barato para checagem do PM, usado rotineiramente nas indústrias. Afinal, nem sempre é possível confiar nos valores especificados pelos fabricantes ou distribuidores (LEACH & HEART, 2001).

A participação deste trabalho nessa evolução tecnológica ocorre pelo desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação da capabilidade de controle de superfícies técnicas usinadas em torno de ultraprecisão. Para tanto, optou-se pela comparação dos resultados obtidos em medição de rugosidade por meios mecânicos, através do PM, com os resultados obtidos com microscópio de força atômica e aparelho interferométrico.

1.1 – Justificativa

Uma vez que é necessária a compreensão da microsuperfície técnica como um importante pré-requisito para assegurar e melhorar a qualidade de produtos e processos na indústria devido à interconexão entre a função e a manufatura da superfície metrológica, é muito importante a análise da relação que há entre a ligação dos desvios da microgeometria, comumente descrita em rugosidade superficial, na conduta funcional e a capabilidade da qualidade do processo (LONARDO, 1996), uma vez que, em ultraprecisão, as dimensões atingem 1μm com resolução da ordem de 1nm. Com estas ordens de magnitude de trabalho, são necessários controle e sistemas de metrologia capazes de garantir tais dimensões com a exatidão desejada (DUDUCH, 1993).

1.2 – Objetivo

O principal objetivo, neste trabalho, é a determinação da capabilidade de avaliar as características da microgeometria das peças produzidas em laboratório de Usinagem de Ultraprecisão e Nanometrologia de Superfícies. Para tanto, o desenvolvimento deste trabalho será apresentado como se segue:

Capítulos 2 e 3 - Apresentação da revisão bibliográfica da literatura pertinente, que aborda os temas *Usinagem de Ultraprecisão e Caracterização da Superfície de Ultraprecisão*, respectivamente.

Capítulo 4 - Apresentação do desenvolvimento da metodologia proposta.

Capítulo 5 - Resultados das medições.

Capítulo 6 - Análise e discussão dos resultados das medições.

Capítulo 7 - Conclusões.

Capítulo 8 - Sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO

A primeira definição de usinagem de ultraprecisão foi descrita como sendo a relação processos / máquinas, com a mais alta possibilidade de exatidão dimensional, alcançada em um determinado ponto no tempo. Depois, sua definição passou a ser a realização da tolerância dimensional da ordem de 0,01μm (10nm) e rugosidade superficial de 0,001μm (1nm). As dimensões produzidas podem ser tão pequenas quanto 1 micrômetro e a resolução e repetibilidade das máquinas utilizadas precisam ser da ordem de 10nm (TANIGUCHI, 1994). Segundo Jasinevicius (1999), "*torneamento de ultraprecisão com diamante é o processo de usinagem que usa uma ferramenta de diamante monocristalino para produzir superfície de acabamento espelhado, com uma máquina-ferramenta especialmente designada com alta rigidez e resolução de posicionamento*".

A importância da fabricação de ultraprecisão tem aumentado a cada dia. Hoje, podem-se encontrar em videocassete *e CD player* componentes usinados com tolerâncias que antes só eram encontradas em equipamentos militares ou em pesquisas. Itens fabricados com ultraprecisão estão se tornando cada vez mais comuns na aplicação diária, tais como lentes esféricas, espelhos de reflexão de alta precisão e outras aplicações ópticas (DORNFELD et al, 2003). O processo de usinagem de ultraprecisão foi estendido para o campo de aplicação de componentes de microusinagem, na produção de moldes para lentes Fresnel e componentes para dispositivo de microfluidos (WEULE et al, 2001).

Assim, a tecnologia de usinagem ultraprecisão é também conhecida como microusinagem, por ser capaz de produzir peças com exatidão submicrométrica, dimensões na ordem de micrômetros e rugosidade na faixa de nanômetros (PAGOTTO, 2004).

O desenvolvimento da micro/nano tecnologia tem se movido muito rapidamente, principalmente pela indústria eletrônica, pelo desejo de produzir *chips* cada vez menores e com maior capacidade. Mas ainda é um desafio para as indústrias o desenvolvimento de novos produtos com novos *designs*. Desafio este que depende da habilidade para ver e usar o que a micro e a nano tecnologia trouxeram com seu desenvolvimento (ALTING et al, 2003).

A comunidade científica está sendo constantemente desafiada na manufatura e capabilidade de usinagem de precisão. Em resposta, uma vez que as características metrológicas e de acabamento estão se tornando cada vez mais críticas, cresce a importância de um melhor desempenho das máquinas-ferramenta (IKAWA et al 1991). Por esta razão, a tecnologia tem se modernizado continuamente para produzir máquinas mais avançadas em termos de precisão e eficiência.

Com o surgimento de novos produtos industriais, a exatidão da superfície acabada tem aumentado constantemente, e a capacidade da usinagem de ultraprecisão estendeu-se com o torneamento com ferramenta de diamante monocortante (VERMEULEN et al, 2000).

O torneamento e a retificação de ultraprecisão foram desenvolvidos a fim de substituir técnicas convencionais, como lapidação e polimento, e a ferramenta de diamante viabiliza a usinagem de muitos materiais com tolerâncias nanométricas (PAGOTTO, 2004).

A superfície de componentes torneados com ferramenta de diamante requer exatidão da forma, do tamanho, da rugosidade, da refletividade e da imagem óptica. Porém, do ponto de vista da indústria de manufatura de componentes de ultraprecisão, estes critérios podem ser reduzidos a rugosidade e exatidão de forma e de tamanho. A tabela 2.1 mostra que a exatidão da superfície em componentes de ultraprecisão depende do campo de aplicação, o qual é bastante variável, e também mostra os materiais utilizados em cada aplicação (KÖNIG et al, 1991).

A capabilidade de máquinas de torneamento com diamante para produzir elementos esféricos tem causado um grande impacto na indústria (DOW et al, 1991). A competição econômica está entre os "usuários" dessas máquinas. Nas últimas duas décadas, o torneamento com ferramenta de diamante tornou-se uma tecnologia relativamente madura, competindo não com outras tecnologias para novos mercados, mas com ela mesma (PAUL et al, 1996).

O gráfico da figura 2.1 mostra como a usinagem de ultraprecisão tem evoluído, passando de uma capabilidade de exatidão micrométrica para a escala nanométrica (TANIGUCHI, 1983 e CORBETT et al, 2000).

Tabela 2.1 – Campo de aplicação, materiais e especificações para tecnologia de torneamento com diamante

	Campo de aplicação	Materiais	Especificações
Refletividade óptica	espelho para impressora laser Máquina copiadora Espelhos de metal para aplicações laser Parabólica	Alumínio Cobre Ouro Níquel Molibdênio bronze	Refletividade > 98% Exatidão de forma 0,2 – 0,01μm Rugosidade Ra ≈ 0,005μm
Transmissão óptica	Lentes de Fresnel Aplicações infravermelha para óptica Lentes para elemento solar Lentes focalizadoras para laser Óptica para *CD-players*	Plásticos ópticos Germanium Silício GaAs ZnSe ZnS	Exatidão de forma 0,2 – 0,01 μm Rugosidade Ra ≤ 0,005μm
Componentes mecânicos	Disco rígido para computador Peças padrão Acelerador articulado para eletrodos Fibras ópticas para conexão	Alumínio Níquel Cobre Bronze	Exatidão de forma 0,2 – 0,01 μm Rugosidade Ra ≤ 0,005μm

Fonte: König et al (1991).

O torneamento com ferramenta de diamante está sendo aplicado a itens de alto volume de produção, tais como: discos de memória de computadores, lentes de contato, moldes de dentes, cilindros para impressão, espelhos metálicos, transdutores, sensores ópticos (DOWN et al, 1991).

Para a fabricação de componentes de elevada precisão de forma e rugosidade na faixa de 10nm Ra, é necessário que os fatores que prejudicam os resultados sejam mínimos, melhorando o desempenho dos vários subsistemas que compõem a máquina-ferramenta (DOWN et al, 1991). A repetição do perfil da ferramenta de corte nos intervalos do avanço por revolução da peça é que forma o perfil da rugosidade superficial. E, na análise da superfície da peça, devem-se levar em

conta vários fatores, ou seja, todos aqueles dominantes presentes na usinagem que possam afetar a rugosidade superficial.

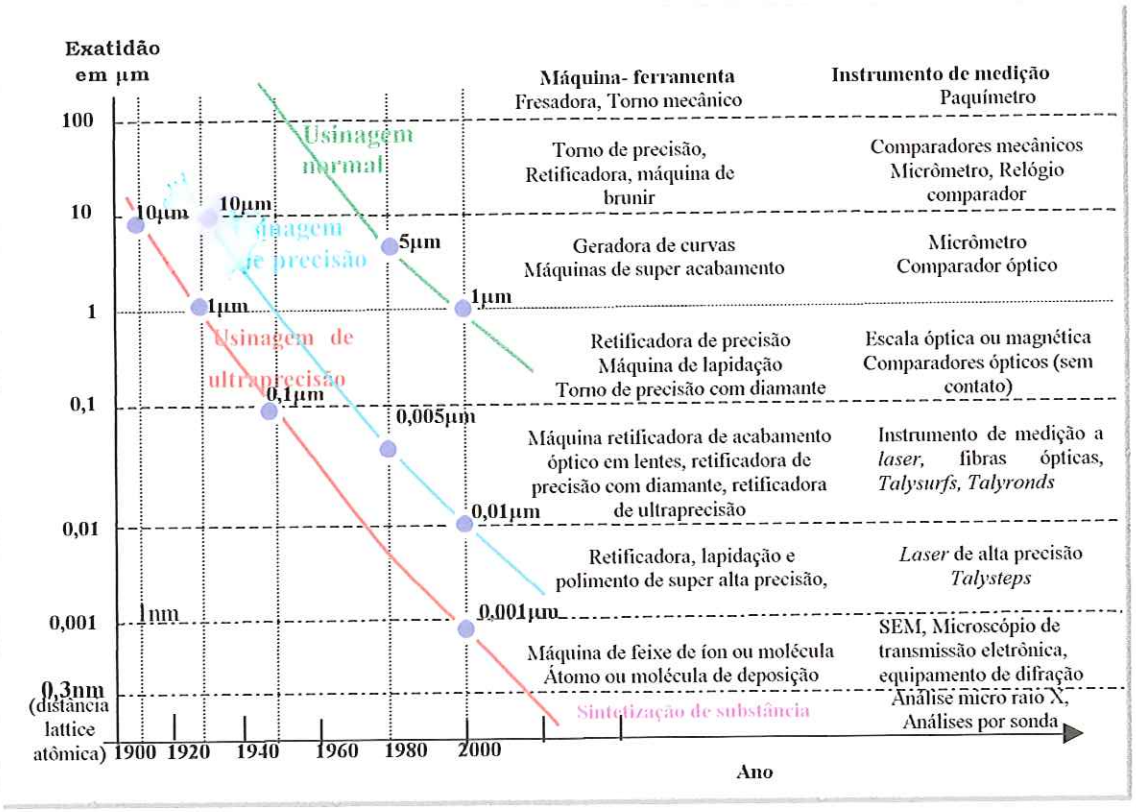

Figura 2.1 – O desenvolvimento da exatidão da usinagem de ultraprecisão (TANIGUCHI, 1983).

Dentre esses fatores, pôde-se destacar a ferramenta de corte de diamante, sobre a qual foram realizados vários estudos sobre sua utilização na usinagem de ultraprecisão, e concluiu-se que as características da ferramenta devem ser levadas em conta numa análise da superfície da peça. Exemplo disso é a rugosidade da peça usinada, a qual depende da qualidade da superfície da aresta cortante da ferramenta de diamante. Examinado o efeito sobre este aspecto da ferramenta de diamante em uma peça de cobre obtida por torneamento, detectou-se que esta tem forte correlação com a qualidade da superfície da peça usinada (WANG, 1993). Teoricamente, o valor da rugosidade superficial de uma peça usinada em torneamento com uma ferramenta de diamante com ponta arredondada pode ser aproximado pela equação 2.1 (JASINEVICIUS et al, 1995):

$$R_t = \frac{(f)^2}{8r_\varepsilon} \tag{2.1}$$

onde:

f = taxa de avanço (μm/rev)

r_ε = raio de ponta da ferramenta (mm)

R_t = máxima altura de um pico ou vale individual (μm)

Ou, ainda, para obter a rugosidade superficial RMS (*root mean square*) ou rugosidade Rq teórica, quando em torneamento com ferramenta de diamante, através da equação 2.2 (FAWCETT & DOW, 1991):

$$RMS = \frac{f^2}{12\sqrt{5r_\varepsilon}}$$

(2.2)

onde:

f = taxa de avanço (μm/rev)

r_ε = raio de ponta da ferramenta (mm)

RMS = rugosidade Rq – rugosidade quadrática (μm)

Para estimar a rugosidade Ra em processos de usinagem, como em operação de torneamento, pode-se utilizar a fórmula da equação 2.3 (HIPÓLITO, 2005):

$$R_a = 41{,}66\left(\frac{f^2}{r_\varepsilon}\right)$$

(2.3)

onde:

f = taxa de avanço (μm/rev)

r_ε = raio ponta da ferramenta (mm)

Ra = rugosidade média (μm)

Observação: Deve-se ter em conta que estas fórmulas são estimativas. Os resultados reais dependem de outros fatores, tais como: materiais da peça e da ferramenta, velocidade de corte, lubrificação, temperatura etc.

Apesar de as características da ferramenta que está sendo utilizada e do avanço da ferramenta serem dois fatores muito discutidos devido à necessidade de se avaliarem as alterações que ocorrem em uma superfície processada, a natureza e extensão dessas alterações são fortemente dependentes não só do processo utilizado para criar a superfície, mas também do material da peça que está sendo usinada (LUCCA et al, 1998). Desta forma, o material da peça é mais um fator que também contribui para o resultado da rugosidade superficial, que deve ser analisado num processo de usinagem de ultraprecisão. Segundo Duduch (1993), usinagem de ultraprecisão requer a combinação do melhor material, medição e controle.

Alguns autores também citam a velocidade de corte como um outro fator que deve ser analisado em uma usinagem de ultraprecisão. Portanto, estes quatro fatores acima mencionados serão discutidos nos itens que seguem.

2. 1 – Ferramenta de Corte de Diamante

A ferramenta de corte de diamante monocristalino é considerada insubstituível e indispensável, até então, no que tange à produção de superfície de acabamento com qualidade em usinagem de ultraprecisão. Entretanto, possui características que limitam sua aplicação a equipamentos específicos, utilizados de forma rígida e livres de vibrações. A ferramenta de corte de diamante monocristalino tem sido muito divulgada devido ao sucesso na obtenção de superfícies de acabamento com qualidade em usinagem de ultraprecisão em que valores menores ou iguais a 10nm de Ra são fundamentais.

O corte produzido na peça pela ferramenta de diamante monocristalino é considerado bem próximo do perfeito. Isto porque o diamante, dentre os materiais conhecidos, é o mais duro, e pode ser afiado formando uma aresta de corte da mais alta qualidade, conforme mostra a figura 2.2, obtida com o AFM (microscópio de força atômica), devido a sua estrutura cristalográfica, que permite uma aresta de corte muitíssimo afiada (WEULE et al, 2001). Em termos de afiação, rugosidade , afinidade e resistência da aresta cortante, este tipo de ferramenta é considerado o que possui maior potencial para usinar superfícies metálicas com exatidão da ordem nanométrica (JASINEVICIUS et al, 1993). Assim, e por ser o seu desgaste durante a usinagem de certos materiais extremamente baixo, ocorre a criação de um acabamento espelhado.

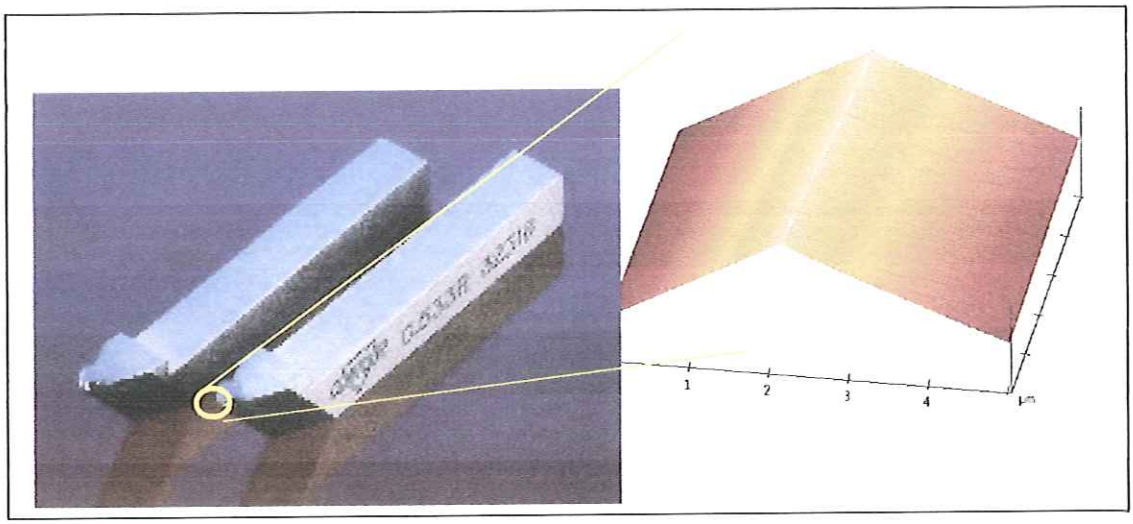

Figura 2.2 – Aresta de corte da ferramenta de diamante.

Também não se pode deixar de mencionar que alguns procedimentos levados em conta na determinação de um processo de usinagem de ultraprecisão com ferramentas de corte de diamante monocristalino podem facilitar a obtenção do melhor que se pode conseguir através da utilização desta ferramenta, como: 1) A temperatura da sala, que deve ser de 20^0C, tanto influencia na temperatura da peça quanto da ferramenta, deve ser controlada com variação de ± 1° F , e 2) A temperatura do fluido de corte, que depende de certos cuidados porque influencia não só na ferramenta, mas também na peça, podendo resultar em erro na forma da peça, deve funcionar como refrigerante de usinagem e ser controlada a 0,001° F (KÖNIG et al, 1991).

Contudo, este tipo de ferramenta de diamante possui algumas características que influenciam na rugosidade da peça usinada.

2.1.1 – Características da Ferramenta de Corte de Diamante

O diamante puro contém apenas átomos de carbono. A sua estrutura cristalina tem ligações covalentes, ou seja, cada átomo de carbono está ligado por pares compartilhados de elétrons a quatro outros, situados nos vértices de um tetraedro. A ligação C – C tem comprimento 1,54Å e ângulo de 109,5°. Estas ligações são muito fortes e, para quebrar o diamante, elas também precisam ser quebradas. Assim, da estrutura cristalina do diamante resulta a sua dureza. Daí a origem da palavra diamante, que vem do grego *adhamas*, e significa indestrutível. Devido à disposição dos átomos de carbono em sua constituição, todo diamante no estado bruto (não lapidado) tem formato octaedro (CALLISTER, 2002).

Porém, devido a sua dureza, o diamante é frágil e possui pouca resistência ao impacto. Desta forma, se o material da peça que está sendo usinada apresentar inclusões duras, lascas do diamante poderá ser arrancado por estas inclusões, danificando a aresta da ferramenta e, conseqüentemente, estragando o acabamento superficial da peça.

A dureza do diamante, comparada à dureza do CBN - Nitreto de Boro Cúbico -, é maior, o que torna a vida útil da ferramenta de diamante mais longa que a da ferramenta do CBN - acima de 20 vezes-. Por isso, a ferramenta de diamante é mais resistente ao uso que alguns outros materiais. Por ser extremamente duro quando afiado, é possível se obter uma aresta de corte com o mais alto grau de afiação. Esta qualidade do diamante, juntamente com outras características , tais como alta condutividade térmica - de 2 a 6 vezes maior que o cobre -, baixa expansão térmica, baixa velocidade de compressão e baixo atrito (o qual reduz o calor na usinagem), fazem que o calor gerado na ferramenta de corte de diamante durante a usinagem não altere a geometria da ferramenta (KRAUSKOPF, 1984). O diamante conduz calor de forma mais eficiente que o cobre e

pode suportar campos elétricos muito fortes. Essas propriedades são resultantes da forma como os elétrons se organizam na estrutura atômica do diamante. Mas esse mesmo arranjo eletrônico torna impossível ao diamante conduzir eletricidade.

Em alta temperatura, entretanto, o diamante começa a oxidar. Uma camada escura começa a se formar na superfície, em cerca de 600°C, e começa a grafitizar a 1.500°C. A 2.100°C, um cristal de 0,1 quilate pode ser completamente transformado em grafite em menos de 3 minutos (KRAUSKOPF, 1984). Tem altíssimo ponto de fusão (3.920^{0}C) e ebulição, pois precisa romper as ligações covalentes.

O máximo desempenho da ferramenta de diamante é obtido utilizando-se um cristal de alta qualidade, que assim pode ser considerado se analisado a uma amplitude de pelo menos 400X e avaliado livre de trincas e inclusões na área cortante. O diamante natural, ou seja, livre de impurezas, pode também ser livre de estresses e mais resistente a abrasão (WILKS & WILKS, 1982). Portanto, para ferramentas cortantes, os diamantes devem ser de qualidade gema, para obter as propriedades geométricas de corte e resistir às tensões de usinagem (KRAUSKOPF, 1984). Também a manutenção da ferramenta de diamante necessita de cuidados especiais. Porém é a lapidação a tecnologia chave para o uso do diamante como ferramenta de usinagem, como também para o uso do diamante como uma jóia (YUAN et al, 2003).

2.1.1.1 – Lapidação da Ferramenta de Corte de Diamante

Por causa da elevada dureza e da alta resistência do diamante, sua taxa de remoção em lapidação é muito pequena. E para que a lapidação seja eficiente, é necessário orientar os planos cristalográficos do diamante e encontrar a direção fácil (do inglês *soft*) e difícil (do inglês *hard*). Pois, devido à anisotropia do diamante monocristalino – direções cristalográficas diferentes – , a taxa de remoção de diamante em lapidação e a superfície de acabamento lapidada são diferentes, não só nos próprios planos cristalográficos, mas também nas direções desses (YUAN et al, 2003). Os planos cristalográficos são representados pelos símbolos, conforme mostra a figura 2.3. E a figura 2.4 mostra os planos cristalográficos do diamante octaedro.

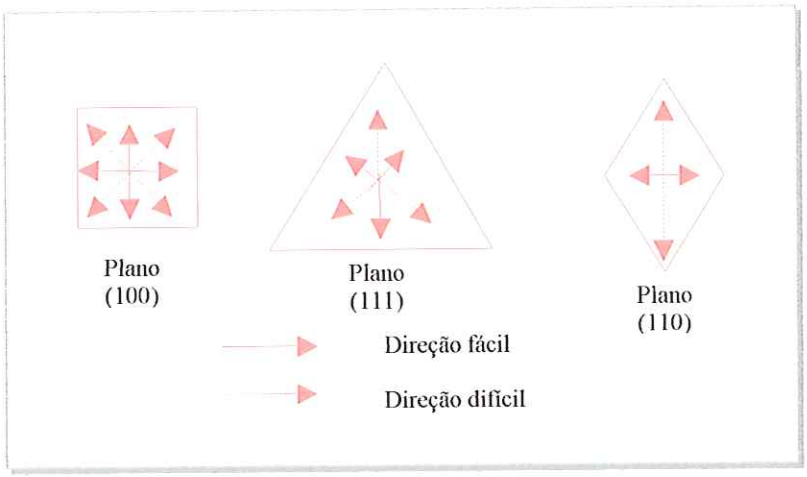

Figura 2.3 – Símbolos que representam os planos cristalográficos do diamante (YUAN, 2003).

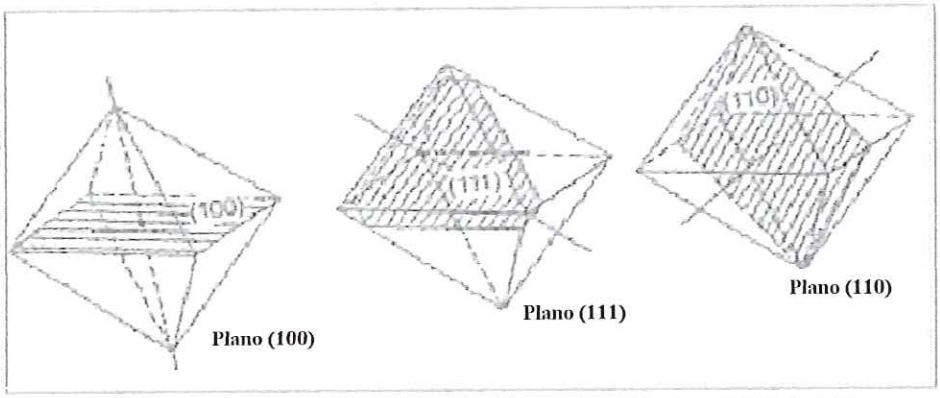

Figura 2.4 - Planos cristalográficos em diamante octaedro (YUAN, 2003).

Uma molécula de diamante, com base em tetraedro, possui quatro conjuntos de ligações paralelas que formam o octaedro. Se um conjunto destas ligações for cortado, o diamante se divide em dois. Esse processo é chamado de clivagem e os planos denominados planos de clivagem.

As ferramentas de diamante devem ser cuidadosamente lapidadas com abrasivos de diamante de 0,25μm para acabamento da aresta cortante (SAITO, 1975).

O método padrão de desbaste do diamante para fazer ferramentas de corte é por retificação e polimento. Um surpreendente fator deste método de trabalho é que a taxa de remoção do material do diamante depende grandemente da orientação cristalográfica da face que está sendo polida tanto quanto da direção do abrasão (WILKS & WILKS 1972). Para Yuan et al (2003), a clivagem para o plano (111) é mais fácil no caso em que θ for maior que 90°, do que se θ for menor que 90°, conforme mostra a figura 2.5.

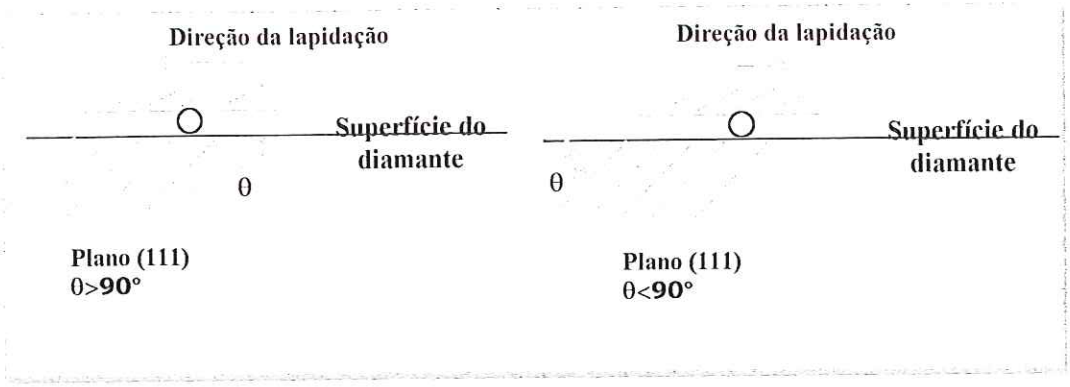

Figura 2.5 – Influência do ângulo θ no processo de lapidação (YUAN, 2003).

A afiação da ferramenta de diamante é muito importante para a alta qualidade da usinagem, principalmente de materiais frágeis, em que a afiação e a geometria da ferramenta são extremamente importantes para um bom desempenho do corte. A rugosidade da aresta cortante afeta significativamente a qualidade da superfície da peça (WANG, 1993). Para Hunsalz et al (1991), a qualidade da aresta cortante da ferramenta de diamante é muito importante para a qualidade da peça usinada em processo de ultraprecisão. E para Porto et al (2004), também é a afiação da aresta de corte o principal fator para determinação da mínima espessura de corte, a qual pode ser considerada a responsável pelo limite de exatidão alcançável pelo corte.

O comportamento do corte depende amplamente da orientação cristalográfica da face de inclinação e da direção na qual o cavaco é removido para fora da ferramenta de diamante. Além disso, para o monocristalino, se uma face de inclinação e uma aresta da ferramenta são determinadas, a direção cristalográfica do flanco deve ser determinada inevitavelmente de acordo com a geometria da ferramenta (UEGAMI & TAMAMURA, 1991), desta forma, tornando mais amplo o uso da ferramenta (UEGAMI,1993).

2.1.2 - Geometria da Ferramenta

Alguns resultados de uma boa usinagem dependem da geometria da ferramenta. A figura 2.6 mostra um desenho da geometria de uma ferramenta monocortante de diamante monocristalino.

A estrutura octaedra cristalina de um diamante resulta em planos de clivagem que são paralelos ao cristal, e a força e resistência do desgaste da ferramenta dependem desta orientação em direção à peça. Motivo para se dar especial atenção ao identificar o plano de clivagem antes da sua confecção (KRAUSKOPF, 1984).

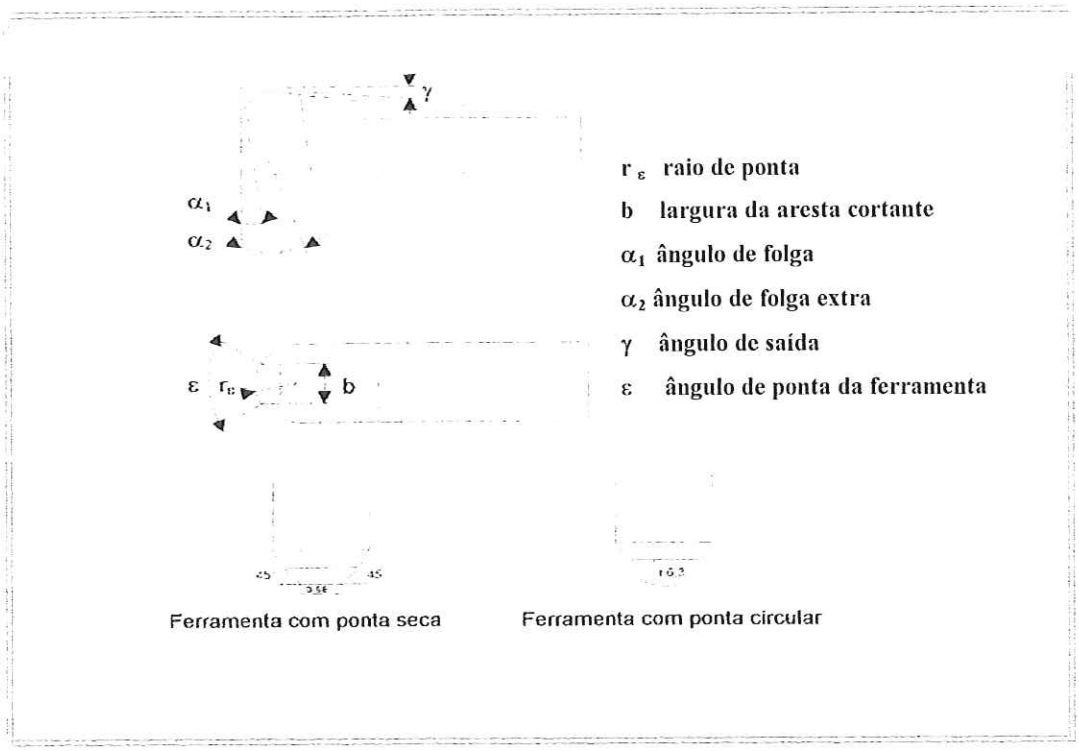

Figura 2.6 - Geometria da ferramenta (PORTO, 2004).

Em operações de usinagem de ultraprecisão com ferramentas de diamante monocristalino, para que a aresta cortante seja inteiramente utilizada, são usados raios de ponta entre 0,5 e 10 mm (KÖNIG, 1991).

As ferramentas com ponta seca são usadas para partes planas e para cortes de materiais frágeis, enquanto as ferramentas com pontas arredondadas são empregadas para contornos torneados e para materiais dúcteis. As ferramentas com ponta arredondada são geralmente designadas com um raio que seja o maior possível, porém um raio muito grande pode aumentar a pressão de corte e alterar o acabamento superficial da peça (KÖNIG, 1991)..

As ferramentas com raio de ponta grande melhoram o acabamento superficial da peça. Sua desvantagem é que não são apropriadas para aplicação em usinagem de contorno em máquinas de torneamento, pois esse tipo de ferramenta apresenta um raio de curvatura maior que o necessário para o caso de usinagem de superfícies côncavas e convexas. Torna-se assim difícil se conseguir compensar o raio ao longo da superfície de corte (PORTO et al, 1996).

Geometrias de inclinação positiva e zero são as mais comuns para operação de torneamento. Em muitas aplicações, tem sido mais comum o uso de uma média mínima de 5° a 10° de ângulo de folga e de 0° a 2° positivos de ângulo de inclinação (KRAUSKOPF, 1984).

As ferramentas convencionais requerem ângulo de corte e velocidade especiais e atenção ao ângulo de saída do cavaco, para prevenir que durante o corte do material este não se solde na ferramenta. Porém, geralmente, a qualidade da superfície usinada com diamante é insensível à mudança do ângulo de folga e velocidade da ferramenta (KRAUSKOPF, 1984).

König et al (1991) apresenta diferentes geometrias para a ferramenta de corte de diamante de acordo com o tipo da superfície que estiver sendo utilizada. A tabela 2.2 apresenta a geometria recomendada para metais não ferrosos, tais como cobre e alumínio.

Tabela 2.2 – Geometria da ferramenta para metais não ferrosos

Superfície trabalhada	Raio de ponta r_ε (mm)	Ângulo de saída γ (graus)	Ângulo de folga α (graus)
Plana	2 a 10	0 a –5	2 a 5
Côncava	0,5 a 4	0 a –5	2 a 5
Convexa	0,5 a 4	0 a -5	2 a 5

Fonte: König et al (1991).

2.2 - Material da Peça a ser Usinada

No torneamento de ultraprecisão com diamante é a microinteração entre a aresta cortante do diamante e o material da peça que governa a remoção do material (JASINEVICIUS, 2003). Portanto, as condições de serviço devem ser caracterizadas, pois elas é que vão estabelecer as propriedades exigidas do material (CALLISTER, 2002). Às vezes, abre-se mão de uma característica por outra que apresente maior vantagem. No entanto, a escolha do material a ser utilizado em usinagem de ultraprecisão precisa ser criteriosa, pois a avaliação da integridade superficial de peças usinadas com ultraprecisão também depende desta escolha.

Atenção especial deve ser dada para o material da peça, quando o diamante é usado como material da ferramenta de corte. Por exemplo, à alta temperatura, tungstênio, titânio, tântalo e zircônio reagem quimicamente com o carbono do diamante e formam carburetos. Metais ferrosos, como cobalto, magnésio, níquel e cromo reagem com o diamante na presença de oxigênio, e esta reação causa grafitação, destruindo assim o diamante (KRAUSKOPF, 1984). Desta forma, estes materiais não são apropriados para serem empregados em tecnologias de usinagem de ultraprecisão com ferramenta de diamante. Outro exemplo: o desgaste da ferramenta depende da dureza da peça

usinada; quando esta é bastante alta, a ação da força de tensão sobre o diamante alcança a força de fratura e o desgaste começa rapidamente (WANG, 1993).

Em uma pesquisa divulgada por Cheung & Lee (2000), estes afirmam que o perfil de uma superfície torneada é composto por vários componentes, dentre os quais o autor cita as propriedades e a orientação cristalográfica do material da peça que está sendo usinada e a geometria da ferramenta que esta sendo utilizada. Afirmam, ainda, que, em microcorte, como em superfície torneada com diamante, o material da peça induz vibrações, devido à variação na orientação cristalográfica do material. Comentam, ainda, que trabalhos estão sendo desenvolvidos para avaliar esta variação da rugosidade superficial causada por esta vibração. Os autores concluíram finalmente que a variação da rugosidade com relação ao material utilizado é significante, quando em formação de superfície em escala nanométrica. Dornfeld et al (2003) também comenta, em seu artigo, que a superfície de acabamento em usinagem de ultraprecisão é intimamente afetada pelas propriedades do material da peça que está sendo usinada.

Para Callister (2002), os materiais sólidos são agrupados em três classificações, baseadas principalmente na composição química e estrutura atômica, e a maioria dos materiais se encaixa em um desses três grupos:

1) **Metais:** são extremamente bons condutores de eletricidade e calor, não são transparentes à luz visível - uma superfície metálica polida possui uma aparência lustrosa - e são muito resistentes, porém deformáveis.
2) **Cerâmicos:** são compostos pelos elementos metálicos e não metálicos; são freqüentemente óxidos nitretos e carbetos. Neste grupo encontra-se o vidro. Estes materiais são isolantes à passagem de eletricidade e calor, são mais resistentes a altas temperaturas e a ambientes abrasivos do que os metais e os polímeros, e são mais duros, porém quebradiços.
3) **Polímeros:** são os plásticos e borrachas, possuem baixa densidade e são extremamente flexíveis.

Porém o autor adiciona um outro grupo também muito importante para a engenharia:

a) **Compósitos:** são projetados para mostrar uma combinação das melhores características de cada um dos materiais que o compõem. Exemplo é a fibra de vidro, que adquire resistência do vidro e a flexibilidade do polímero.

b) **Semicondutores:** possuem propriedades intermediárias entre aquelas apresentadas pelos condutores elétricos e pelos isolantes. Este grupo torna possível o advento dos circuitos integrados, que revolucionaram totalmente as indústrias de eletrônicos.

c) **Biomateriais:** são aqueles implantados no interior do corpo humano; todos os materiais citados acima podem fazer parte deste grupo.

Ainda pode-se citar os materiais chamados de **avançados**, que podem ser de todos os tipos de materiais acima mencionados, cujas propriedades foram aprimoradas. São materiais utilizados em alta tecnologia. Por alta tecnologia pode-se dizer que são aquelas relativamente sofisticadas; como exemplos, podem-se citar: videocassetes, aparelhos de CD, computadores, fibras ópticas, espaçonaves, armazenamentos magnéticos, circuitos integrados, materiais usados em laser etc.

A tabela 2.3 mostra alguns dos materiais mais utilizados na usinagem de ultraprecisão.

Tabela 2.3 – Materiais utilizados na usinagem de ultraprecisão

Metais	Polímeros	Cristais
Alumínio	acrílico	silício
Cobre	nylon	germânio
Latão	policarbonato	arseneto de gálio
Bronze	poliestireno	antimoneto de índio
níquel eletrolítico	polisulfonados	sulfeto de zinco
Zinco	acetato	niobato de lítio
Prata	fluoropláticos	fosfato de potássio
Ouro		sulfeto de cádmio
Chumbo		dióxido de telúrio
Estanho		iodeto de césio
Platina		fluoreto de cálcio
Magnésio		fluoreto de estrôncio

Fonte: Silva (2003).

Durante a usinagem, o material está sujeito a uma alta pressão causada pela atividade do corte, derivando em uma deformação plástica e elástica. Livre desta pressão, o material sofre uma recuperação tanto plástica quanto elástica, que é variável, dependendo da orientação cristalográfica do material que está sendo usinado. Conseqüentemente, uma ondulação na superfície poderá se formar, causando marcas e maior rugosidade na superfície usinada. A figura 2.7a mostra o perfil ideal deixado pela ferramenta de corte. E a figura 2.7b mostra o perfil real após a recuperação do material. Nota-se que em b tanto a profundidade quanto a largura dos sulcos

deixados pela ferramenta são maiores, e que este efeito de recuperação distorce as marcas formadas na superfície usinada, além de adicionar uma rugosidade superficial, pois a rugosidade teórica Rt, equação 2.1, considera uma superfície ideal com ausência de deformações plástica e elástica ou outros fatores de distúrbios, tais como: erro no movimento do eixo árvore e vibrações da máquina, que são detectados pela geometria da ferramenta e velocidade de corte (TO et al, 2001).

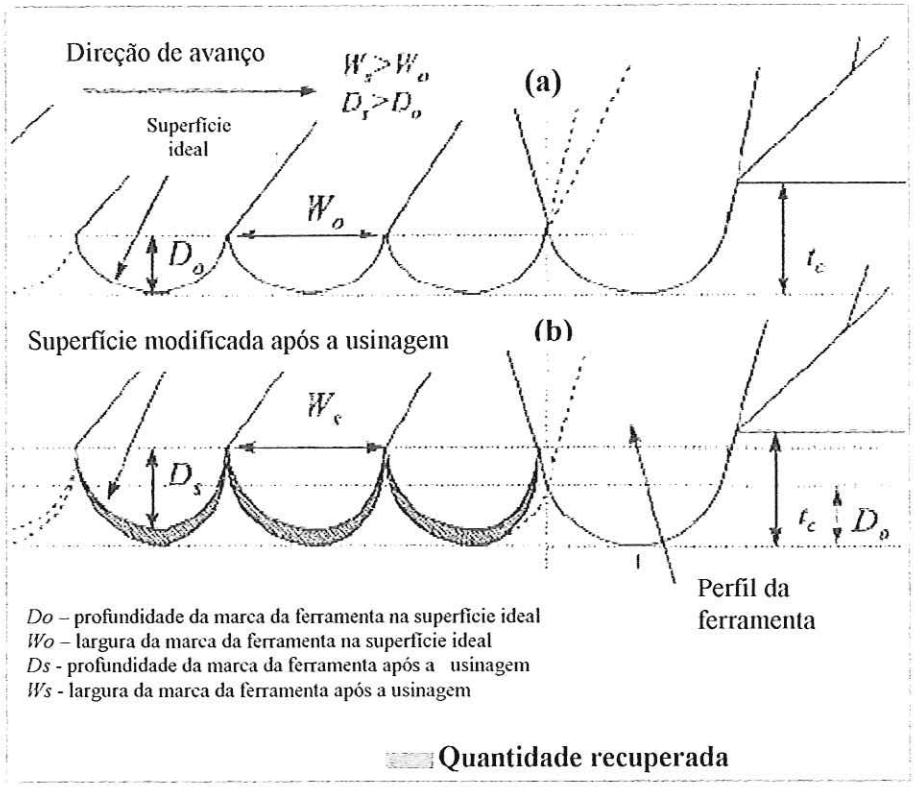

Figura 2.7 – (a) Perfil ideal, (b) Perfil real (TO et al, 2001);

Este efeito acarreta um resultado final que não é significativo em usinagem convencional. Porém, em torneamento com diamante, não pode ser negligenciado, conforme pode ser comprovado por uma análise espectral (TO et al, 2001). Nesta análise, o perfil rugoso ao longo da direção axial da superfície torneada é medido, além de permitir que sejam identificados os fatores desta rugosidade, que são causados pelo erro de rotação do eixo árvore, vibrações e inchaço e recuperação do material. Ou seja, através desta análise espectral, é possível avaliar a performance da máquina-ferramenta e as propriedades do material usinado (SATA et al, 1985). As figuras 2.8, 2.9 e 2.10, obtidas com o TalySurf CCI3000, apresentam uma imagem topográfica, um gráfico do perfil axial medido e um gráfico espectral, respectivamente, extraídos de uma superfície usinada em torneamento com diamante em cobre. A rugosidade Ra medida no sulco deixado pela ferramenta de

corte, no sentido de corte, foi de 10,9nm, valor bastante significativo para uma usinagem de ultraprecisão.

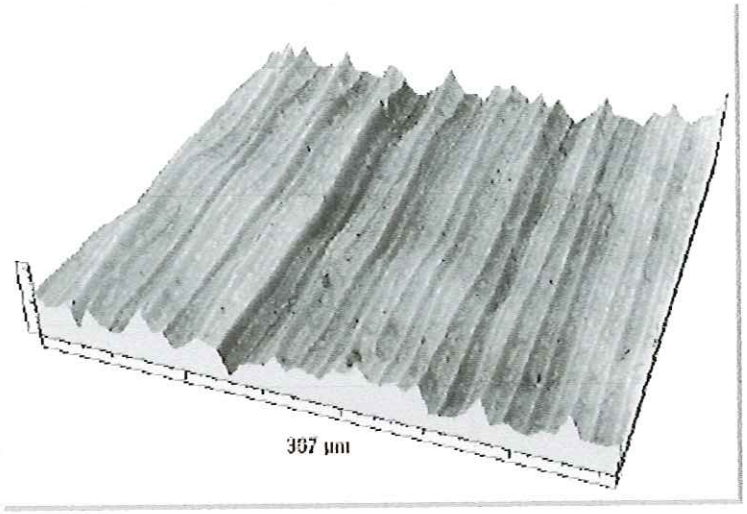

Figura 2.8 – Imagem topográfica.

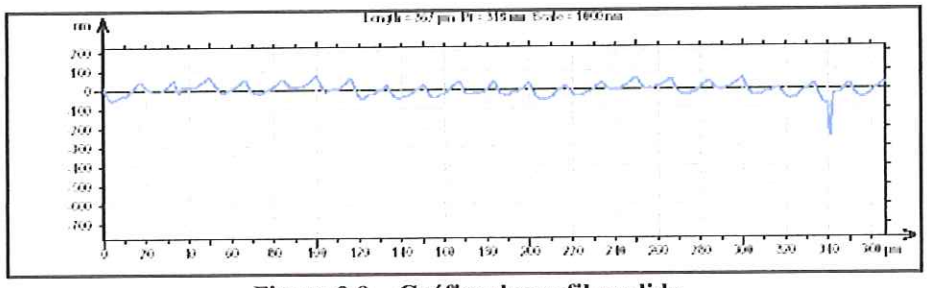

Figura 2.9 – Gráfico do perfil medido.

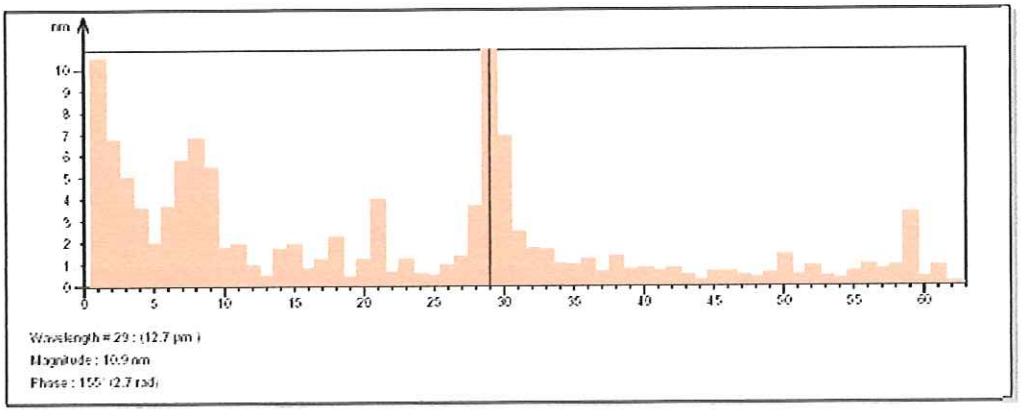

Figura 2.10 – Gráfico espectral.

São varias as pesquisas desenvolvidas sobre o material utilizado em usinagem de ultraprecisão, algumas são comentadas a seguir.

2.2.1 - Metais não ferrosos

O carbono do diamante tem alta afinidade com o ferro, ocasionando severos danos à ferramenta de diamante (WEULE, 2001). Por esta razão, os metais não ferrosos e plásticos são predominantemente usinados com ferramentas de corte de diamante monocristalino (PORTO et al, 1996). Em torneamento de metais não ferrosos com ferramentas de diamante, a rugosidade superficial é um dos principais critérios para a integridade da superfície (LUCCA et al, 1998). Porém, por serem policristalinos, ou seja, por possuírem propriedades diferentes, podem afetar a ferramenta, prejudicando assim a superfície de acabamento da peça. Os parâmetros de usinagem usualmente empregados em usinagem de acabamento de metais não ferrosos são mostrados na tabela 2.4 (KÖNIG et al, 1993).

Tabela 2.4 – Parâmetros de corte para metais não ferrosos

Material	Profundidade de corte ap (μm)	Avanço f (μm/rev)	Ferramenta
Metal não ferroso	1 a 3	3 a 15	Geometria recomendada na tabela 2.2

Fonte: König et al (1991).

A usinagem de ultraprecisão com ferramenta de diamante monocortante teve seu desenvolvimento inicial para a produção de componentes ópticos a partir de materiais dúcteis, como o cobre e o alumínio, por trazer melhorias nos produtos fabricados, adicionados a uma significante redução de tamanho e peso (DUDUCH,1993). Estes materiais são os mais fáceis de serem usinados com diamante por apresentarem baixa resistência ao escoamento e relativamente baixa reatividade química com o carbono do diamante (PORTO et al, 1996).

2.2.2 - Materiais frágeis

A usinagem de materiais duros e frágeis, como, por exemplo, o silicone utilizado normalmente em óptica, é considerada extremamente complicada por exigir estrita exatidão de forma, de acabamento superficial e causar danos de subsuperfícies (CONNOR et al, 2005). Apesar

disso, pela necessidade de produtos economicamente viáveis e com alta qualidade, desenvolveram-se diversas pesquisas de usinagem de ultraprecisão com estes materiais (PAGOTTO, 2004). Os materiais frágeis sofrem fratura antes de ocorrer quantidade apreciável de deformação plástica, porém são muito utilizados como componentes de precisão, devido as suas características mecânicas, ópticas, eletrônicas e propriedades físicas (PORTO, 2004). Portanto, é uma área de grande interesse na usinagem de ultraprecisão, por exemplo, vidros ópticos, cerâmicas e materiais cristalinos para microeletrônica, e, ainda, silício, germânio, antimoneto de índio, arseneto de gálio, entre outros. Assim, muitos estudos têm sido desenvolvidos em torno da usinagem de materiais frágeis com o objetivo de mostrar a influência dos diversos fatores e parâmetros de corte, tais como geometria da ferramenta, profundidade de corte, velocidade de avanço, transformação de fase, entre outros, na usinabilidade (MONTANARI, 2004).

Quando se trata de vidro com superfícies finamente acabadas para uso óptico, requer-se considerável integridade superficial. As indústrias ópticas têm se deparado com grandes dificuldades para conseguir superfícies ópticas de precisão (PORTO, 2004). Há a necessidade de ausência de danos em subsuperfícies, incluindo microtrincas, além das exigências quanto à forma e acabamento superficial extremamente fino, que podem ser obtidos por uma retificação ultrafina e polimento (KOMANDURI et al, 1997). Namba & Abe (1993) conseguiram atingir uma rugosidade superficial menor que 0,2nm de Ra, medido com microscópio de força atômica.

Nos materiais cerâmicos, os processos usados para acabamento incluem retificação, lapidação e polimento, o que requer longos períodos de tempo. Para técnicas de acabamento ultrafino, incluindo retificação e polimento, conseguiu-se produzir uma baixa rugosidade superficial.

Komanduri et al (1997) realizou uma pesquisa com uma variedade de cerâmicas e sumariza neste trabalho resultados atingidos para forma e acabamento superficial.

Um outro trabalho, Bandyopadhyay et al (1996), com material cerâmico, resultou em rugosidade superficial de 3,2nm Ra, medido com microscópio de força atômica. Komanduri et al (1996), com um trabalho de polimento, estudou acabamento ultrafino em vidro e atingiu uma rugosidade superficial considerada excelente e de qualidade óptica. A rugosidade atingida foi de 42,6nm (RMS), medido com microscópio eletrônico de varredura (SEM).

Nos cristais infravermelhos, o corte é possível com ferramentas de diamante monocristalino, por se mostrar mais frágil quanto ao comportamento de fratura, comparado com a usinagem por tecnologia convencional. A usinagem destes materiais frágeis pode ser feita por causa do gume afiado da aresta cortante, que permite remover lascas com profundidade de corte de ap=1 μm e avanço de f=2 a 3 μm/rev. Adicionalmente, é necessária uma geometria especial da

ferramenta que promova uma tensão de compressão no interior do material e no topo da ferramenta (KÖNIG et al, 1991).

A integridade da superfície precisa de avaliação e requer medição da mudança tanto da estrutura do cristal quanto da química, numa escala de nanômetros. Lapidação e polimento de vidros, cerâmicas e monocristal têm demonstrado serem capazes de rugosidade superficial alcançada em poucos nanômetros de Ra (KOMANDURI et al, 1997).

2.2.3 - Aço

O uso do aço para usinagem de peças em torneamento com ferramenta de diamante não é um assunto de completo conhecimento (BRINKSMEIER, 2001). Os autores Paul & Evans (1996), em seu artigo, colocam uma conclusão, que, segundo eles, serve de base para a teoria da reação química causada pelo uso da ferramenta de diamante, quando o aço for o material da peça: "*d elétrons não parelhados do aço (Apêndice I) permitem que se quebrem as ligações carbono-carbono do diamante seguidas por formações complexas metal-carbono*". Assim, Brinksmeier & Gläbe (2001) afirmam que os autores presumem que a reação química entre a ferramenta e o material da peça, neste caso, está associada aos d elétrons presentes nos átomos do material da peça. E estes d elétrons podem ser os responsáveis pela catástrofe causada á ferramenta de diamante. Porém este material ainda está em estudo para ser utilizado em usinagem com uma ferramenta de diamante monocristalino, e são vários os estudos desenvolvidos e em diferentes caminhos, também, por diferentes institutos de pesquisas.

2.3 - Velocidade de Corte (Vc)

A velocidade de corte pode ser negligenciada na avaliação da qualidade da superfície, na usinagem de ultraprecisão de cobre com ferramenta de corte de diamante. O gráfico da figura 2.11 mostra que, durante uma operação de corte, com alterações de velocidade, a variação de rugosidade foi de apenas 0,4 nm, a qual está dentro da área da incerteza do dispositivo de medição disponível (KÖNIG et al, 1991).

Porém, para Yousefi & Yoshio (2000), a qualidade de um acabamento superficial é o ponto-chave para alguns estudos. Os resultados de sua pesquisa mostraram que a superfície de acabamento em alumínio melhora quando a velocidade de corte é aumentada.

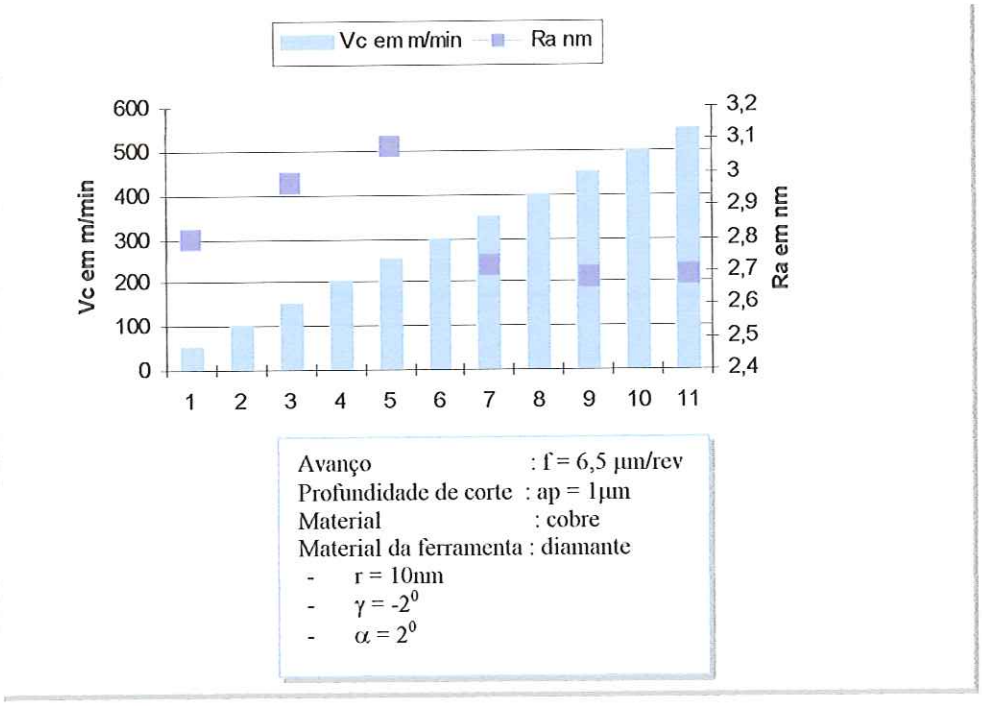

Figura 2.11 – Influência da velocidade de corte na avaliação da rugosidade do cobre (KÖNIG et al. 1991).

2.4 – Profundidade da Usinagem de Corte (ap)

Segundo Duduch et al (1995), uma investigação com materiais não ferrosos (alumínio e cobre) em torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante concluiu que a forma da superfície depende do número de passes de desbaste e da profundidade de corte.

Para Cheng & Lee (2000), a profundidade de corte em usinagem de ultraprecisão deve ser menor que o tamanho do grão cristalográfico do material da peça. No entanto, Dornfeld et al (2003) argumenta que quando a profundidade de corte, em materiais policristalinos, é muito pequena – menor que 5µm – , a formação de cavaco e as forças cortantes são significativamente influenciadas pela orientação dos grãos.

CAPÍTULO III

CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE ULTRAPRECISÃO

Os diferentes processos de usinagem produzem superfícies diferentes, ou seja, cada processo de usinagem gera uma superfície produzida em caminhos específicos, que deliberadamente alteram a superfície anterior dando a esta, atual, um acabamento superficial de acordo com sua específica função.

A qualidade da superfície usinada pode ser avaliada pelo valor da rugosidade superficial (BAEK et al, 1997). Atualmente, as indústrias têm motivado muitas pesquisas, na escala nanométrica, sobre superfícies funcionais de altíssima qualidade, produzidas pela usinagem de ultraprecisão (LONARDO et al, 2002). Tais como, a fabricação de pratos de memória magnética, cilindros de copiadoras e metal óptico, que são componentes eletrônicos, semi-condutores e produtos da área óptica, respectivamente.

Por muitos anos o controle metrológico de superfícies ficou limitado a produção mecânica, mas hoje também tem significante importância para as indústrias de eletrônicos e óptico-eletrônicos e está começando a emergir em aplicações biomédicas. Implantes dentais, articulações de quadris e implantes de ossos fraturados, requerem texturas de rugosidades apropriadas e diferentes. Exemplo disso, em articulações de quadris deve haver um mínimo possível de rugosidade, para não correr o risco de uma nova operação. Às exigências na qualidade da superfície, torna os produtos caros, como no caso da fabricação de prótese ortopédica (LONARDO et al, 2002).

Com o desenvolvimento da tecnologia e as rígidas exigências quanto à qualidade do acabamento superficial, também, o processo de avaliação da superfície tem se tornado mais importante (CHEN et al, 1999). Afinal, a alteração da superfície pode incluir mudança mecânica,

metalúrgica, química entre outras. Estas mudanças, embora confinadas a uma pequena camada da superfície, pode limitar a componente qualidade ou, pode em alguns casos, prover uma superfície inútil (LUCCA, 1998). Assim, qualquer que seja a superfície gerada, esta precisa ser entendida para ser controlada.

Em 1964, Field & Kahles, foram os primeiros a apresentarem o termo *surface integrity*, que é definido, como sendo, a condição em que se apresenta uma superfície produzida em uma usinagem, ou superfície gerada por uma operação (LUCCA, 1998).

A superfície, de um componente de engenharia, é uma camada com propriedades que diferem daquelas do interior do corpo. Estas propriedades contribuem para a função do comportamento do componente (THOMAS, 1982).

A topografia da superfície é um sinônimo da superfície metrológica, que consiste em fatores geométricos da superfície, incluindo forma e textura. Textura é acabamento, tem seu significado padronizado, que é a combinação da rugosidade, ondas e marcas deixadas na superfície pela ferramenta utilizada na usinagem (BUSCH, 1989). Portanto, rugosidade é uma propriedade da textura, concernente com a geometria da superfície.

Para Lee et al (2005), como estimar exatamente e convenientemente a rugosidade superficial de uma peça usinada é, ainda hoje, o principal problema. Pois, a avaliação da rugosidade pode ser dada somente de forma qualitativa, pela referência da instrumentação que estiver sendo utilizada, de acordo com os parâmetros geométricos. Assim, antes de ser executada a medição, é necessário definir o que será medido.

3.1 - Fundamentos Teóricos sobre o Conceito de Rugosidade Superficial

Por mais perfeita que seja uma superfície, ela sempre apresenta particularidades que são heranças do método empregado em sua obtenção, por exemplo: torneamento, fresamento, retificação, brunimento, lapidação, etc. As superfícies assim produzidas, apresentam um conjunto de irregularidades. A norma DIN 4760 apresenta uma divisão desses desvios em seis classes. Os de 1ª. ordem - também conhecidos como erros macro-geométricos, são os maiores -, que são os erros de forma associados com a variação e tamanho da peça, paralelismo entre superfícies e planicidade de uma superfície ou conicidade, circularidade e cilindricidade. Estes erros podem ser medidos com instrumentos convencionais, tais como, micrômetros, comparadores, projetores de perfil, etc. Os erros de 2ª. e 3ª. ordem – são os menores, por isso considerados micro-geométricos -, são as ondulações e rugosidade, respectivamente. Os erros de 4ª. ordem, são aqueles conhecidos como crateras, estrias ou escamas. Os de 5ª e 6ª. ordens, correspondem à estrutura de material como, por

exemplo, na modificação da superfície por ação química, como decapagem (erros de 5ª ordem), ou processos físicos e químicos da estrutura da matéria, tais como tensões e deslizamentos da estrutura reticular do material (erros de 6ª. ordem)(MIGUEL, 1997).

A rugosidade ou textura primária é formada por sulcos ou marcas deixadas pelo agente que atacou a superfície no processo de usinagem (ferramenta, rebolo, partículas abrasivas, ação química, etc) e se encontra superposta ao perfil de ondulação figura 3.1.

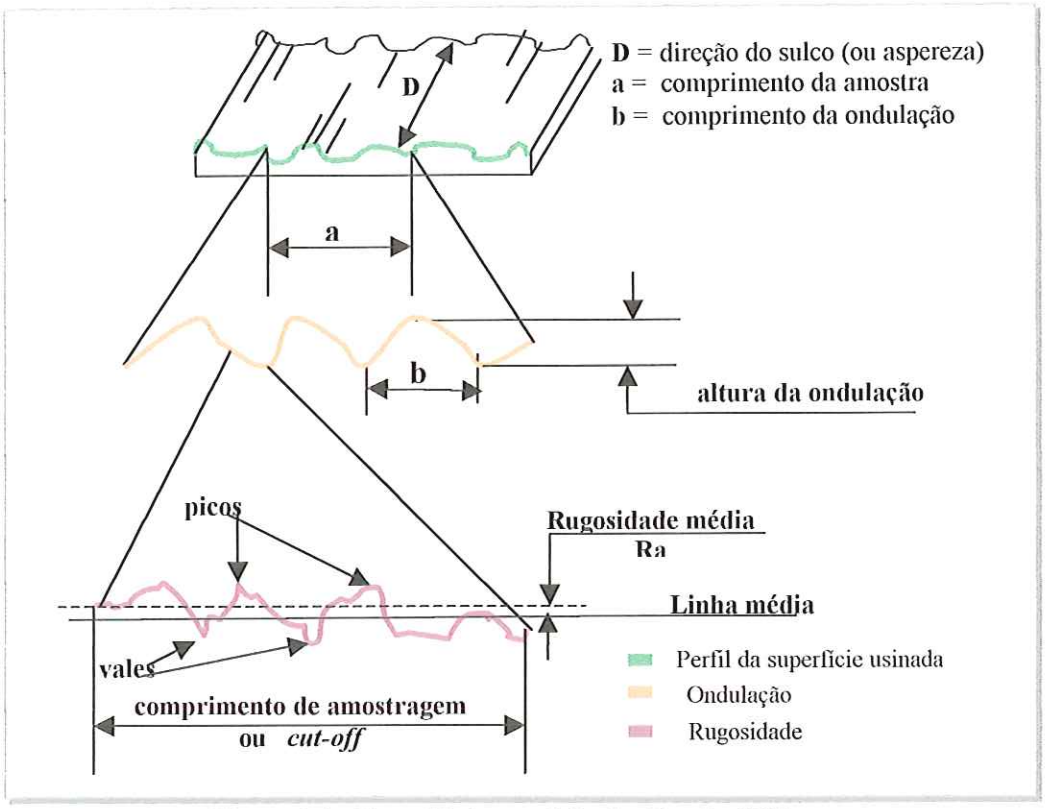

Figura 3.1 – Rugosidade e ondulação (Busch, 1989).

A ondulação ou textura secundária é o conjunto das irregularidades repetidas em ondas. A qual tem comprimento bem maior que sua amplitude, e que podem ocorrer por deficiência nos movimentos da máquina ferramenta, figura 3.1, enquanto que a rugosidade é uma conseqüência da ferramenta que está sendo utilizada para a fabricação da peça. Os espaçamentos entre as ondas (*comprimento da ondulação*) podem abranger de 100 até 1000 vezes sua amplitude.

O método de análise de pequenas ondas pode ser usado para extração e posterior avaliação das características da estrutura da superfície. A engenharia de superfície consiste de um campo de freqüência espacial, ou seja, a alta freqüência ou curto comprimento de onda, de

componentes, é referido como rugosidade, a freqüência média como ondulação e componentes de baixa freqüência como forma, (RAJA et al, 2002).

O perfil da rugosidade pode ser representado por um gráfico, conforme mostra a figura 3.2. O primeiro gráfico de perfil de rugosidade foi produzido pelo alemão Gustav Schmalz no final da década de 30. Estes gráficos fornecem informações úteis sobre o perfil de rugosidade da peça, pois, permitem, através da diferença nas escalas vertical e horizontal, avaliar a rugosidade da superfície, porque: 1) possibilita que seja feita uma distinção entre perfis periódicos e irregulares. 2) permite uma avaliação de picos e vales existentes na superfície e 3) fornece informação da altura e espaçamento dos picos. Contudo, não fornecem dados quantitativos de forma para estimar se a peça está adequada aos requisitos funcionais planejados (MIGUEL, 1997).

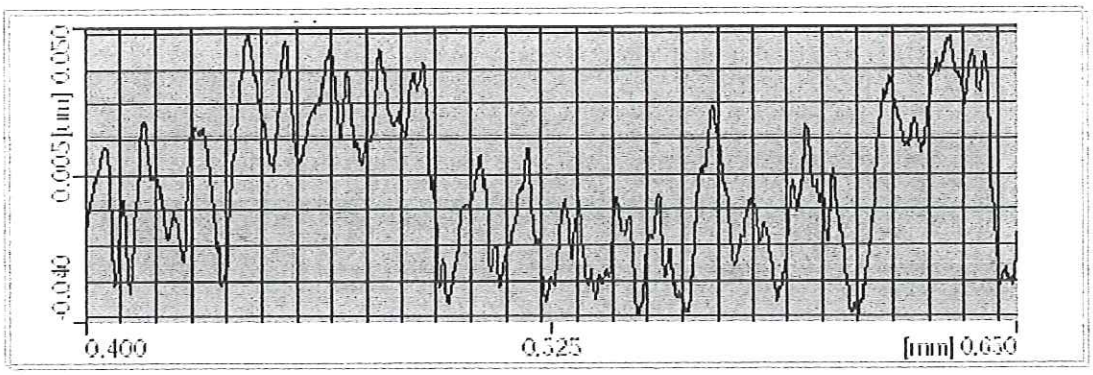

Figura 3.2 – Perfil de rugosidade Ra.

De acordo com as definições apresentadas, conclui-se que, o perfil de rugosidade vem superposto ao perfil de ondulação. Daí a necessidade de se contar com um sistema que possa excluir este último para uma medição livre de influências indesejadas. Assim, os dados desse perfil podem ser utilizados para obtenção de parâmetros estatísticos de avaliação da rugosidade, que serão descritos a seguir.

3.1.1 - Sistemas de Medição da Rugosidade

A definição e a medição da textura superficial se realiza em forma geométrica, ante a impossibilidade de uma definição funcional. As definições geométricas são bastante abstratas porque são baseadas na linha de referência que existe somente na teoria. Os resultados sofrem certas distorções pela utilização de filtros, que servem para excluir a ondulação quando se pretende definir a rugosidade (THOMAS, 1974). Foram desenvolvidos dois sistemas de referencia: o sistema "E" ou da envolvente e o sistema "M" ou da linha média.

Desses sistemas são extraídos os parâmetros para a avaliação da rugosidade, os quais podem ser separados basicamente em três grupos: parâmetros de amplitude, que são as medidas das características verticais dos desvios da superfície. Os parâmetros espaciais, que são as medidas das características horizontais dos desvios da superfície. E, os parâmetros híbridos, que são a combinação dos dois anteriores (TAYLOR & ROBSON, 2005).

Dentre os que medem a variação vertical (amplitude) do perfil, podemos citar: Ra, Rz, Rt, Ry, Rsk e Rku. Quanto à variação horizontal (espaçamento), os mais conhecidos são: Sm, HSC e Pc e outros são uma combinação dos dois anteriores, os parâmetros híbridos, tais como: curvatura de pico, curvatura de vale e inclinação (MIGUEL, 1997).

O parâmetro mais utilizado, conforme mostra a tabela 3.1, é o Ra (rugosidade média), ou seja, a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição

Tabela 3.1 – Os parâmetros mais utilizados em diferentes países

Parâmetro / Países	1	2	3	4	5	6	7	Norma
Japão	R_a	R_{max}	R_z					JIS 0601-1982
USA	R_a							ANSI B 46.1-1985
Reino Unido	R_a		R_z					BS 1134-1972
Itália	R_a	R_{max}/R_{tm}	R_z	RMS	t	S_m		UNI3963part 2-1978
Índia	R_a	R_{max}	R_z	R_p				IS 3073-1967
Austrália	R_a	R_{max}						AS 1965-1977
Noruega	R_a							NEN 3631-1977
Canadá	R_a							CSA B 95-1962
Suécia	R_a		R_z		t_p	S		SMS 671-1975
Rússia	R_a	R_{max}	R_z		t_p	S	S_m	GOST 2789-73-1974
Alemanha	R_a	R_t/R_{max}	R_z	R_p	t_p	A_t		DIN4762Blatt1-1960
França	R_a	R_t/R_{max}		R_p	$(T_R)_C$	A_R		NF 05-15-1972
Finlândia	R_a	R_{max}	R_z					SFS 2038-1969
Polônia	R_a	R_{max}	R_z		N_L			PN-73/M-04250/74
ISSO	R_a	R_{max}	R_z		T_p	S	S_m	R 468-1966

Fonte: Gonzáles (1995).

Este parâmetro é especificado em várias normas internacionais, apresenta várias vantagens, porém tem a desvantagem de não fornecer informações sobre a altura dos picos de rugosidade. Assim, foi criado um outro parâmetro para suprir esta deficiência que é o Rz (rugosidade média), também chamado rugosidade máxima. O qual fornece uma média da altura dos picos (MIGUEL, 1997).

Neste capítulo serão apresentados apenas os parâmetros constantes do sistema "M" ou da linha média. Dentre os quais, serão descritos somente o Ra e Rz, que foram os escolhidos para análise neste trabalho, por serem baseados na medida de profundidade da rugosidade e porque esses parâmetros fornecem valores médios, ou seja, apresenta um bom parâmetro estatístico que caracteriza a distribuição de amplitude, além do fato de que são os mais utilizados.

3.1.1.1 - Sistema "M" ou da Linha Média

Dentro da metrologia de superfície não se mede a dimensão de um corpo (ação que corresponde à metrologia dimensional), e sim os desvios em relação a uma forma ideal (forma perfeitamente plana, por exemplo). Desta maneira, tem-se que usar como linha de referência uma forma ideal ou uma forma próxima a isto, como ocorre na prática.

No sistema "M", a linha de referência utilizada é a *linha média*, que a norma NBR 6404:1988, define como sendo "*a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, colocada de modo que a soma das áreas superiores ,compreendidas entre ela e o perfil efetivo seja igual à soma das áreas inferiores*", figura 3.3.

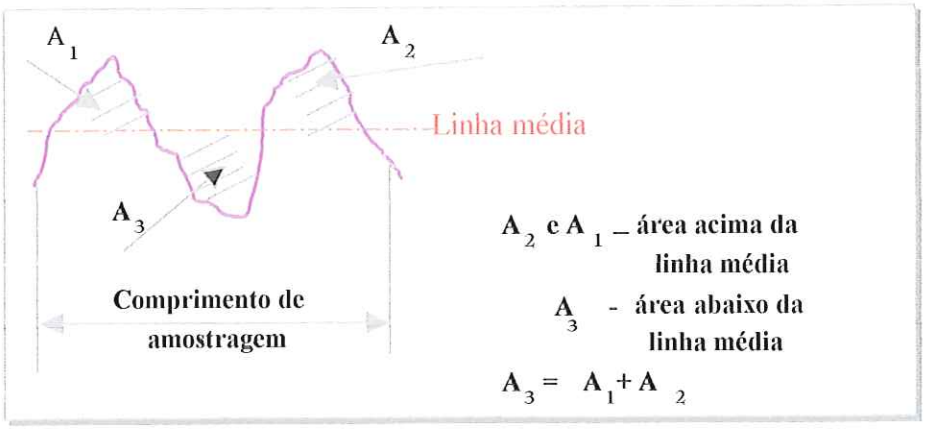

Figura 3.3 - Sistema "M" ou da linha média.

A linha média é traçada para cada *comprimento de amostragem* (Lc) – também conhecido como *cut-off*-, figura 3.4.

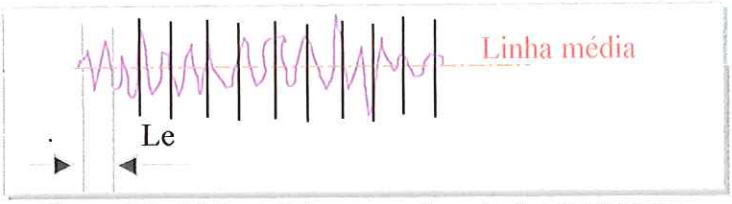

Figura 3.4 - Linha média e comprimento de amostragem.

Para separar erros de rugosidade dos erros de forma, é necessário a utilização de filtros. A transmissão de sinais elétricos do aparelho medidor de rugosidade, é bloqueado por um filtro que proibi a passagem de sinais abaixo de uma certa freqüência sobre um certo limite, filtrando assim, as ondas correspondentes aos erros de forma (THOMAS, 1974).

O comprimento de amostragem deve ser suficiente para avaliar a rugosidade, isto é, deve conter todos os detalhes representativos da rugosidade e excluir aqueles inerentes à ondulação. É de grande importância que esse comprimento de amostragem seja corretamente definido em relação ao tipo de rugosidade. De forma tal que, se uma linha média (reta), for traçada para cada comprimento de amostragem e posteriormente alinhadas, como resultado, tem-se o perfil original com a ondulação filtrada. Se, caso contrário, o valor deste comprimento de amostragem for maior que o necessário, incluirá valores do perfil de ondulação que influência os resultados da medição de rugosidade (MITUTOYO, 1991).

O *comprimento de amostragem* (Le), tem a função de atuar como filtro e não deve ser confundido com o comprimento ou *percurso de medição* (Lm), figura 3.5. Normas internacionais estabelecem cinco vezes o seu comprimento como mínimo para se realizar uma avaliação da rugosidade de uma superfície (GONZÁLEZ, 1995).

Existem aparelhos modernos para medição de rugosidade com contato através de apalpamento, que desconsideram um *trecho inicial* (Lv) e outro *trecho final* (Ln), no *percurso total de apalpamento* (Lt), com a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações do sistema, em especial as oscilações iniciais.

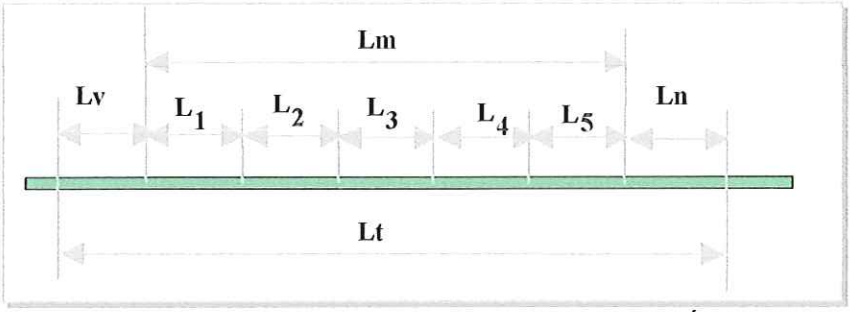

Figura 3.5 - Percurso de apalpamento e de medição (GONZÁLEZ, 1995).

Le = $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5$ = comprimento de amostragem (*cut-off*)

Lv = trecho inicial

Ln = trecho final

Lm = L1+L2+L3+L4+L5 = comprimento de medição

Lt = Lv+ Lm + Ln = percurso total de apalpamento

As tabela 3.2 e 3.3 mostram a avaliação para o parâmetro Ra e Rz, respectivamente, do comprimento de amostragem e a avaliação da medição.

Tabela 3.2 – comprimento de amostragem e avaliação para medição em Ra

Medição Ra (μm)	Comprimento de amostragem (*cut-off*) Le (mm)	Comprimento de medição Lm (mm)
(0,006) < Ra ≤ 0,02	0,08	0,4
0,02 < Ra ≤ 0,1	0,25	1,25
0,1 < Ra ≤ 2	0,8	4
2 < Ra ≤ 10	2,5	12,5
10 < Ra ≤ 80	8	40

Fonte: de acordo com a norma JIS BO601-1994.

Tabela 3.3 – Comprimento de amostragem e avaliação para medição em Rz

Medição em Rz (μm)	Comprimento de amostragem (*cut-off*) Le (mm)	Comprimento de medição Lm (mm)
(0,025) < Rz ≤ 0,10	0,08	0,4
0,10 < Rz ≤ 0,5	0,25	1,25
0,5 < Rz ≤ 10	0,8	4
10 < Rz ≤ 50	2,5	12,5
50 < Rz ≤ 200	8	40

Fonte: de acordo com a norma JIS BO601-1994.

Existem duas situações diferentes na seleção do valor de *cut-off* para efetuar a medição de rugosidade Ra:

1) Quando o perfil da peça é periódico, o valor de *cut-off* depende da distância entre os sulcos deixados pelo avanço da ferramenta no processo de usinagem, conforme tabela 3.4. (HIPÓLITO, 2005):

Tabela 3.4 – Valor do *cut-off*

Distância entre sulcos (mm)	*Cut-off* (mm)
De 0,01 a 0,032	0,08
Maior que 0,032 a 0,1	0,25
Maior que 0,1 a 0,32	0,8
Maior que 0,32 a 1	2,5
Maior que 1 a 3,2	8,0

Fonte: Hipólito (2005).

Esta classificação resulta da exigência de que o comprimento de onda limite seja no mínimo, 2,5 vezes maior que à distância entre sulcos e no máximo 8 vezes. Essa distância pode ser determinada a partir de um gráfico preliminar da superfície ou por meio de medição sobre a peça, por exemplo 10 sulcos para se determinar o espaçamento médio.

2) Quando o perfil é aperiódico o valor de *cut-off* tem relação com o grau de rugosidade média Ra a ser avaliado, conforme tabela 3.5. Estes perfis são normalmente resultantes de esmerilhamento, retificação, fresamento de contorno e frontal sem inclinação, alargamento, deformação, etc. Para definir o valor aproximado da rugosidade pode-se usar inicialmente um valor de *cut-off* também aproximado (geralmente usa-se o valor 0,8mm).

Tabela 3.5 – Valor do *cut-off*

Rugosidade Ra (μm)	*Cut-off* (mm)
Menor ou igual a 0,1	0,25
Maior que 0,1 a 2	0,8
Maior que 2 a 10	2,5
Maior que 10	8,0

Fonte: Hipólito (2005).

3.1.2 - Parâmetros Ra e Rz de medição da Rugosidade, baseados na Linha Média "M"

Os parâmetros Ra e Rz, baseados na linha média "M" e na profundidade da rugosidade, são normalizados pela NBR 6405:1988 – Associação Brasileira de Normas Técnicas (Rugosidade das Superfícies).

3.1.2.1 - Desvio Médio Aritmético ou Rugosidade Média (Ra)

Para o parâmetro Ra -rugosidade média-, existe dois outros termos: *arithmetic average* (AA), nos USA e *center line average* (CLA), na Inglaterra. Que é definido como sendo a média aritmética dos valores absolutos, das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição Lm.

Esta grandeza pode também ser definida como sendo a altura de um retângulo, cuja área seja igual à soma absoluta das áreas delimitadas entre o perfil de rugosidade e a linha média, equações 3.1 e 3.2, tendo por comprimento, o percurso de medição Lm, figura 3.6.

$$\sum A_s = \sum A_i \tag{3.1}$$

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_{u}^{L_m} |y| dx \tag{3.2}$$

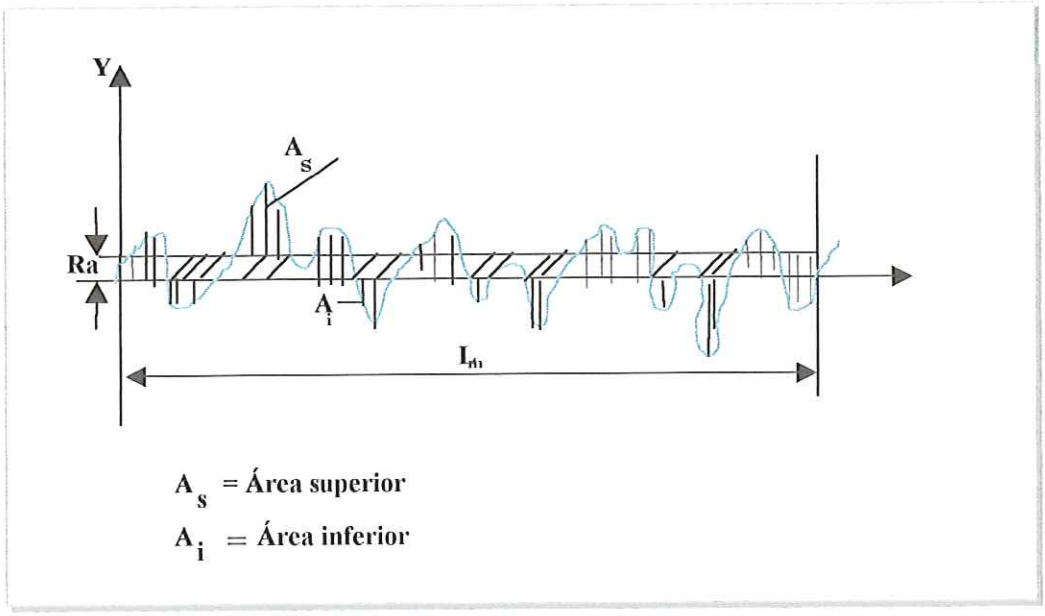

Figura 3.6 - Desvio médio aritmético, Ra (HIPÓLITO, 2005).

Nota: Por aproximação pode-se determinar o valor de Ra por média de um certo número de ordenadas dos pontos de perfil, conforme equação 3.3.

$$R_a = \frac{1}{n}\sum_{1=1}^{a}|y| \qquad (3.3)$$

onde:

y = ordenada

n = número de ordenadas consideradas (o valor de n é prefixado de acordo com o tipo de aparelho).

A medida do valor Ra pode ser expressa em µm ou in (sistema métrico ou sistema polegadas, respectivamente).

A fim de limitar o número de valores, a serem utilizados na definição dos parâmetros, em desenhos e especificações, a norma NBR6405:1988 recomenda os valores que estão indicados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Valores de Ra (µm)

0,008	0,040	0,20	1,00	5,0	25,0
0,010	0,050	0,25	1,25	6,3	32,0
0,012	0,063	0,32	1,60	8,0	40.0
0,016	0,080	0,40	2,00	10,0	50,0
0,020	0,100	0,50	2,50	12,5	63,0
0,025	0,125	0,63	3,20	16,0	80,0
0,032	0,160	0,80	4,00	20,0	100,0

Fonte: NBR 6405:1988.

⇨ A avaliação da rugosidade pelo parâmetro Ra, é empregada quando (HIPÓLITO, 2005):

-for necessário o controle da rugosidade continuamente nas linhas de produção, devido à facilidade de obtenção do resultado;

-superfícies onde o acabamento apresenta os riscos de usinagem bem orientados (torneamento, fresamento, etc.);

-superfícies que forem retificadas, brunidas, lapidadas, etc;

⇨ As vantagens da utilização deste parâmetro, Ra (HIPÓLITO, 2005):

-é o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo;

-é o parâmetro aplicável na maioria dos processos de fabricação;

-devido a sua grande utilização, quase a totalidade dos equipamentos apresentam este parâmetro;

-os riscos inerentes ao processo não alteram substancialmente o seu valor e

-para a maioria das superfícies a distribuição está de acordo com a curva de Gauss que caracteriza a distribuição de amplitude.

⇨ O parâmetro Ra também apresenta desvantagens (HIPÓLITO, 2005), tais como:

-o valor de Ra em um comprimento de amostragem representa a média da rugosidade, por isso se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média será adulterado, não representando fielmente o valor médio da rugosidade;

-o valor de Ra não define a forma da irregularidade ou perfil, dessa forma poderemos ter mesmo valor de Ra para superfícies de processos de acabamento diferentes e

-nenhuma distinção é feita entre picos e vales.

3.1.2.2 - Rugosidade Média (Rz)

É a média aritmética dos valores da *rugosidade parcial (Z)*, equação 3.4, ou seja, é a média das somas das ordenadas das cinco maiores reentrâncias e das cinco maiores protuberâncias em relação à linha média, figura 3.7. A letra *z* vem do alemão *zehn*, que significa dez, referindo-se à altura de dez pontos.

$$Rz = \frac{1}{5}\left(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5\right) \tag{3.4}$$

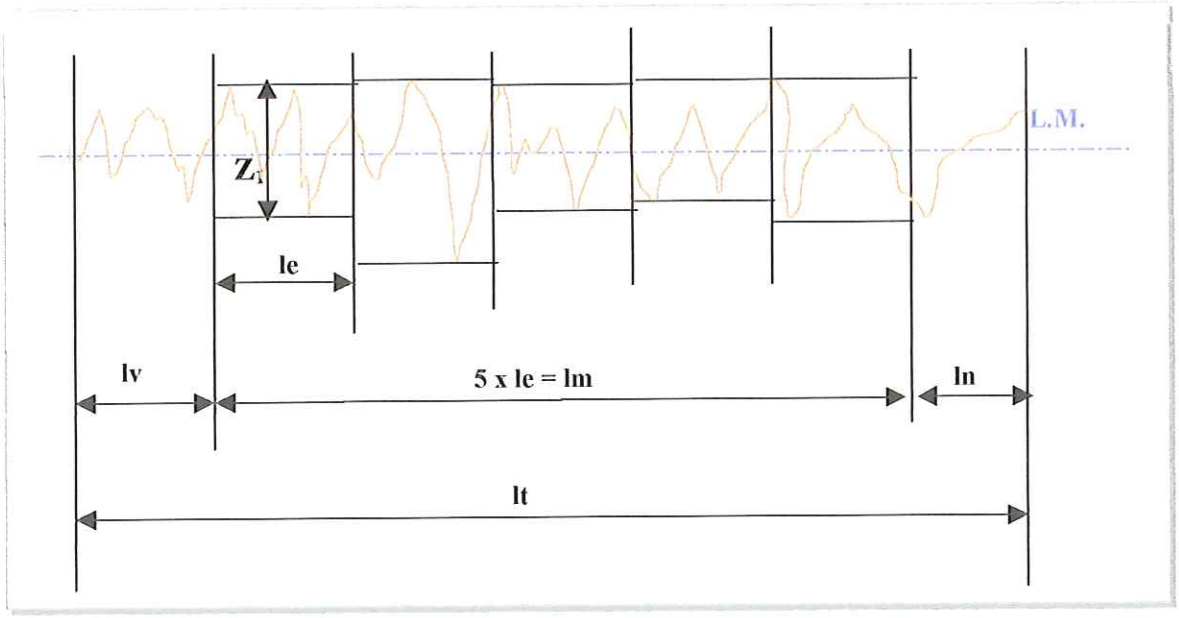

Figura 3.7 - Rugosidade média Rz (GONZÁLEZ, 1995).

Observação: **Rugosidade parcial (Z)** - é igual à soma das ordenadas dos dois pontos de maior afastamento acima e abaixo da Linha Média, existentes dentro do trecho correspondente a cada módulo de medição. Na representação gráfica do perfil, este valor corresponde à distância entre os pontos de máximo e mínimo do perfil, dentro do percurso correspondente a cada módulo de medição Le.

⇨ O parâmetro Rz, é utilizado quando (HIPÓLITO, 2005):

-quando pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada. Por exemplo, superfície de apoio e de deslizamento, ajuste prensados, etc e

-quando se tratar de superfícies onde o perfil é periódico e conhecido.

⇨ As vantagens do parâmetro Rz (HIPÓLITO, 2005):

-informar sobre a destruição média da superfície vertical,

-ser de fácil obtenção através de equipamentos que fornecem gráficos;

-em perfis periódicos define muito bem a superfície e

-quando houver riscos isolados, esses serão considerados apenas parcialmente, de acordo com o número de pontos "isolados".

⇨As desvantagens do parâmetro Rz (HIPÓLITO, 2005):

-em algumas aplicações essa consideração parcial dos pontos isolados não é aconselhável, pois um ponto isolado acentua somente em 20%, mediante a divisão de 1/5 e

-assim como o Rmax, não possibilita nenhuma informação sobre forma do perfil, bem como a distância entre as ranhuras.

A caracterização e quantificação da textura superficial são áreas de grande interesse e com inúmeros problemas (HANSEN et al, 2002). A mais de meio século que, superfície de acabamento é um assunto em voga, devido ao fato de que uma superfície usinada apresenta várias características geométricas, tais como: forma, ondas, rugosidade, aspereza, inclinação, e ângulo de cisalhamento. Estas características acabam se misturando umas as outras em um perfil de superfície. Devido a estas várias características geométricas, numerosas técnicas de medição surgiram para a caracterização da rugosidade.

3.1.3 - Medição da Rugosidade

Um dos primeiros instrumentos de medição de rugosidade disponível comercialmente, foi produzido por Tomlinson, no final dos anos 30. Uma espécie de agulha deslocava-se sobre a superfície da peça a ser medida, enquanto o movimento vertical era amplificado através de um mecanismo de alavancas de forma que o perfil de rugosidade pudesse ser gravado em um vidro com uma camada produzida por fumaça (semelhante a improvisação que é feita para se ver a eclipse). Com este instrumento era possível de se obter a distância entre os picos e vales da superfície. Mas não era um instrumento adequado para o chão-de-fábrica, era utilizado apenas em laboratórios. Desta forma, continuava o mesmo método até então utilizado, passar a unha sobre a superfície da peça para verificar a rugosidade, obviamente era um método bastante subjetivo. Assim, Rubert Melcrin, produziu uma série de superfícies usinadas que serviram como padrões comparativos. Porém, a inspeção realizada era a mesma, passando a unha sobre as superfícies para fazer a comparação. Até que surgiu mais tarde, o instrumento Rubert Melcrin, que usava uma fita fina de aço que era deslocada sobre a superfície da peça, detectando a resistência ao movimento devido à rugosidade superficial da peça (MIGUEL, 1997).

Somente no início dos anos 40 que a Taylor & Robson, na Inglaterra, introduziu no mercado o primeiro instrumento de medição de rugosidade superficial, denominado Talysurf 1. O instrumento consistia basicamente de uma haste que se deslocava sobre a superfície da peça, com um transdutor indutivo para medição dos deslocamentos verticais e um amplificador à válvula para ampliação do perfil de rugosidade obtida. Neste momento, a placa de vidro utilizada no instrumento de Tomlinson estava sendo substituída por um registrador gráfico do perfil de rugosidade. Este instrumento fornecia o valor da rugosidade média, conhecida como CLA. Na mesma época a empresa Perthern, desenvolvia na Alemanha um instrumento semelhante, com o mesmo princípio (MIGUEL, 1997).

No início a avaliação da superfície era qualitativa tridimensional, por meios visuais, táteis e ópticos. Depois, estes procedimentos foram substituídos por bidimensionais, usando perfis obtidos pelo perfilômetro mecânico (PM) (THOLATH & RADHAKRISHNAN, 1999). Porém, diante de tantas características geométricas, foram surgindo diferentes instrumentos e técnicas de medição. Algumas para capturar comprimentos de ondas. Microscópios foram usados para identificar micro rebarbas. Perfilômetro mecânico, para medir a rugosidade. Outros instrumentos especiais obtiveram informações de forma. Hoje, com a disponibilidade crescente de padrões e sensores sofisticados e computadores, é possível ter um aumento na capabilidade de medição. Assim, um típico PM, pode capturar rugosidade, ondas e forma (RAJA et al, 2002).

Como a engenharia das superfícies de precisão está ganhando importância na indústria, conseqüentemente, a qualidade das superfícies requeridas também está recebendo a mesma importância. Estas superfícies têm RMS (*root mean square*), ou rugosidade Rq (rugosidade média quadrática), com valores em nanômetros. Além disso, são numerosas as técnicas existentes para caracterização da rugosidade. As quais vão desde um instrumento tradicional PM, que copia o perfil da superfície (2D), até um moderno instrumento de medição tridimensional (3D), (BJUGGREN et al, 1997). Mas estas técnicas continuam sendo modificações técnicas daquelas do passado, quando eram realizadas usando nossos sentidos, sensações táteis e visuais. Estes métodos continuam sendo utilizados, porém com algumas modificações técnicas usadas hoje nas indústrias. Isto é, hoje, os instrumentos de medição de rugosidade superficial ou usa o método de contato, com a utilização de um apalpador, ou o método sem contato (LEACH e HEART, 2002).

O instrumento de controle da rugosidade PM é, atualmente, o mais utilizado para a medição de superfícies. Por este motivo, a norma ISO 3274 (1996), define vários elementos deste instrumento (LEACH & HART, 2002).

A ISO (*International Standatization Organization*) e padrões nacionais que padronizam a medição de superfície e parâmetros, também descrevem como determinar os parâmetros da rugosidade superficial usando instrumento PM. Prescreve várias condições sobre como um parâmetro de rugosidade deve ser medido. Estas condições incluem características dos filtros, geometria da ponta do apalpador, força de medição, e assim por diante.

Com o objetivo de superar alguns problemas, a norma define também, filtros de fases corretas, incluindo largura da faixa de sintonização. Esta decisão foi fundamentada no fato de que, por muito tempo não foram definidos os critérios para o *cut-off* da ondulação, que é uma significante fonte de diferenças entre medições. Fato que acarretava, normalmente, em alta dispersão nos resultados da medição de rugosidade, encontrada através de intercomparação. Por causa dos desvios da geometria do apalpador e o efeito da ressonância durante a medição. Por exemplo: - em uma intercomparação entre 28 laboratórios na Europa entre 1988 e 1992-. Os resultados para parâmetros comumente usados e normalmente difundidos, de 2 a 5% das regiões investigadas, os desvios passaram de 10% (HAITJEMA, 1999). Hoje, com os avanços na técnica de filtragem, é possível separar diferentes ondas sem distorções. O filtro de fase mais utilizado é o filtro *Gaussian*, descrito pela norma ISO 11562:1996 (RAJA et al, 2002. Assim, o instrumento de medição PM, pode ser considerado o mais utilizado para a medição e caracterização das superfícies técnicas.

É importante e necessária a prática metrológica adequada em todas as medições. Assim, para Lonardo et al (1996), ao escolher o melhor instrumento para uma aplicação específica, é

fundamental o conhecimento não só da resolução, mas também do alcance do mesmo. A figura 3.8, mostra as faixa de utilização dos diferentes métodos de análise de estados de superfície (rugosidade) em função do comprimento de onda (*cut-off*) e a amplitude da rugosidade. Por exemplo os PMs podem ter *cut-off's* variando de aproximadamente 0,002 mm a 10 mm e detectar amplitudes de 0,004 μm a 0,100 μm.

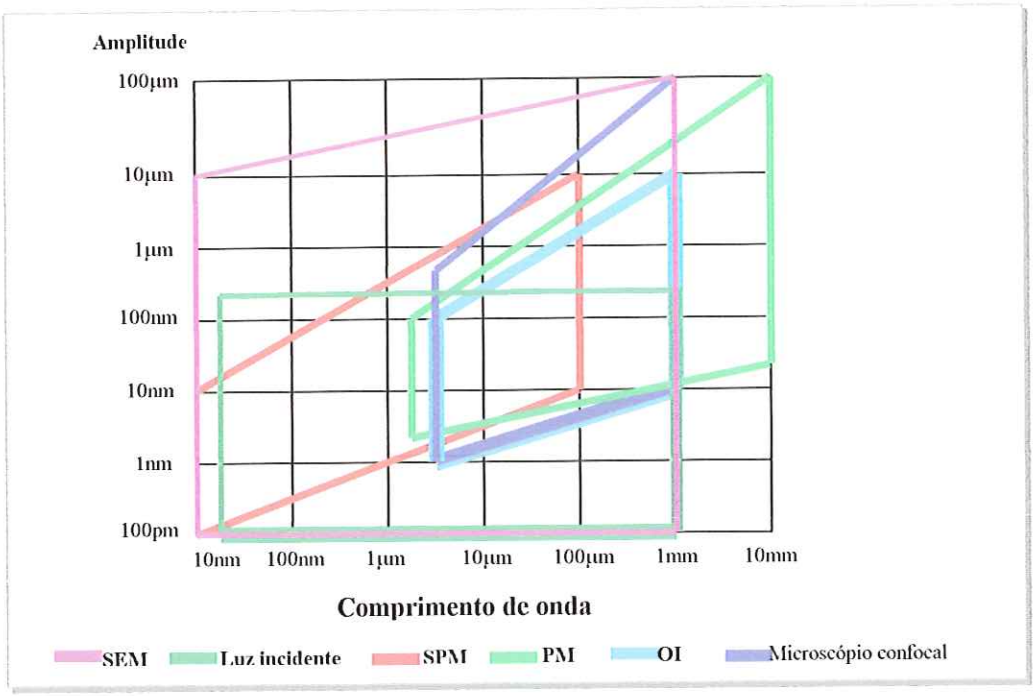

Figura 3.8 – Diagrama do comprimento de onda x amplitude (cortesia do PTB in De Chiffre et al, 2003).

O perfil da superfície de rugosidade é na realidade tridimensional. Então, somente através de medições em três direções e utilização de cálculos, é possível avaliar totalmente estas diversas características da estrutura da superfície (CHEN et al, 1999).

Uma medição do perfil da superfície é considerada bidimensional -2D-, quando em caracterização topográfica -superfície metrológica-, elevações desta superfície são adquiridas como uma função da posição ao longo da linha, onde (z=f(x)) e quando as elevações são adquiridas em uma grade retangular horizontal, onde (z=f(x,y)), são chamadas de tridimensional -3D- (LONARDO, 1996). Ao longo de cada um desses perfis, é feita a aquisição de um certo número de pontos que, dependendo do instrumento a ser utilizado, pode variar de algumas centenas, no caso de medição com contato, até milhares de pontos, na medição sem contato. Na verdade a principal diferença entre a medição em 2D e 3D é o uso de assessórios com deslocamento nos eixos X-Y, incluindo assim, um terceiro eixo de movimento.

3.1.3.1 – Medição da Rugosidade com Contato

O tipo de instrumento mais comum utilizado hoje nas indústrias, para a medição de rugosidade, é o instrumento por contato, mais conhecido por Perfilômetro Mecânico (PM). O qual consiste de um apalpador, que entra fisicamente em contato com a peça que está sendo medida; e este apalpador percorre a superfície da peça (LEACH & HEART, 2002). A NBR ISO 3274/2003, dá a seguinte definição "*Instrumento por contato: Instrumento de medição que toca a superfície com uma ponta de apalpação, detecta desvios da forma do perfil de uma superfície, calcula parâmetros e registra o perfil*". A figura 3.9 mostra um diagrama com as operações essenciais para um sistema de medição teoricamente exato. Teoricamente, porque a correlação específica entre as partes, é função do projeto do instrumento. Portanto, a configuração apresentada nesta figura, não pode ser considerada a única forma teoricamente exata.

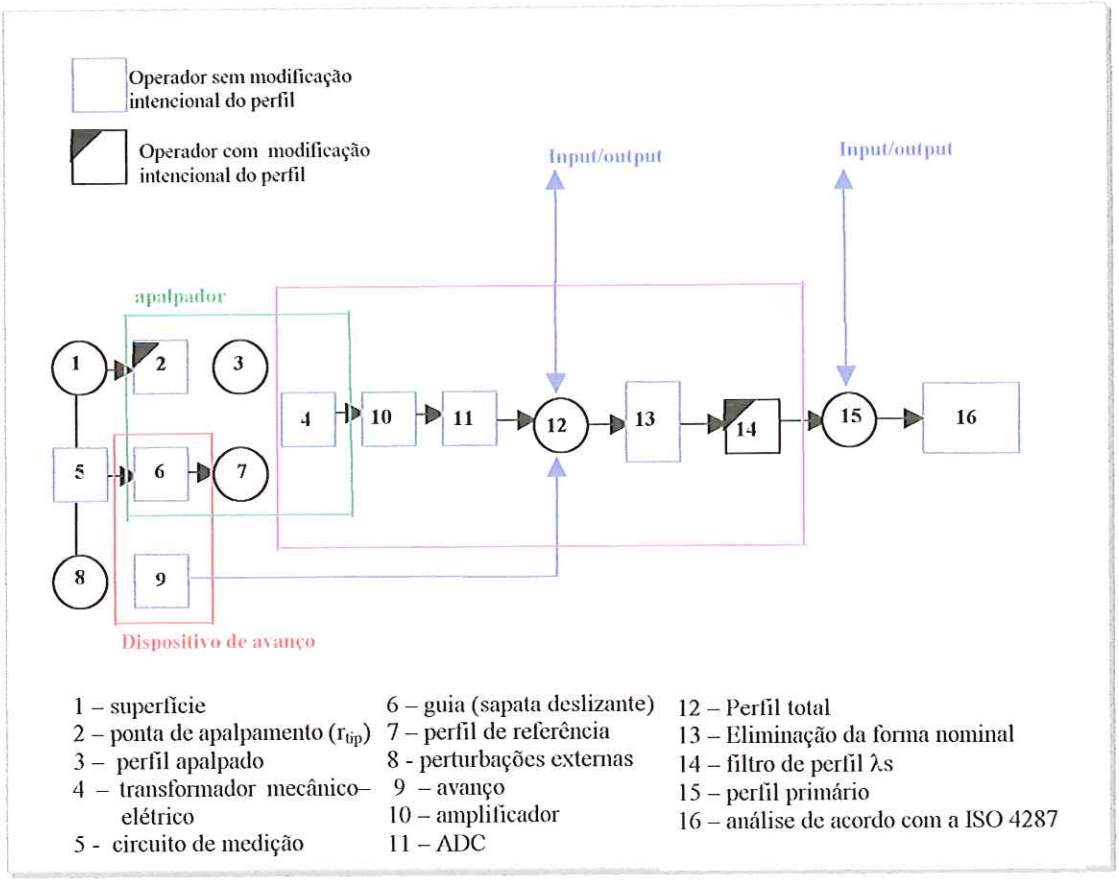

Figura 3.9 – Representação esquemática de um PM(NBR ISO 3274:2003).

A figura 3.10, mostra um exemplo de um instrumento de medição de rugosidade por contato, com o circuito de medição. Onde em (1) o dispositivo de avanço se aproxima da peça, (2) o sistema se ajusta ao corpo de medição vertical do instrumento, (3) executa a medição e (4) é o retorno.

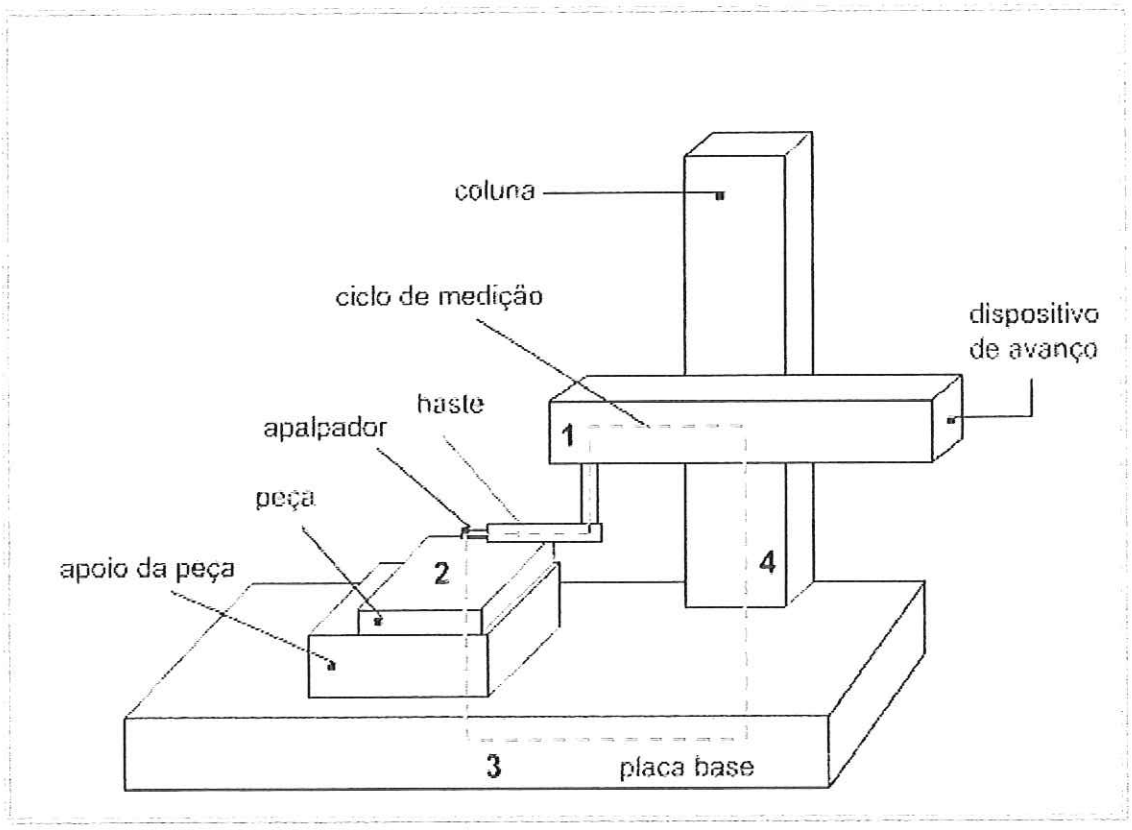

Figura 3.10 – Ciclo de medição de um PM (NBR ISO 3274:2003).

A haste se move horizontalmente sobre a superfície da peça, figura 3.9. Acoplado à haste está o apalpador e neste está a ponta de diamante. Esta possui um movimento vertical, que "copia" a superfície da peça. Um transdutor converte os movimentos verticais do apalpador, em sinais elétricos, com amplitude proporcional à altura das irregularidades. A freqüência do sinal elétrico, gerado pelo transdutor, será função do espaçamento das irregularidades e da velocidade do apalpador que percorre a superfície. Isto é, quanto menor for o espaçamento das irregularidades, para uma mesma velocidade de deslocamento do PM, maior será a freqüência do sinal elétrico. Analogamente, aumentando a velocidade de deslocamento do apalpador, haverá um aumento do sinal gerado.

Quanto à calibração deste instrumento, a norma NBR ISO 12179:2002, apresenta a calibração das características metrológicas, a qual deve ser realizada com auxílio de padrões de

medição. Desta forma, sendo o PM amparado por tais normas, o sistema metrológico mundial está oferecendo um sistema de medição uniforme, estável, confiável e reconhecido. Fazendo com que este instrumento de medição, durante a sua vida útil, forneça resultados que sejam reconhecidos como corretos (dentro de determinada incerteza) e confiáveis (MOSCATI, 2002).

O PM é sem dúvida o mais utilizado para avaliação de superfícies. Os resultados obtidos, são geralmente assumidos como uma referência para avaliação de outros métodos (LONARDO et al, 2002). Este instrumento permanece popular porque é conveniente para o uso. É, relativamente, insensível à vibração e a alguns tipos de contaminantes da superfície, além de permitir registrar diretamente a superfície mecânica (WANG & WHITEHOUSE, 1995).

Person (1999), avalia que dentre os instrumentos de medição de rugosidade, o PM é o mais importante. Este tem sido utilizado por muito tempo, gerando parâmetros tais como Ra e Rq, os quais são padronizados e largamente aceitos.

Porém, apesar do PM ser um instrumento que vem sendo utilizado há décadas, existe um número de problemas associado ou a operação do instrumento ou com a interpretação dos resultados (LEACH & HART, 2002). Um exemplo disso é o fato do instrumento possuir uma força estática de medição, a qual a ISO 3274:1996, especifica como sendo de 0,00075N, e que deve permanecer constante durante a medição (LEACH & HEART, 2002). Mesmo assim, esta é uma das dificuldades encontradas na medição de superfícies ultrafinas, como de metal mole e pastilhas de silício. Pois, conforme mostra a figura 3.11, o apalpador pode danificar a superfície da peça devido a esta força de contato, ainda associada ao atrito e também ao comportamento dinâmico do mecanismo do apalpador. Estes efeitos podem ser muito pequenos, mas podem conduzir alguma perda na fidelidade (WANG & WHITEHOUSE, 1995). Assim, devido ao contato, existe a possibilidade de danificar a superfície, e em detrimento disto, o resultado da medição. O qual poderá estar adquirindo o valor da superfície modificada e não da superfície original (LONARDO et al, 2002).

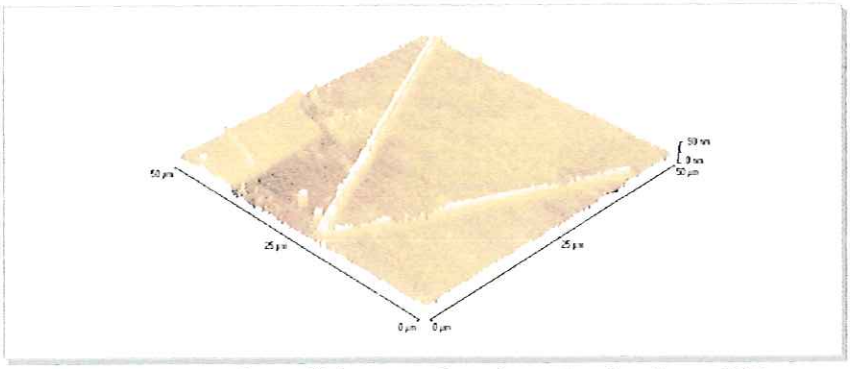

Figura 3.11 – Superfície marcada pelo apalpador de um PM (imagem adquirida com AFM).

Quanto à ponta de contato a norma NBR ISO 3274:2003, estabelece que deve ser um cone com ponta arredondada, sendo que o raio da ponta deve ser r_{tip} = 2μm, 5μm ou 10μm; e o ângulo do cone 60^0 ou 90^0. Porém, normalmente, estas informações constam apenas das especificações do fabricante; é extremamente raro ver um PM com um certificado do raio e do ângulo de conicidade da ponta do apalpador (LEACH & HEART, 2002). Assim, se variar o raio de curvatura da ponta de contato do instrumento, a profundidade medida *(h)* também varia (WHITEHOUSE in LONARDO et al, 2002).

Quanto à superfície do perfil, é impossível de ser traçada precisamente, na ordem de nanômetros, devido ao raio de curvatura da ponta do apalpador (TAKAYA, 1991). Porque, o perfil de uma medição terá uma forma que depende da forma da ponta de contato do instrumento utilizado. A figura 3.12(a), mostra um apalpador do PM, de forma cônica e a figura 3.12(b), mostra um raio de luz paralelo, em uma medição sem contato. O perfil da parte acima da reentrância é definido pela ponta do apalpador.

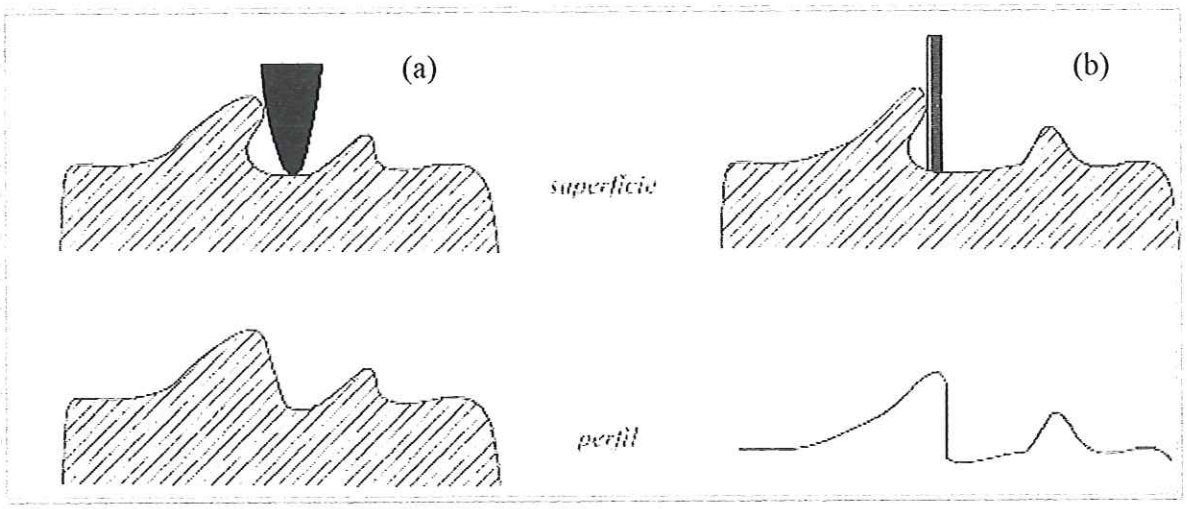

Figura 3.12 – (a) ponta cônica com PM (b) sonda cilíndrica (LONARDO, 2002).

No entanto, o fator, reentrância, não é detectado por nenhuma das duas formas de medição utilizada. Isto ocorre, devido ao ângulo α entre o eixo do apalpador e o local normal da superfície, ser maior que o ângulo limite. Se o valor de α for menor ou igual a 90°, o resultado vai depender da conicidade do apalpador, conforme figura 3.13 (LONARDO et al, 2002).

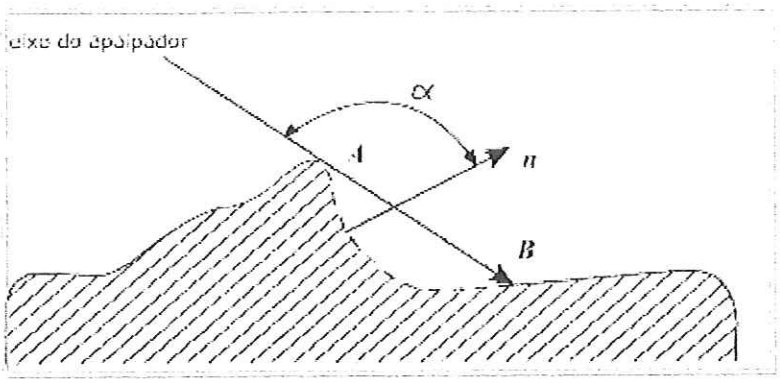

Figura 3.13 – Raio de incidência obliquo, formado pelo apalpador e a normal a superfície, não detectam parte do perfil (LONARDO, 2002).

A figura 3.14, mostra como o tamanho e forma do apalpador podem afetar a exatidão do perfil traçado.

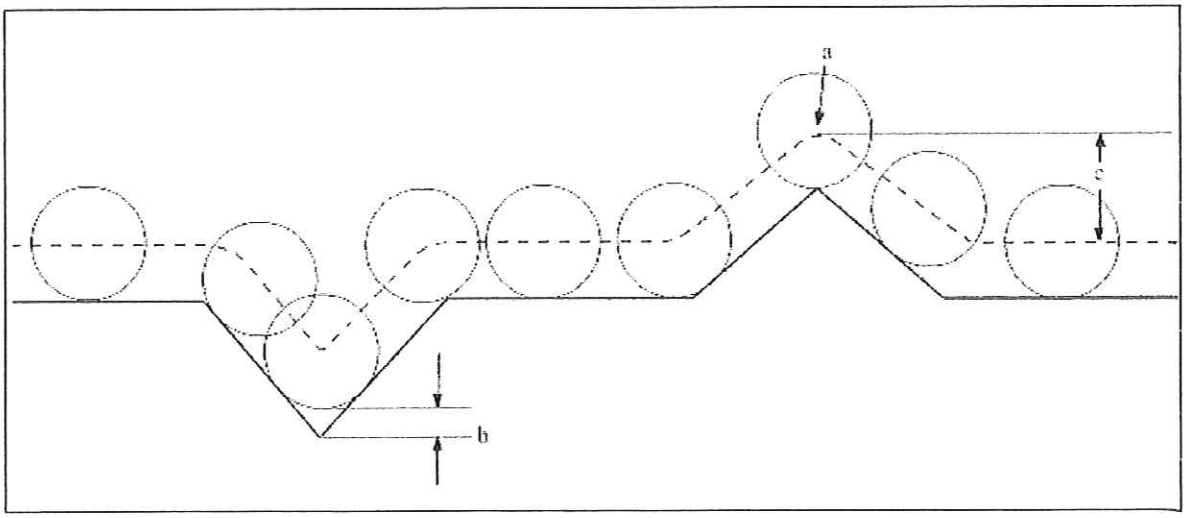

Figura 3.14 – Efeitos da forma e tamanho do apalpador na medição (LEACH & HART, 2001).

Observação: analisando a figura 3.5, conclui-se que:

1 - O tamanho do apalpador influencia no resultado da medição quando; a superfície possuir vales estreitos e o apalpador não puder penetrar até o fundo do vale. Assim sendo, quanto maior for o raio do apalpador, menor será a penetração, então o valor do parâmetro altura, da rugosidade, será menor que o valor verdadeiro.

2 - A forma do apalpador causa distorção da forma do pico. Quando a ponta esférica do apalpador passa sobre o pico, o ponto de contato se move ao redor do apalpador. O efeito causado no apalpador, resulta em um caminho, que mostra o pico mais redondo do que realmente é.

Entretanto o PM quando atinge o pico, ao fazer contato com a crista, dá a verdadeira altura medida do pico.

As observações 1 e 2, acima mencionadas, tem seus efeitos mostrados em **a** e **b**, figura 3.14. Em **a** o perfil obtido mostra, através da linha tracejada, que o pico é mais redondo do que ele é na realidade. E, em **b**, as profundidades dos vales são reduzidas. No entanto a altura do pico permanece inalterada.

Quanto a capabilidade da resolução lateral é restrita pelo lado da ponta do diamante que escaneia a superfície (a qual é um corpo tridimensional e portanto sofre influência do perfil nas três direções). Ou seja, o apalpador mecânico sofre restrições do estado da superfície nas três direções. Imagine uma imperfeição (cratera) que seja alongada na direção da medição (X) e mais estreita na direção (Y), essa restrição em Y é que vai limitar o quanto o penetrador vai "descer" na cratera, isto é, embora meça nas direções (X) e (Z), o estado da superfície em Y também influencia (restringe), daí a resolução lateral é igual a resolução em X, pois depende da ponta esfero/cônica do apalpador.

Diante do exposto, não resta dúvidas de que o PM continuará tendo um papel muito importante na engenharia para avaliação de superfícies técnicas. Porém, deve-se considerar que em determinadas situações este instrumento precisa ser utilizado com cuidado, especialmente quando superfícies moles estão sendo medidas.

Outro método de medição com contato, é através do microscópio de força atômica (AFM), através do qual pode-se obter resolução de sub nanometro. Entre as vantagens dos AFMs, tem-se a habilidade para caracterizar a imagem de quase qualquer material e, as medições comumente executadas com AFMs são caracterizadas pelo passo, altura (ou profundidade), largura (dimensão crítica) e rugosidade superficial. Microscópio de força atômica gera imagens tridimensionais, são utilizados em indústrias de semicondutores e como ferramentas para metrologia dimensional submicrométrica (DIXSON et al, 2000).

O mundo da ciência tem em suas mãos uma nova ferramenta para análise de superfícies. O AFM está sendo usado para resolver problemas dos mais diversos materiais que afetam a eletrônica, telecomunicações, biologia, substância química, automóvel, aeroespaço e indústrias de energia. Dentre os materiais investigados pode-se incluir camadas finas de filmes, cerâmicas, óculos, membranas sintéticas e biológicas, metais, polímeros e semicondutores. As publicações relacionadas ao AFM estão crescendo rapidamente desde seu nascimento (LI, 1997).

Dentre as vantagens do AFM estão: imagem tridimensional; não existe a necessidade de recobrimento condutivo; permite a quantificação direta da rugosidade da amostra; permite obter as medidas de propriedades mecânicas do material analisado em escala nanométrica; é utilizado para qualquer tipo de superfície e não danifica a superfície da peça analisada (HERRMANN et al,

2005). Esta técnica possibilita obter boa resolução em uma área varrida de 100μm x 100μm até 1nm x 1nm (CARNEIRO et al 1995).

O AFM é uma das doze técnicas da família de microscopias de varredura por sonda SPM -do inglês *Scanning Probe Microscopy*-, a qual se baseia em uma sonda que é colocada em contato direto com a amostra, varrendo a superfície a fim de mapear sua topografia e propriedades, obtendo imagens tridimensionais com resoluções na escala atômica. A sonda age como um sensor que mede a interação deste com a amostra. No caso do AFM, a sonda é formada pelo conjunto haste e agulha, conforme mostra a figura 3.15, e no STM - do inglês *scanning tunneling microscopy*-, a sonda é um fio de platina que termina em uma ponta muito fina.

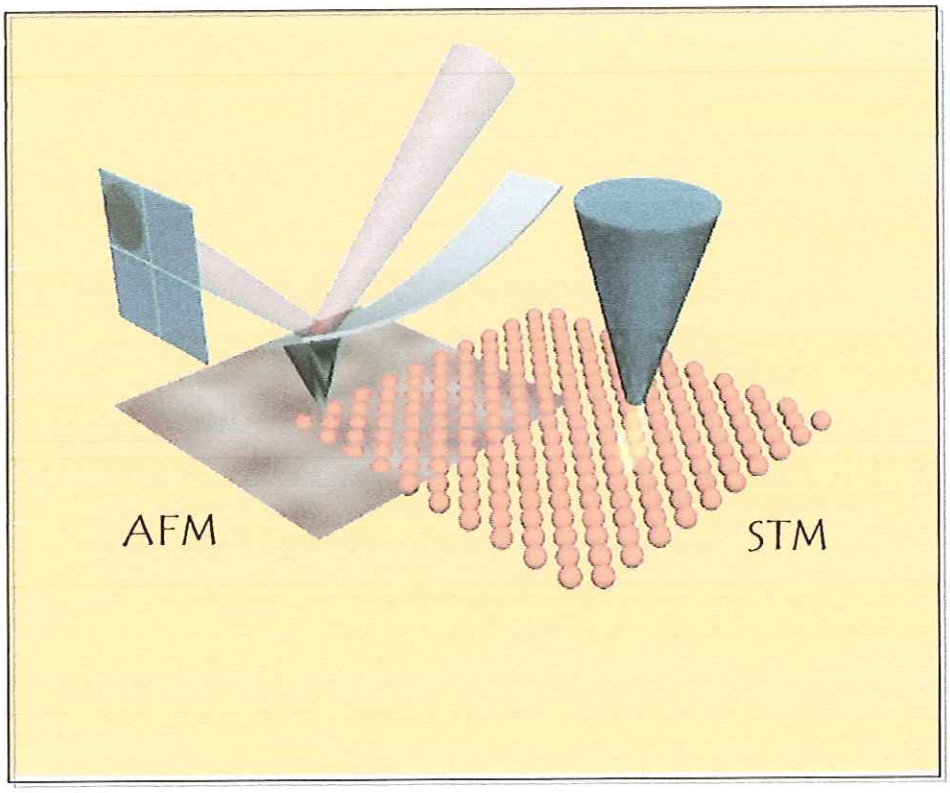

Figura 3.15 – Sonda do AFM e do STM (SBPC, 2005).

O tipo de interação medida define o tipo de SPM. Se o que estiver sendo medido for à força entre os átomos da ponta da agulha com os átomos da amostra, a técnica é denominada microscopia de força atômica (AFM). Quando estiver sendo medido a corrente de tunelamento entre os átomos, a técnica é denominada microscopia de tunelamento (STM).

A corrente de tunelamento é medida através de uma diferença de voltagem aplicada entre a agulha e a mostra, fazendo surgir uma pequena corrente elétrica de tunelamento cuja intensidade depende da distância entre a ponta e a amostra. Neste caso tanto a agulha quanto a amostra devem ser condutoras de eletricidade, restringindo assim o número de materiais a ser medido.

Quanto ao AFM, a agulha é montada na extremidade de uma haste flexível de aproximadamente 100 a 200 μm de comprimento, que se comporta como uma mola microscópica, a figura 3.16 mostra o esquema dos dois principais tipos de hastes. A força de interação entre a ponta da agulha e a superfície resulta na deflexão da haste, a qual pode ser medida por intermédio de um sensor óptico.

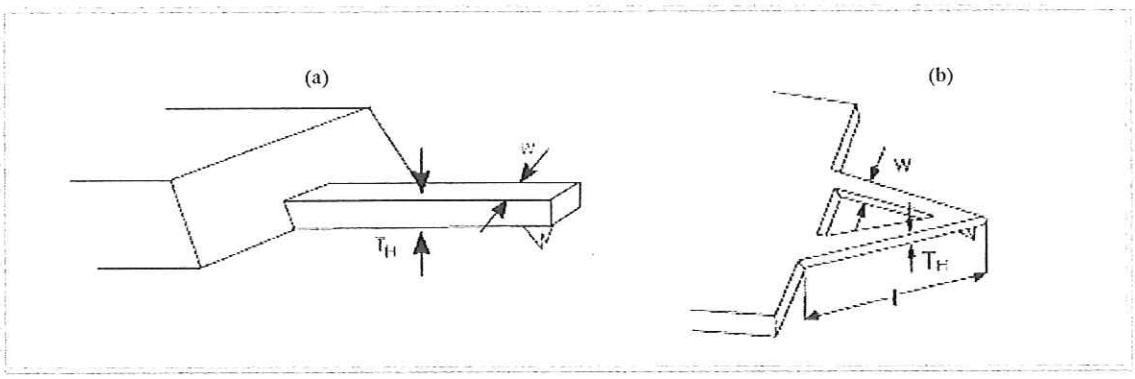

Figura 3.16 – Propriedades mecânicas das hastes de AFM, que podem ser em forma retangular "I" (a) ou em forma de "V" (b), com a ponta de prova no lado de baixo, na extremidade da haste (HERRMANN et al, 2005).

A imagem tridimensional da topografia de uma superfície da amostra, é obtida através da varredura do conjunto haste-agulha sobre a superfície em uma seqüência de linhas paralelas, mantendo-se constante a força de interação, como mostra a figura 3.17. A imagem tridimensional da topografia é obtida registrando-se o movimento da sonda nas três dimensões (HERRMANN, et al, 2005).

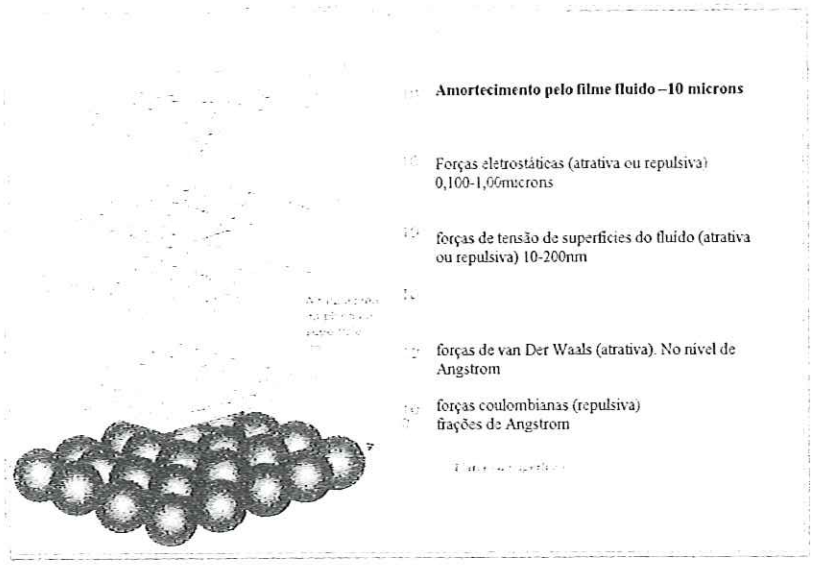

Figura 3.17 – Deflexão da haste devido a força de interação entre os átomos do apalpador e da superfície da peça (HERRMANN et al, 2005).

O princípio de trabalho do AFM se baseia na repulsão (regime de trabalho denominado contato ou DC) e/ou atração (regime de trabalho denominado não-contato ou AC) entre a superfície da amostra e a agulha. No modo contato, que é o caso do AFM utilizado neste trabalho, a pequena força repulsiva entre a agulha e a amostra, é da ordem de 10^{-6} a 10^{-9} Newton (N), como mostra a figura 3.17, a qual também apresenta as forças envolvidas entre a agulha e a amostra. Isso pode ser melhor entendido, pela compreensão da força de van der Waals (VDW), que são forças intermoleculares, que dominam a interação entre dois corpos eletricamente neutros e não magnéticos separados por uma ou várias dezenas de nanometros. Estas forças são consideradas atrativas. Ao diminuir a distância entre os dois corpos, em fração de Angstrons, as forças que irão dominar serão as forças repulsivas. Assim, a distância agulha/amostra, pode determinar o regime e o modo de trabalho do sistema (HERRMANN, 2005).

Quanto à imagem da superfície, se obtém com a sonda que varre a superfície da amostra e, variações na topografia dessa superfície resultam em deflexões da haste. O deslocamento da haste, que reflete a topografia da superfície, é detectado pela deflexão de um feixe de laser, que atinge a viga de balanço na parte superior (espelhada), que é refletido por outro espelho, figura 3.18, em direção a um detector composto por dois fotodetectores (a e b). A diferença de potencial (ddp), entre a e b (a-b) é transmitida para um computador permitindo que toda a área de varredura seja mapeada. Como (a-b) reproduz quaisquer modificações de curvatura ocorridas na haste, é possível de se obter as variações topográficas mapeadas.

EESC • USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

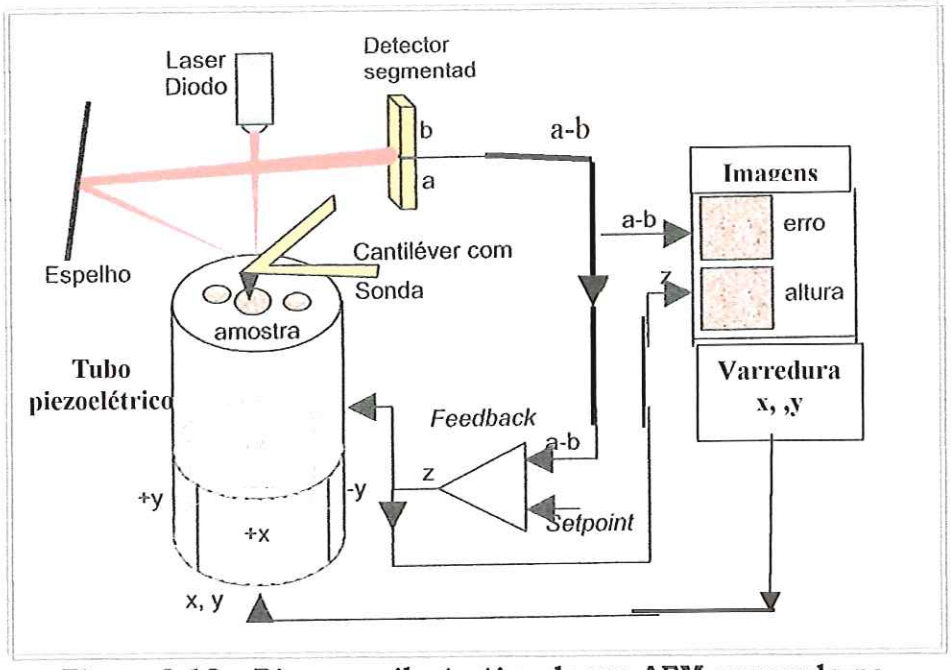

Figura 3.18 – Diagrama ilustrativo de um AFM operando no modo contato (HERRMANN et al, 2005).

A força de contato é mantida constante através de um circuito de realimentação (*feedback*), que controla a altura da base (z) que sustenta a amostra. Durante a varredura, o circuito de *feedback* reposiciona verticalmente a amostra, retornando sempre que necessário o valor a-b ao valor ajustado (*setpoint*). O sinal enviado pelo circuito de *feedback* à base também é enviado ao computador. Este sinal gera a imagem de altura. A base é composta por um tubo de material piezoelétrico, figura 3.18, recoberto interna e externamente por uma camada metálica (eletrodos). Os materiais piezoelétricos são cerâmicas que mudam suas dimensões em resposta a um campo elétrico aplicado. Assim, os eletrodos são responsáveis pelos movimentos nos eixos x, y e z, de acordo com a forma que eles são dispostos, expandindo a cerâmica em alguns sentidos e contraindo-a em outros. Um sistema de varredura bem construído pode gerar movimentos estáveis em escalas abaixo de 1 Angstrom (HERRMANN et al, 2005).

Com este tipo de microscopia pode-se estudar não só a topografia de superfícies, e as propriedades mecânicas, como por exemplo a rugosidade superficial, a dureza, rigidez, atrito, elasticidade e resistência da amostra. Ainda, permite o mapeamento de uma superfície em escala atômica e a manipulação de átomos ou moléculas que estejam nessa superfície. A figura 3.19 mostra a ponta da agulha agindo como um bisturi nanométrico, para a extração de DNA de uma região específica de um cromossomo.

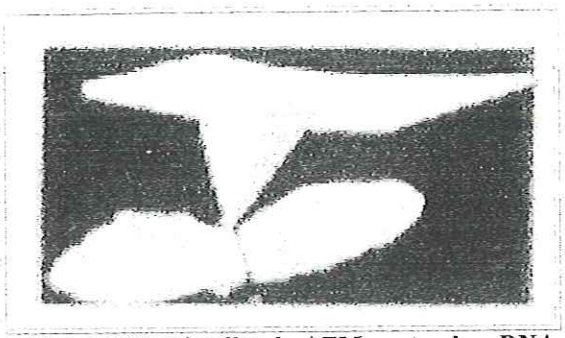

Figura 3.19 – Agulha do AFM contendo o DNA de um cromossomo(HERRMANN et al, 2005).

3.1.3.2 – Medição da Rugosidade sem Contato

Com o objetivo de se obter o resultado mais exato possível e, no desejo de suprir as deficiências ocasionadas pelo método com contato, são realizadas muitas pesquisas sobre o método de avaliação da rugosidade superficial sem contato.

Bjuggren et al (1997), em sua pesquisa propõem um método de controle de rugosidade sem contato através de um difusor infravermelho integrado. Esta técnica pode ser utilizada para medir rugosidade Rq de superfícies com comprimentos entre 2 e 100μm. Este método prevalece à tecnologia industrial de medidor de perfil mecânico. Além disso, retém características necessárias para ser desdobrado por inspeção de rugosidade superficial *on-line*.

A medição sem contato tem as desvantagens de levar muito tempo para ser realizada em uma pequena região da superfície, por sofrer forte influência da vibração durante a medição e é pela dificuldade em posicionar a peça -uma vez que é necessário posicioná-la paralela à mesa de medição, com uma alta exatidão de posicionamento, da ordem de 0,001 mm, sobre a superfície a ser medida- (TAKAYA, 1991).

Bowen & Wormington (1994), mostra que, medição da rugosidade superficial com difusão de raio-X pode ser realizada em laboratório em tempo compatível com o instrumento PM e com a alta qualidade da superfície.

Lonardo & Bruzzone (2000), em sua pesquisa investiga a possibilidade de utilizar um novo instrumento sem contato, baseado em holografia conoscópica, para medir a micro-geometria e a macro-geometria da superfície amostral. Também discute as influências deste método, nos parâmetros da rugosidade, além de apresentar um procedimento para caracterização e identificação de amostras de arestas.

Métodos ópticos sem contato, ao contrário de medições com contato, não danificam a superfície da peça, por este motivo, tem sido crescente a aplicação deste método para medição de rugosidade superficial. Em Lonardo et al (2002), o autor conclui que em métodos ópticos, embora o problema de dano da superfície seja eliminado, a exatidão da medição fica comprometida. Pois, neste caso, a mecânica do PM é substituída por um raio de luz, que é refletido pela superfície. A interação entre a luz e a superfície pode ser complexa, dependendo da ondulação da luz, da rugosidade da superfície e da natureza do corpo. A profundidade de penetração da luz também afeta a medição. A luz penetra na superfície por diferentes profundidades de acordo como o coeficiente de absorção do material. Em metais tanto o coeficiente de absorção quanto a refletividade são geralmente altos. Para outros materiais, ao contrário, ambos, refletividade e absorção são baixos, tal que uma larga fração de incidência da luz penetra dentro do material. Além disso, no caso de uma superfície com camadas, podem ocorrer múltiplas reflexões e indicar diferentes profundidades. Esta variabilidade de penetração afeta o caminho óptico e conseqüentemente o alcance da medição.

Dentre os métodos ópticos de medição da rugosidade, os mais comuns são: interferometria por espectro; varredura de medições e sistema focal. As principais vantagens do método óptico são: a área varrida pela medição; aplicabilidade no processo de medição e a rápida medição. A principal desvantagem é a ausência de parâmetros aceitos e a dificuldade na obtenção de Ra ou Rq, que são os parâmetros mais usuais (PERSON, 1999).

Como pode ser observado, o uso de instrumentos de medição sem contato está se tornando cada vez mais comum, devido ao fato de não danificar a superfície que está sendo analisada, no caso de materiais moles, também pela habilidade de gerar imagens em 3D e pela alta velocidade dos sistemas que estão surgindo, como o perfilometro por interferometria óptica (IO) - TalySurf CCI300-, da Taylor & Hobson, que executa uma medição em até 10 segundos. Possui uma câmera digital (CCD) na direção do eixo "Z", figura 3.20, que detecta franjas (relação entre fases e um espectro de luz branca), as quais são transmitidas para um computador para o processamento de dados, que transforma estas fases em um mapa tridimensional da superfície. A mesa de medição tem movimento rotacional e ajuste para nivelamento da superfície. Este instrumento mede qualquer tipo de superfície.

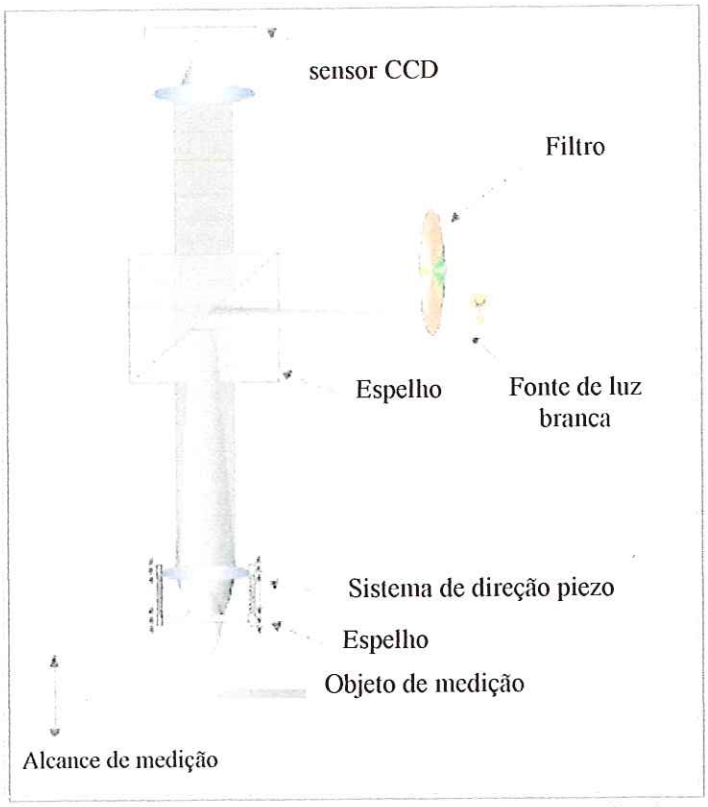

Figura 3.20 – Esquema do funcionamento do TalySurf CCI 3000 (catálogo da Taylor & Robson).

3.2 – Influências Metalúrgicas e Mecânicas na Integridade da Superfície

A produção de superfície metálica com qualidade óptica, e rugosidade Ra inferiores a 10nm apresenta ganhos significativos quando torneado com ferramenta de diamante, por poder eliminar os processos de polimento e lapidação (DE CHIFFRE, 2003). Portanto, para obter a superfície funcional desejada, é necessário um controle rígido da rugosidade.

Para Jasinevicius et al (1999), a microestrutura do material da peça pode afetar a função da superfície gerada. A orientação cristalográfica pode resultar em diferentes alturas do grão e refletindo-se por exemplo em variação na espessura do cavaco. Ainda neste artigo, o autor comenta como pode ser atenuado este efeito anisotrópico, sendo que uma das maneiras, comentada, depende da alteração da dureza do material.

Assim sendo, não só a rugosidade, como também as características metalúrgicas e mecânicas do material devem ser controladas para se obter a superfície desejada. Como exemplo a figura 3.21 mostra uma imagem da superfície de um material cobre, obtida com um Microscópio Óptico com Contraste de Interferência Nomarski, após um ataque químico. Pode-se observar que há

diferenças de alturas dos grãos na superfície, isso ocorre devido às diferenças na cristalografia dos grãos que em materiais policristalinos apresentam-se aleatoriamente orientados.

Essa diferença pode ser considerada de apenas alguns nanometros de altura. Todavia, como na usinagem de ultraprecisão a ferramenta de diamante irá passar várias vezes sobre o mesmo grão, essas diferenças podem afetar a qualidade da superfície.

Figura 3.21 – Imagem feita com Microscópio Óptico com Contraste de Interferência Nomarski, de uma amostra de cobre após ataque químico.

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA CAPABILIDADE DE CONTROLE DE SUPERFÍCIES TÉCNICAS USINADAS EM TORNO DE ULTRAPRECISÃO

Neste trabalho é avaliado o limite da exatidão de medição da rugosidade superficial, em peças usinadas em torno de ultraprecisão com ferramenta de diamante monocristalino, objetivando estabelecer uma metodologia que avalie a capabilidade do controle de superfícies técnicas de laboratórios de ultraprecisão.

Portanto, é necessário definir os elementos que estão envolvidos neste processo que, segundo De Chiffre (1994, 2000), há uma interação entre três elementos envolvidos com a superfície e para realizar um melhor relato dos problemas referentes à superfície, deve-se considerar tais elementos, que são: *geração da peça* (através de torneamento, retificação, lapidação, corte, etc.), *caracterização da rugosidade da superfície* (medição, visualização ou quantificação, etc) e *função da superfície* (brilho, aplicação, pintura, etc). Os três elementos são interelacionados e para cada caso específico é necessário considerar as peculiaridades cuidadosamente.

Segundo Komanduri (1997), para que um processo de usinagem de ultraprecisão seja considerado um sistema e não um componente individual, é necessário considerar: 1) as peculiaridades do material a ser usinado, que na prática tem algumas exigências estritas. 2) que a remoção do material seja muito pequena, às vezes em escala atômica. 3) minimizar ou eliminar fraturas. 4) que a superfície seja de acabamento fino. 5) a exatidão de forma e 6) a integridade de superfície. Para o autor todos os processos de usinagem devem constituir-se de um sistema similar ou aproximado ao descrito, com pequenas variações de processo para processo. Neste artigo

também é apresentado um diagrama conceitual para acabamento de ultraprecisão com abrasivo fino apresentado por Nogawa (1988).

Assim, com base no que foi mencionado acima, definiu-se, para este trabalho:

1) Quanto aos três elementos envolvidos:

- **Geração da peça** - será em torno de ultraprecisão com ferramenta de diamante monocristalino.
- **Caracterização da rugosidade da superfície** - medição da rugosidade com os aparelhos PM, AFM e IO.
- **Função da superfície** - acabamento espelhado.

2) Quanto ao processo, foi construído um diagrama conceitual, figura 4.1, baseado em Nogawa (1988) apud Komanduri (1997), que mostra o sistema de usinagem com torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante monocristalino para obtenção de superfície espelhada.

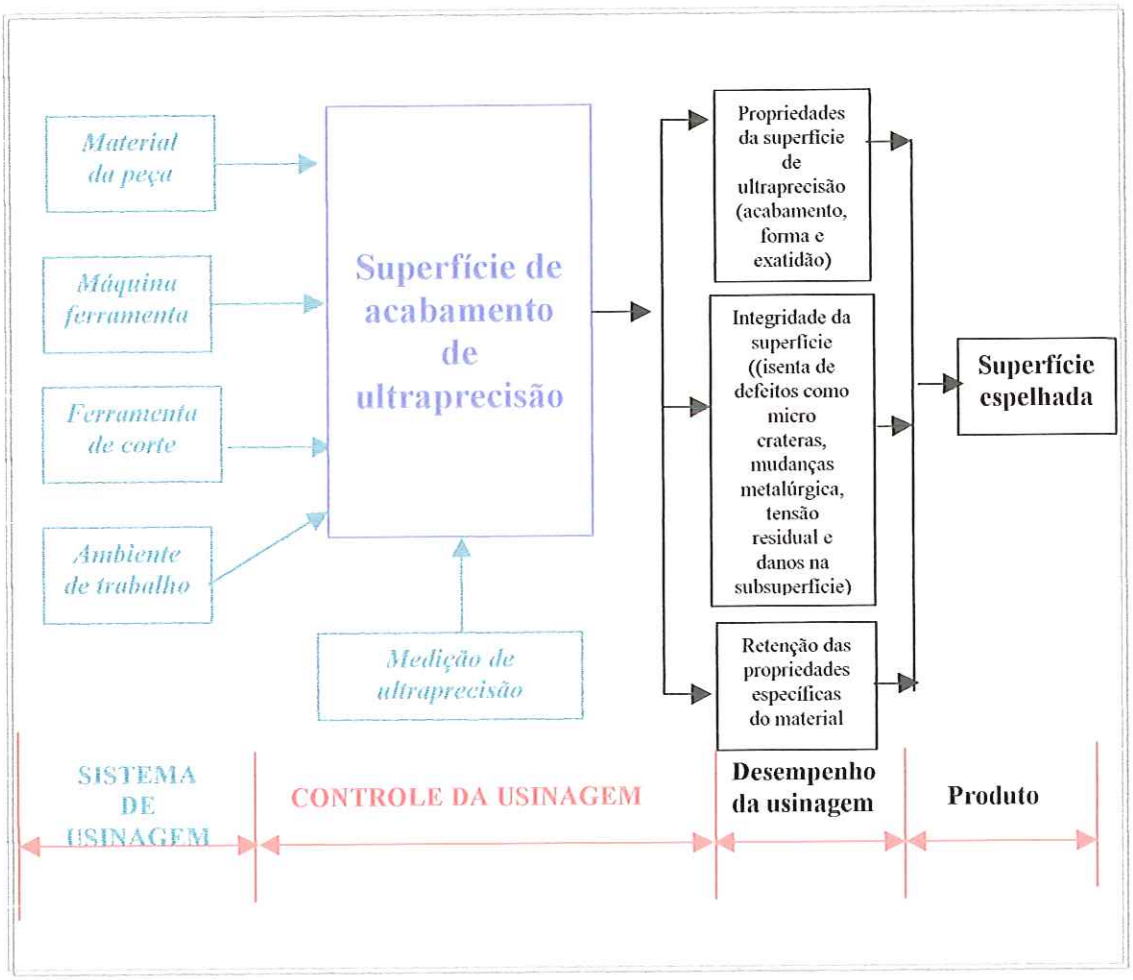

Figura 4.1 – Diagrama conceitual de um sistema de usinagem com torneamento de ultraprecisão com diamante.

Um diagrama espinha de peixe (causa e efeito), figura 4.2, mostra os fatores relevantes para o desenvolvimento da metodologia proposta, cuja finalidade é a avaliação da capabilidade de controle de superfícies de peças produzidas em torno de ultraprecisão.

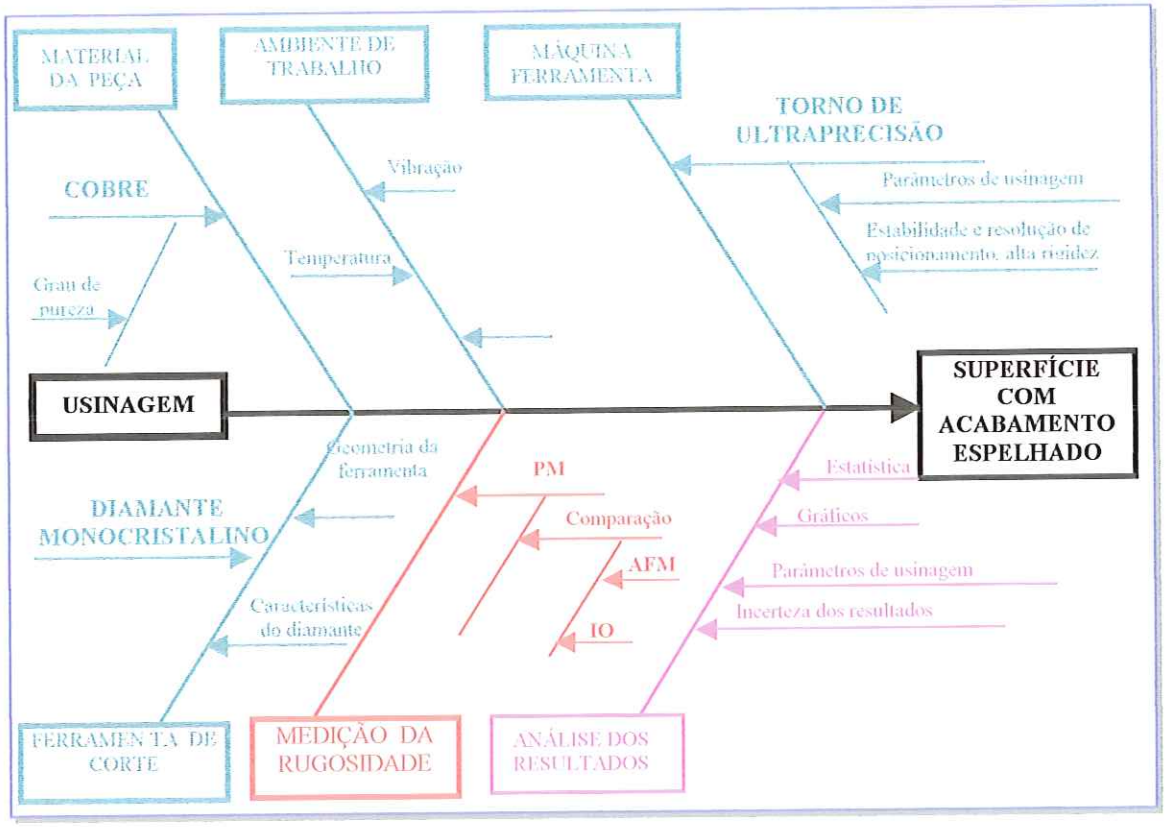

Figura 4.2 – Diagrama de causa e efeito.

Para melhor entendimento dos processos envolvidos na aplicação da metodologia proposta, foi adotada uma subdivisão do tema em 3 etapas: usinagem da amostra; medição da rugosidade superficial das peças e análise dos resultados.

4.1 – Geração da Peça

Dentre os possíveis métodos de fabricação dos corpos de prova (peças), foi escolhido o torneamento, por se tratar de um processo de usinagem que tem alto nível de utilização na produção industrial.

4.1.1 - Máquina-Ferramenta

Trata-se de uma Geradora de Superfícies Anesféricas (*Asferical Surface Generator*) ASG 2500 de fabricação Rank-Pneumo (atualmente TAYLOR & HOBSON PNEUMO), como mostra a figura 4.3, a qual está disponível no laboratório de usinagem de ultraprecisão da Escola de Engenharia de São Carlos.

Figura 4.3 - Geradora de Superfícies Anesféricas, ASG 2500 da Taylor Hobson Pneumo.

Esta máquina é projetada tanto para torneamento quanto para retificação de ultraprecisão. A base da máquina tem uma dimensão de 1066mm x 762mm, é usinada em ferro fundido e tratada termicamente para ficar livre de tensões residuais. Elimina as vibrações externas através de isoladores pneumáticos passivos, montados cinematicamente em uma estrutura soldada de aço. Os mancais do eixo-árvore são aerostáticos, o que dá à máquina precisão de giro, rigidez axial e radial compatíveis com o nível de precisão a que o equipamento se propõe. A máquina utiliza um CNC (Controle Numérico Computadorizado) da Allen-Bradley, modelo 8200, para controlar o deslocamento dos dois eixos da máquina (X e Z), com incrementos de 0,00001mm (10nm). Estes eixos são perpendiculares entre si e definem o plano no qual é gerada a peça. Também são suportados por guias hidrostáticas e suas posições são monitoradas por transdutores

interferométricos a *LASER*, da Hewlett-Packard, com retro-alimentação ao controlador. As peças a serem usinadas são fixadas à placa por meio de vácuo (cerca de -70 kPa). A máquina também possui um sistema de isolamento que permite controlar a temperatura do ambiente de trabalho em 20°C com uma variação 0,1°C e ainda, controlar partículas de até 1μm por meio de um filtro de ar.

4.1.2 - Ferramenta de Corte

A ferramenta utilizada é de diamante monocristalino, por ser considerada a melhor solução, até o momento, para produzir superfícies de acabamento com qualidade espelhada, em usinagem de ultraprecisão, é produzida pela empresa Contour Fine Tooling (dos Estados Unidos). Sua referência é NO60MG e seu código 31669, cujas características geométricas são apresentadas pela tabela 4.1. A máquina confere à ferramenta um controle ultrapreciso de posicionamento e elevada rigidez, que são requisitos necessários ao torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis.

Tabela 4.1 – Características geométricas da ferramenta de diamante monocristalino

Propriedades	Código NO60MG
Ângulo de saída γ	$-2,5^0$
Ângulo de folga α	10^0
Raio da ponta (R_ε)	0,50mm

Fonte: Catálogo Contour Fine Tooling.

4.1.3 – Material da Peça

A peça (corpo de prova) é de cobre, figura 4.4, com 99,99% de grau de pureza. Esta escolha se deve ao fato do material ser compatível com o diamante da ferramenta. Isto é, por ser de fácil usinagem; por apresentar baixa resistência ao escoamento; ter relativamente baixa reatividade química com o carbono do diamante e permitir fácil análise do estado da superfície gerada.

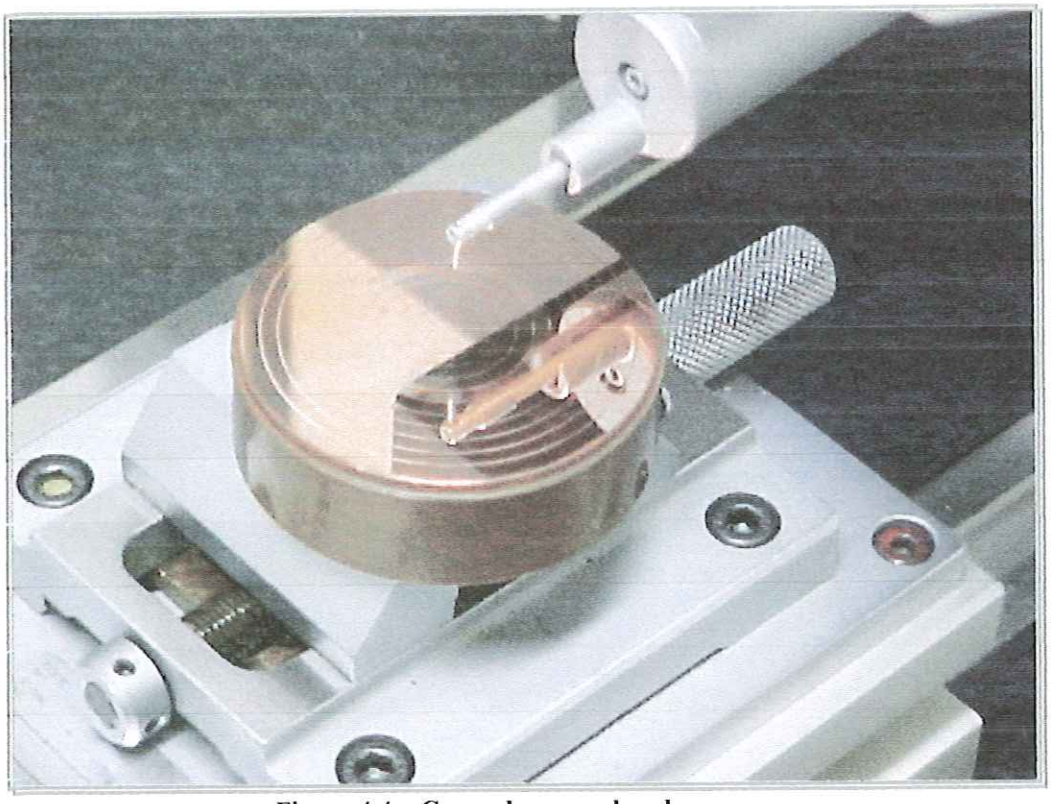

Figura 4.4 – Corpo de prova de cobre.

O corpo de prova tem diâmetro de 48mm e altura de 10mm. Foram usinados vários anéis, subdividindo a superfície em 12 partes iguais, cada parte é referida, neste trabalho, como setor e cada corpo de prova possui 12 setores de 2mm de largura, conforme mostra a figura 4.5.

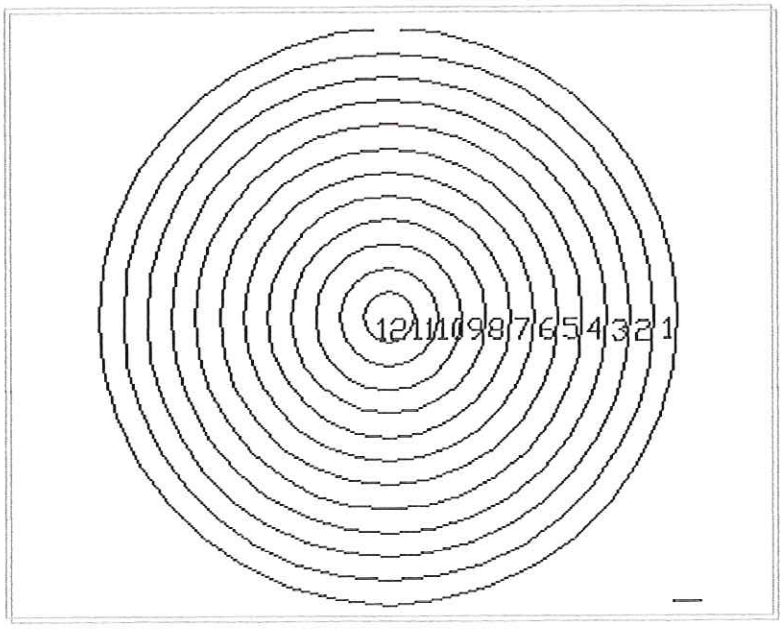

Figura 4.5 – Vista superior da peça usinada, mostrando os 12 setores.

Cada setor da peça 1 foi usinado com parâmetros de usinagem escolhidos aleatoriamente, de acordo com os dados na tabela 4.2. A tabela 4.3 mostra os parâmetros de usinagem da peça 2, cujos valores foram previamente testados e recomendados por König et al (1999).

Tabela 4.2 – Parâmetros de usinagem da peça 1

Setor	Parâmetros de corte	
	Profundidade ap (μm)	Avanço f (μm/rev)
1	10	10
2	10	15
3	10	15
4	10	15
5	10	10
6	10	10
7	5	25
8	15	20
9	20	15
10	25	15
11	50	10
12	20	20

Tabela 4.3 – Parâmetros de usinagem da peça 2

Setor	Parâmetros de corte	
	Profundidade ap (μm)	Avanço f (μm/rev)
1	2	50
2		25
3		20
4		15
5		10
6		5
7	1	50
8		25
9		20
10		15
11		10
12		5

4.1.4 – Imagem Fotográfica da Superfície da Peça

A superfície da peça 1 foi fotografada, antes de realizar as medições de rugosidade superficial, para obtenção de uma análise das superfícies topográficas. Podendo assim, verificar se há alguma irregularidade quanto à presença de crateras, trincas, etc. Para tanto utilizou-se o microscópio vertical, modelo Axiotech Hal 100, da Carl Zeiss – Alemanha-, figura 4.6. O qual, dentre as suas características possui uma câmera para obtenção de foto/vídeo, que possibilita a obtenção de fotos-micrográficas. Este aparelho foi disponibilizado pelo laboratório de Otmização de Processos de Fabricação do Núcleo de Manufatura Avançada da USP de São Carlos, ao qual pertence.

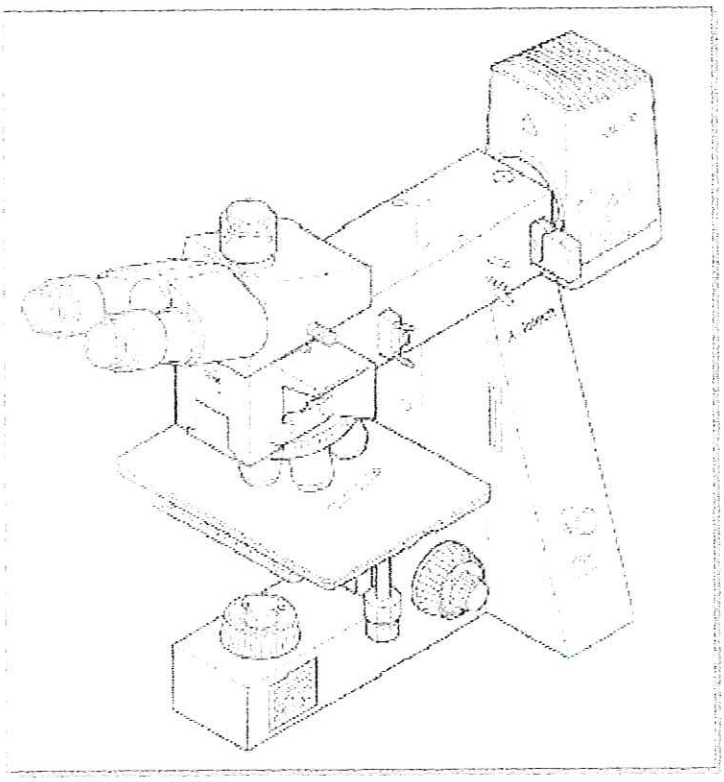

Figura 4.6 – Microscópio Vertical, modelo Axiotech Hal 100, da Carl Zeiss.

4.2 – Caracterização da Rugosidade Superfícial

As medições da rugosidade superficial da primeira amostra (peça 1) foi realizada com o perfilômetro mecânico (PM), por apalpação. A seguir foram realizadas medições, com os

instrumentos: Por interferometria óptica (IO) e dois aparelhos AFMs, modo contato, por estes tratarem de métodos que não alteram a superfície usinada durante a medição.

4.2.1 – Medição da Rugosidade Superficial com o Perfilômetro Mecânico (PM)

O rugosímetro PM, de fabricação da Mitutoyo, série SV-C500, figura 4.7, foi disponibilizado pela Mitutoyo do Brasil, para a realização das medições. O instrumento mede a textura e a rugosidade superficial. Acoplado ao instrumento, há um computador, uma impressora gráfica e uma tela colorida. Os dados obtidos podem ser processados e impressos de forma gráfica, visualizados pelo usuário através da tela colorida, e salvos em um disquete. As especificações da máquina são apresentadas conforme tabela 4.4.

Figura 4.7- Rugosímetro SV-C500, da Mitutoyo.

Tabela 4.4 – Especificações do rugosímetro SV-C500

Resolução	**Eixo X**	0,1μm
	Eixo Z	0,005μm (5nm)
Força de medição		3,9mN (0,4gf)
Apalpador		Ponta de diamante Conicidade 90^0, raio da ponta R 5μm
Velocidade de medição		0,1mm/s ~ 2mm/s
Velocidade de retorno		5mm/s
Alcance em (Z)		600μm
Alcance em (X)		200mm

Fonte: Manual do rugosímetro SV-C500 da Mitutoyo.

4.2.2 - Medição da Rugosidade Superficial por Interferometria Óptica (IO)

O Interferômetro Óptico utilizado é da marca Taylor Hobson, modelo Talysurf CCI3000, figura 4.8, o qual mede o perfil da superfície em 3D, sem contato e pertence à Empresa Taylor Hobson que disponibilizou o equipamento para a realização deste trabalho.

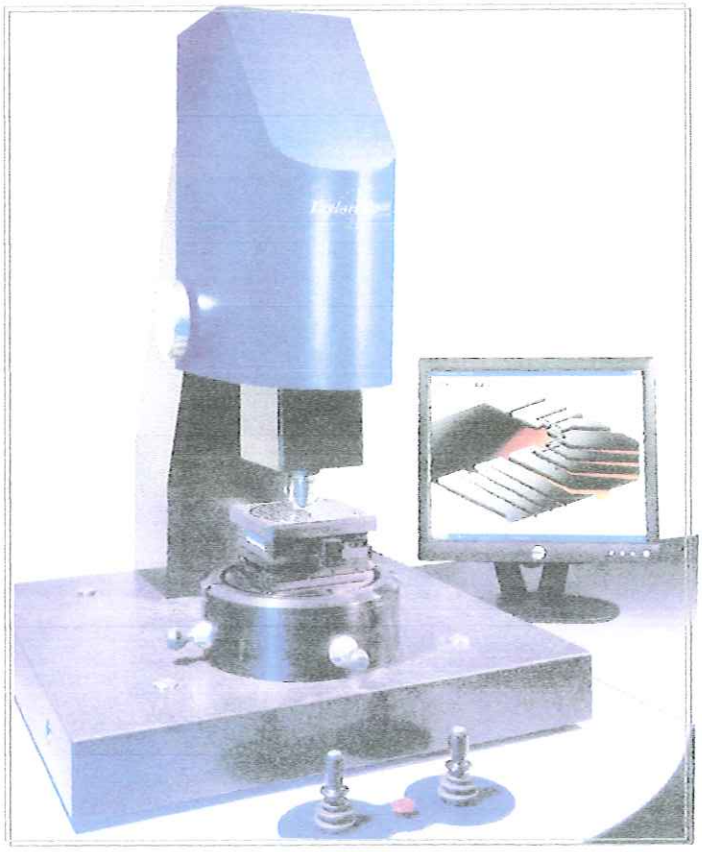

Figura 4.8 – Talysurf CCI 3000.

O aparelho é considerado um avanço na medição interferométrica, ainda não existe nenhum no Brasil. Fornece os resultados em segundos, sendo estes resultados uma combinação da qualidade da imagem da superfície obtida pelo microscópio, com a exatidão da capabilidade de um perfil da superfície. A tabela 4.5, apresenta as especificações técnicas do equipamento.

Tabela 4.5 – Especificações técnicas do TalySurf CCI 3000

Alcance vertical (Z)	400 μm
Resolução vertical	0,1Å
Resolução lateral (X,Y)	0,36μm (max)
Alcance de medição (X,Y)	$0,36mm^2$-$7,0mm^2$
Repetibilidade da superfície em RMS (Z)	0,03Å
Velocidade percorrida na vertical (max)	7μm /segundos
Peso da amostra (max)	10kg
Tamanho da amostra (max)	X e Y= 300mm; Z=200mm
Temperatura/umidade (ambiente)	10-30°C/ 80% - não condensa
Vibração	Inclue um sistema pneumático anti-vibração

Fonte: Catálogo da Taylor Hobson.

4.2.3 - Medição da Rugosidade Superficial com AFM

Os microscópios de força atômica utilizados neste trabalho, são de fabricação da Topometrix. Um deles, modelo Explorer (TE), pertence ao laboratório de química da USP- São Carlos e o outro, modelo Discovery TMX 2010 (TD), figura 4.9, pertence a EMBRAPA – Instrumentação Agropecuária-, de São Carlos, que disponibilizaram seus aparelhos para a realização deste trabalho. Este tipo de microscopia permite o mapeamento topográfico de superfícies, com deslocamentos de 1 nanometro (1nm). A tabela 4.6, apresenta as características técnicas dos AFMs, TE e TD.

Figura 4.9 – Topometrix, modelo Discovery TMX 2010.

Tabela 4.6 – Características do Topometrix TMX 2010 e Topometrix Explorer

Resolução X, Y	0,1 – 1,0nm
Resolução Z	0,01nm
Alcance em X, Y	0,20 – 0,50μm
Características da amostra	Amostra não deve ter variações grandes de altura, com dimensão máxima de 10 x 10 x 10mm
Aplicações	Qualquer superfície

Fonte: Manual da Topometrix.

4.2.4 – Alcance versus Resolução dos Três Equipamentos

O gráfico da figura 4.10 mostra uma comparação do alcance versus resolução, entre os três equipamentos descritos acima – perfilômetro mecânico, interferômetro óptico e o microscópio de força atômica-.

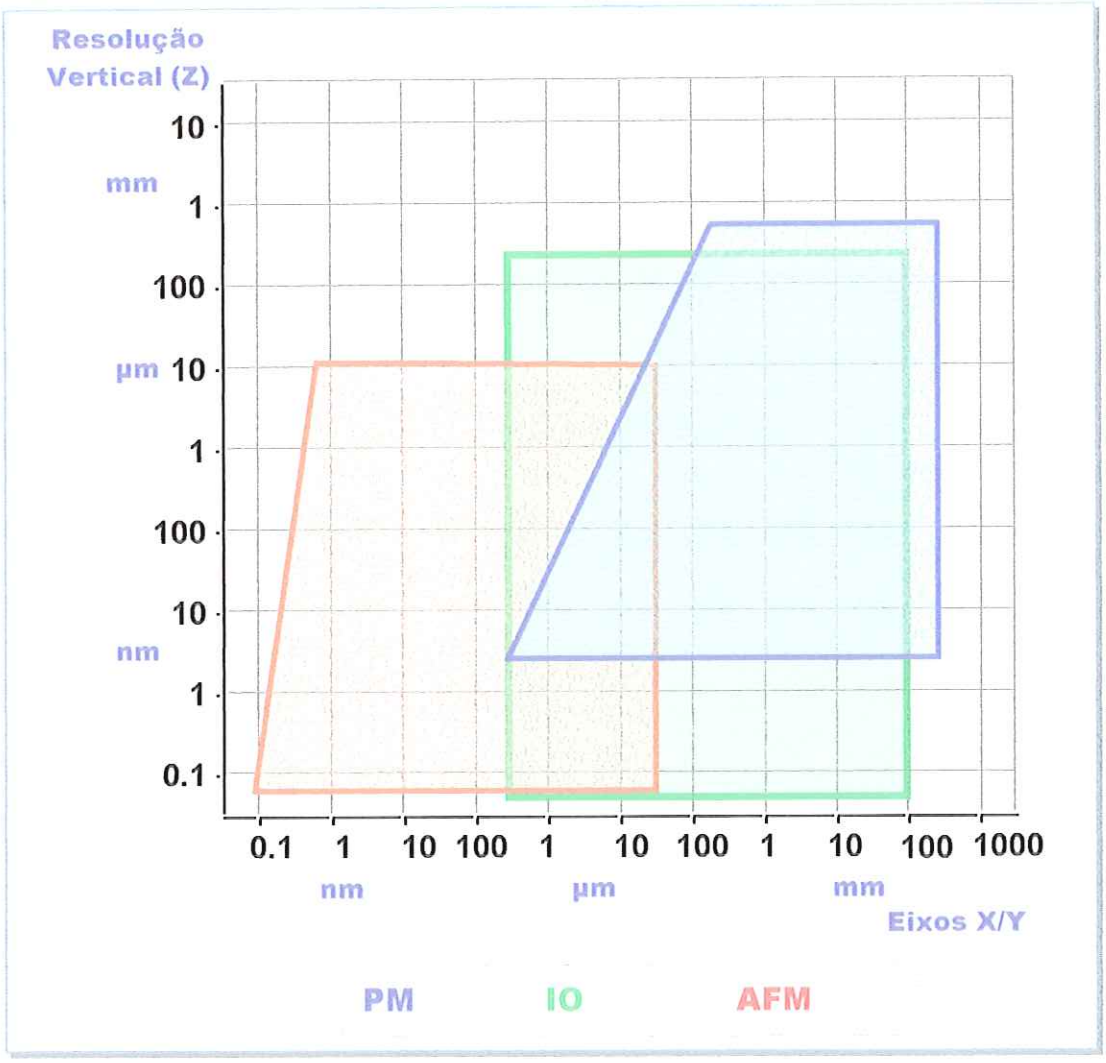

Figura 4.10 – Diagrama do alcance x resolução.

4.3 – Função da Superfície

Através da análise dos resultados é que poderá ser avaliado o objetivo -obter uma superfície espelhada-. O cobre é um dos metais não-ferrosos mais utilizados na fabricação de superfícies espelhadas, a qual exige da fabricação:

- refletividade, que deve ser da ordem de 98% ou maior e
- desvio de forma e acabamento, os quais devem respeitar uma faixa específica, dependendo da aplicação. A tabela 4.7, mostra este grau de exigências para componentes ópticos em função do comprimento de onda da luz.

Tabela 4.7. Exigências de qualidade de componentes para aplicações ópticas

	Comprimento de onda (λ)	Desvio de forma (λ/10)	Rugosidade (λ/100)
Microondas	≈ 300 μm	< 30 μm	< 3 μm
Luz infravermelha	≈ 3 μm	< 0,3 μm	< 0,03 μm
Luz visível	≈ 0,5 μm	< 0,05 μm	< 0,005 μm

Lembrando que neste trabalho o controle está voltado apenas para a rugosidade superficial. Então, através da análise dos resultados será avaliada: 1) a exatidão das medições, obtidas com o PM. 2) a capabilidade de controle das peças produzidas no laboratório de Usinagem de Ultraprecisão e Nanometrologia.

CAPÍTULO V

DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da metodologia proposta para o levantamento de dados necessário à avaliação da capabilidade de controle de peças produzidas em laboratório de usinagem de ultraprecisão, a qual é apresentada em duas partes:

1) Peça 1 (corpo de prova):
   - 1ª. - imagens fotográficas das superfícies da peça usinada;
   - 2ª. - resultados das medições da rugosidade com o aparelho PM, medição mecânica por contato;
   - 3ª. -resultados das medições da rugosidade com os aparelhos TE e TD, microscópio de força atômica (regime contato) e
   - 4ª. - resultados das medições da rugosidade com o aparelho IO, medição por interferometria óptica, sem contato.
2) Peça 2 (corpo de prova):
   - 1ª. - imagens fotográficas das superfícies da peça usinada;
   - 2ª. - resultados das medições da rugosidade com o aparelho PM, medição mecânica por contato;
   - 3ª. -resultados das medições da rugosidade com os aparelhos TE eTD, microscópio de força atômica (regime contato) e
   - 4ª. - resultados das medições da rugosidade com o aparelho IO, medição por interferometria óptica, sem contato.

Observação: a rugosidade medida, tanto na peça 1 como na peça 2, foi realizada no sentido radial da peça.

5.1 - Peça 1

Neste item serão apresentados os dados obtidos com a peça 1.

5.1.1 - Imagens Fotográficas das Superfícies da Peça Usinada

Para a realização de uma análise da superfície topográfica, a superfície da peça foi fotografada, após ter sido usinada e antes que as medições da rugosidade superficial fossem realizadas. Podendo assim, verificar se há alguma irregularidade quanto à presença de crateras, trincas, etc, conforme mostram as imagens de 5.1 a 5.12 , as quais se referem aos setores 1 até 12, respectivamente.

Observação: As manchas de formato arredondado que aparecem nas fotos, ora mais claras ora mais escuras, são fungos existentes na lente do microscópio.

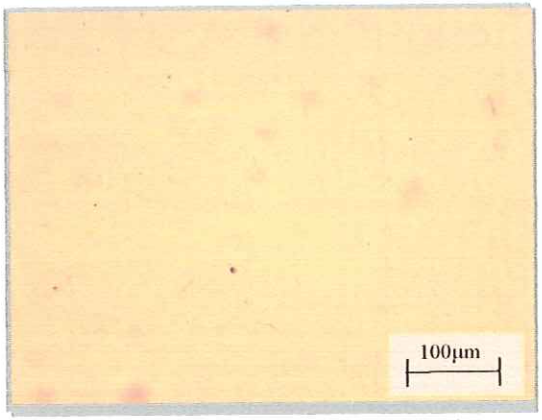

Figura 5.1 – foto do setor 1.

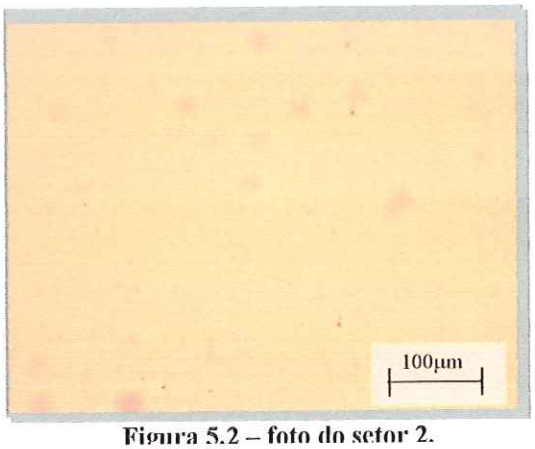

Figura 5.2 – foto do setor 2.

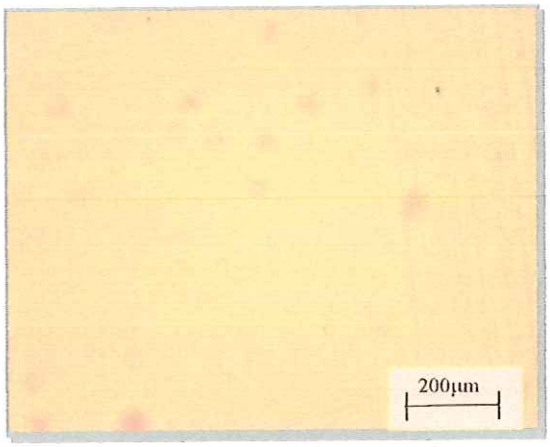

Figura 5.3 – foto do setor 3.

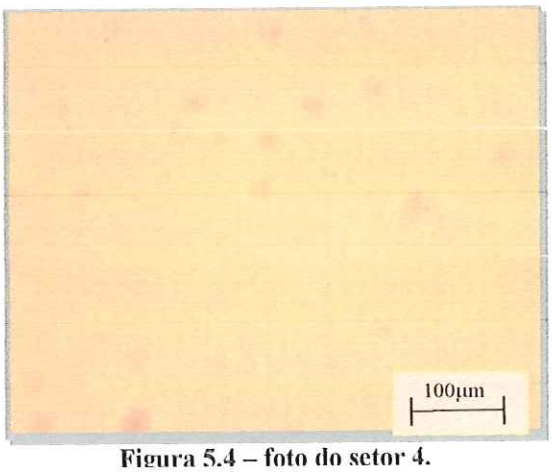

Figura 5.4 – foto do setor 4.

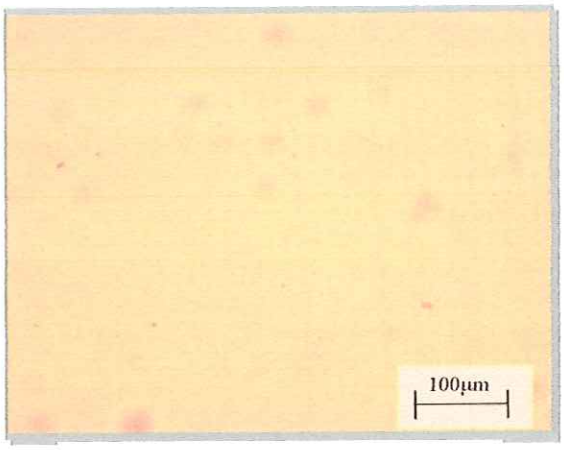

Figura 5.5 – foto do setor 5.

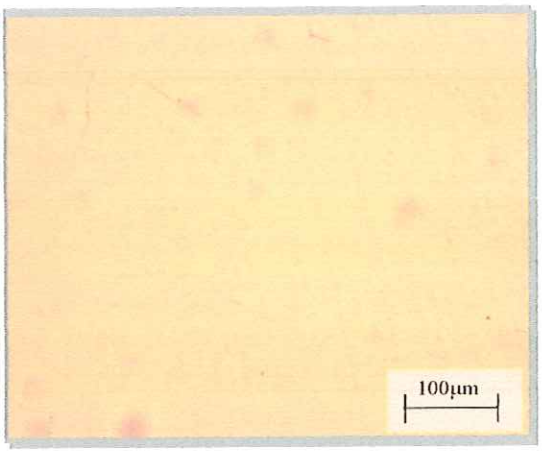

Figura 5.6 – foto do setor 6.

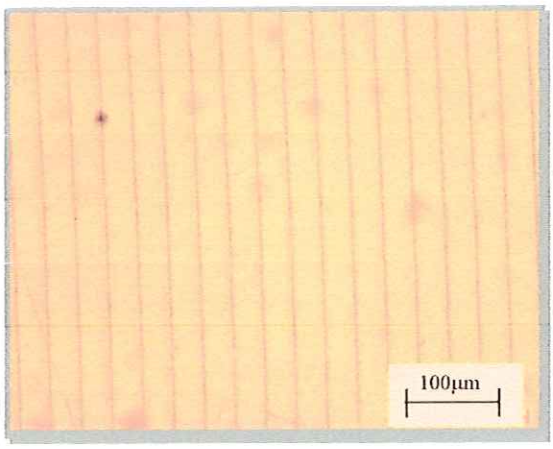

Figura 5.7 – foto do setor 7.

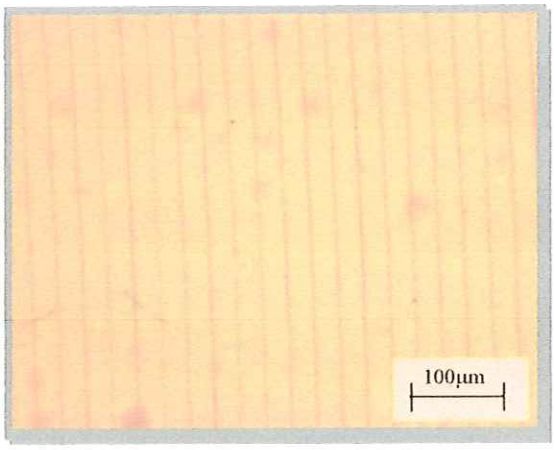

Figura 5.8 – foto do setor 8.

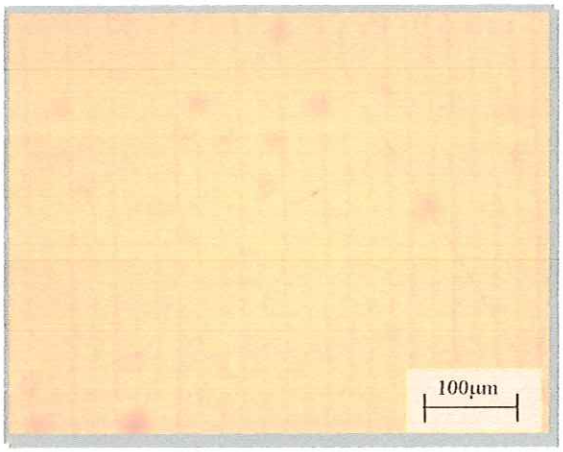

Figura 5.9 – foto do setor 9.

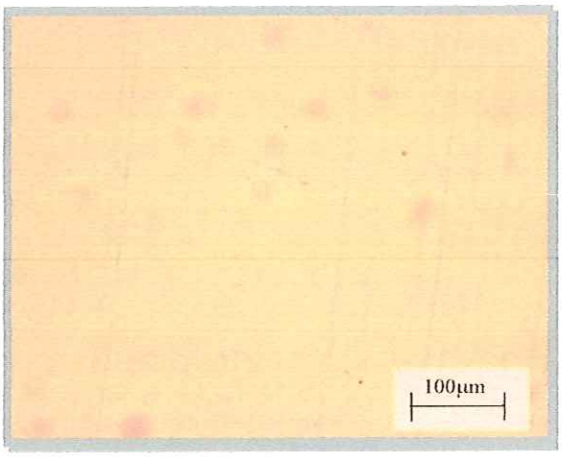

Figura 5.10 – foto do setor 10.

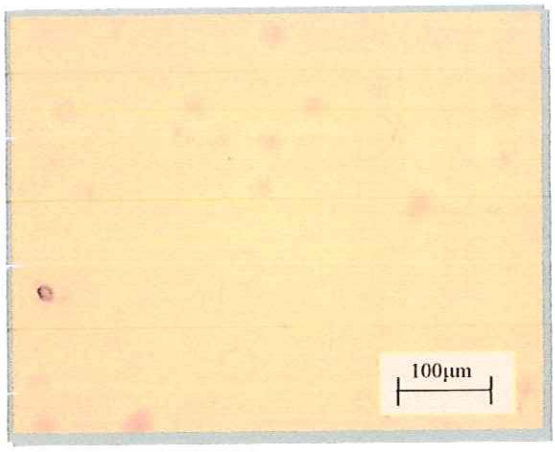

Figura 5.11 – foto do setor 11.

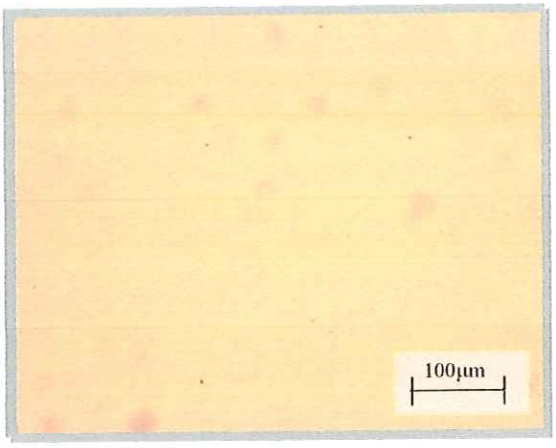

Figura 5.12 – foto do setor 12.

5.1.2 - Resultados das Medições da Rugosidade com o Aparelho PM, Medição Mecânica por Contato

Foi realizada a medição da rugosidade superficial, com o PM. As tabelas 5.1 e 5.2, apresentam as cinco medições da rugosidade, nos parâmetros Ra e Rz, respectivamente, realizadas nos 12 setores da peça.

Tabela 5.1 – Valores de Ra em nm

setores	M1	M2	M3	M4	M5	Média	DesvPadr
1	14,0	15,0	13,0	13,0	13,0	13,6	0,9
2	13,0	14,0	15,0	15,0	15,0	14,4	0,9
3	36,0	38,0	37,0	36,0	40,0	37,4	1,7
4	22,0	23,0	22,0	22,0	24,0	22,6	0,9
5	37,0	39,0	37,0	39,0	38,0	38,0	1,0
6	61,0	58,0	60,0	62,0	59,0	60,0	1,6
7	18,0	18,0	17,0	18,0	15,0	17,2	1,3
8	16,0	17,0	17,0	16,0	16,0	16,4	0,5
9	17,0	16,0	16,0	15,0	15,0	15,8	0,8
10	17,0	17,0	17,0	19,0	19,0	17,8	1,1
11	19,0	19,0	18,0	18,0	17,0	18,2	0,8
12	16,0	16,0	15,0	16,0	16,0	15,8	0,4

Tabela 5.2 – Valores de Rz em nm

setores	M1	M2	M3	M4	M5	Média	DesvPadr
1	113	105	124	95	96	107	12
2	117	116	104	108	103	110	7
3	160	190	176	162	172	172	12
4	146	149	146	143	152	147	3
5	213	197	212	206	214	208	7
6	289	285	287	293	292	289	3
7	122	118	121	129	111	120	7
8	118	112	114	119	107	114	5
9	118	112	112	111	104	111	5
10	115	116	113	131	133	122	10
11	134	128	123	128	124	127	4
12	112	106	116	122	105	112	7

5.1.3 - Resultados das Medições da Rugosidade com os Aparelhos TE e TD, Microscópios de Força Atômica (modo contato)

Com o microscópio de força atômica, TE, foi medida a rugosidade da peça, nos parâmetros Ra e Rz, assim como obtida sua imagem superficial. Os valores da rugosidade obtidos são apresentados na tabela 5.3. As figuras 5.13 até 5.24, mostram as imagens produzidas com este aparelho.

◇◇**Observação 1:** este equipamento possui um acessório, *TrueMetrix,* o qual possui um sensor que elimina a não linearidade no eixo Z, garantindo assim a exatidão das medidas nesta direção. E um *software*, que compensa a não linearização e histerese, nos eixos X e Y. Possui também um outro acessório que permite medições em peças cuja altura ultrapasse um pouco o valor estabelecido de 100mm.

Tabela 5.3 – Valores de Ra e Rz obtidas com o TE – peça 1

Setor	Ra em nm	Rz em nm
1	11,3	64,6
2	11,7	70,6
3	4,4	59,4
4	4,7	35,0
5	3,0	31,0
6	7,3	79,3
7	5,2	66,6
8	21,0	90,7
9	12,0	71,1
10	8,5	42,1
11	8,1	44,1
12	8,1	42,2

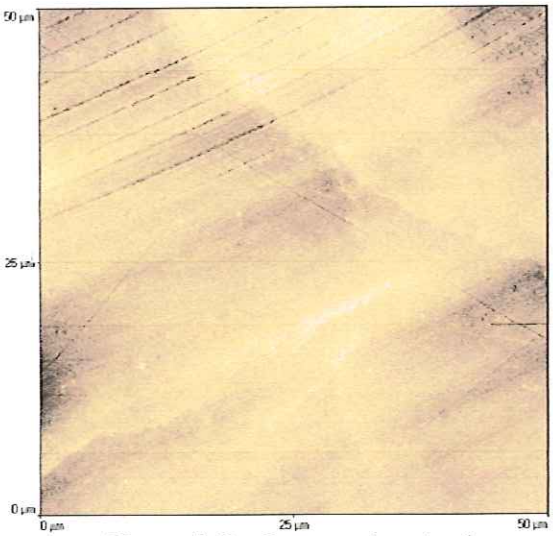

Figura 5.13 – Imagem do setor 1.

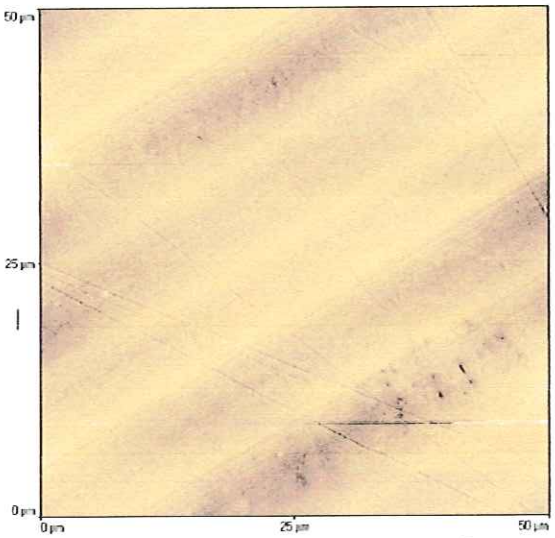

Figura 5.14 – Imagem do setor 2.

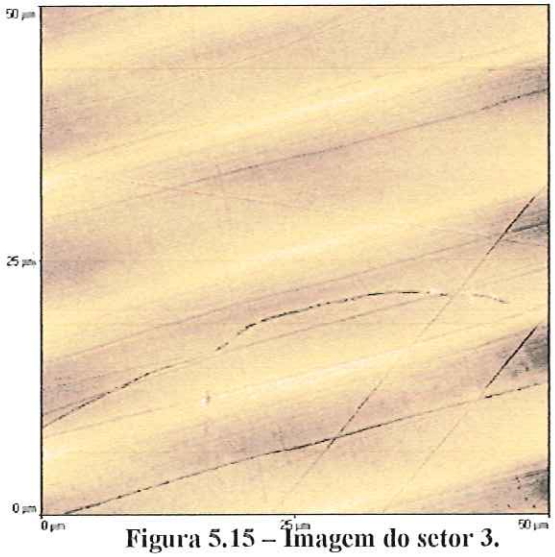

Figura 5.15 – Imagem do setor 3.

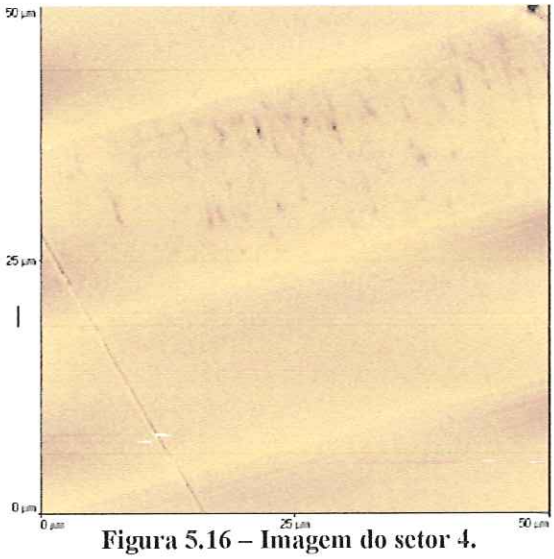

Figura 5.16 – Imagem do setor 4.

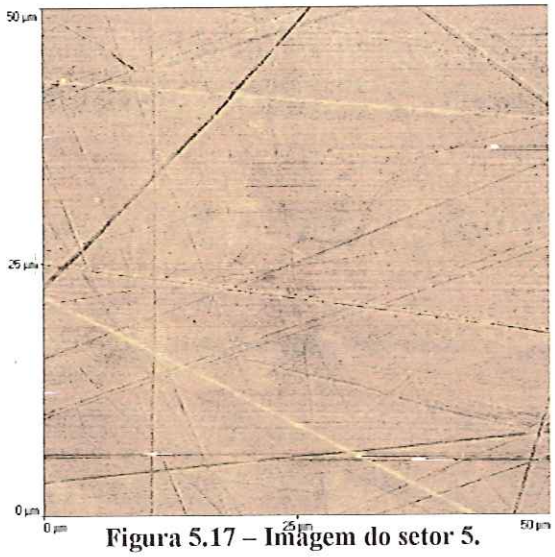

Figura 5.17 – Imagem do setor 5.

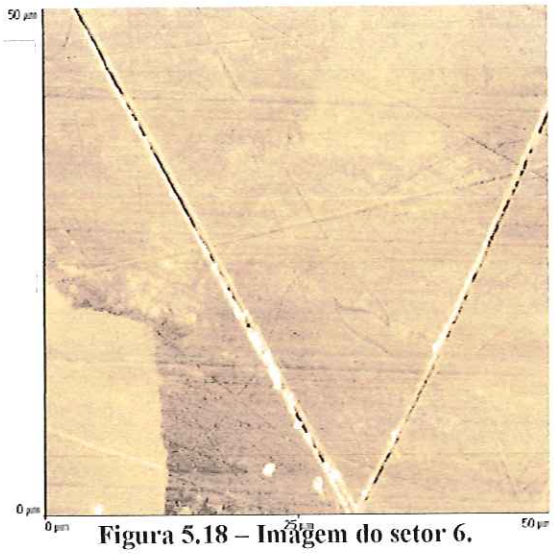

Figura 5.18 – Imagem do setor 6.

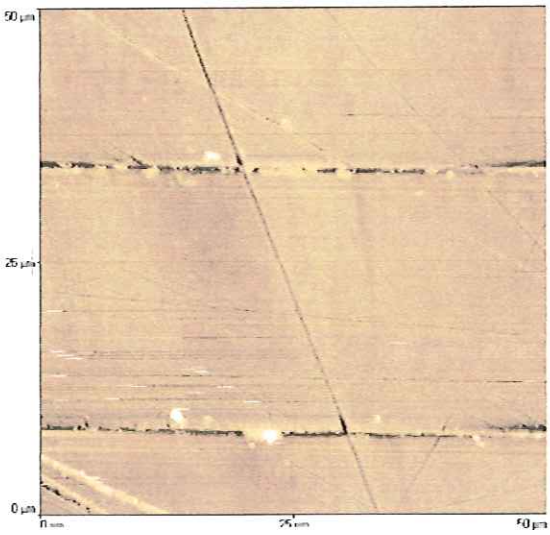

Figura 5.19 – Imagem do setor 7.

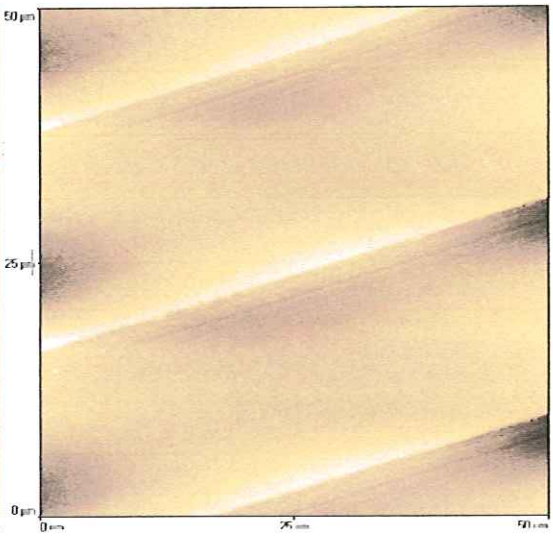

Figura 5.20 – Imagem do setor 8.

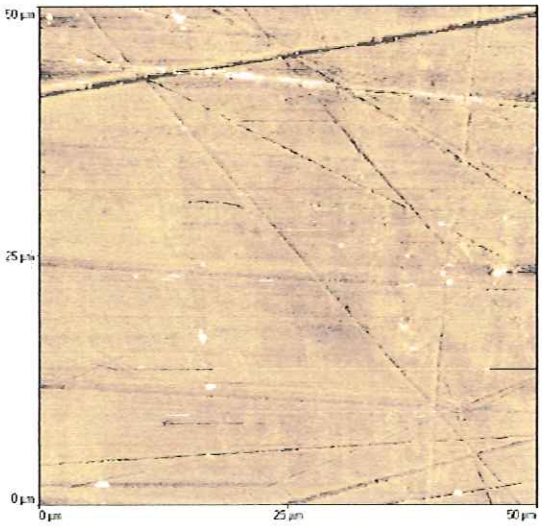

Figura 5.21 – Imagem do setor 9.

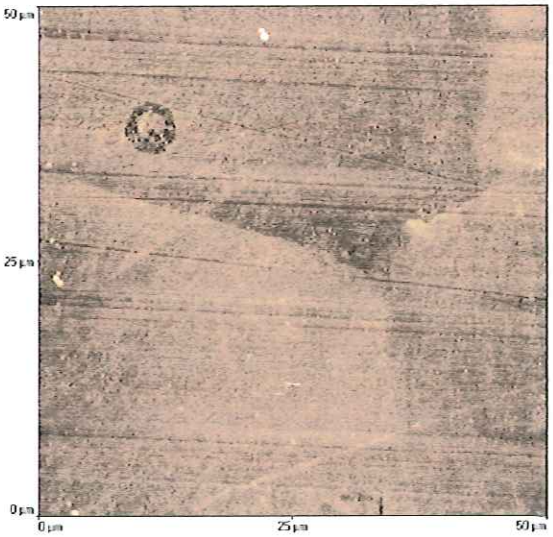

Figura 5.22 – Imagem do setor 10.

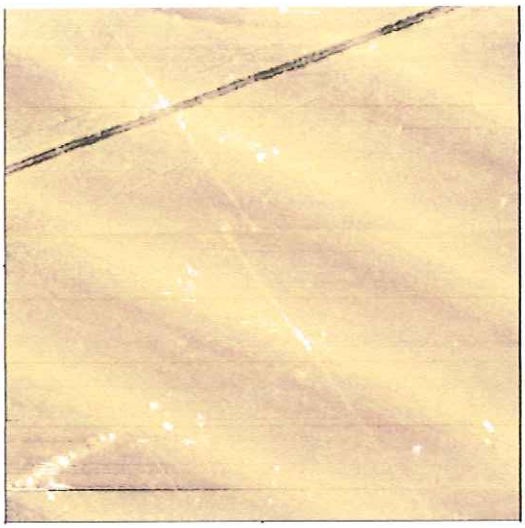

Figura 5.23 – Imagem do setor 11.

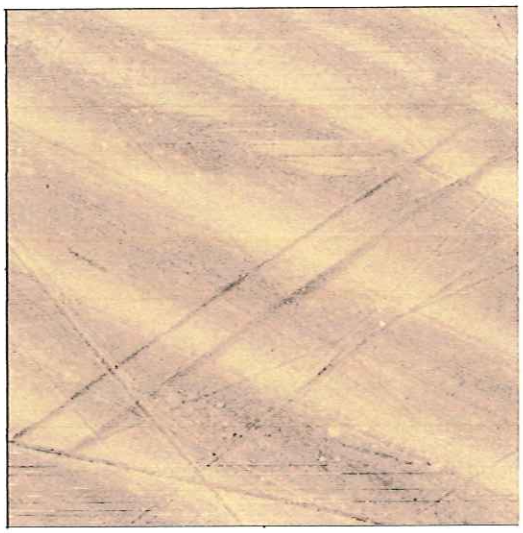

Figura 5.24 – Imagem do setor 12.

Com o microscópio de força atômica, TD, foi medida a rugosidade superficial da peça, nos parâmetros Ra e Rz, tabela 5.4.

◇◇**Observação 2:** Este equipamento não possui um acessório como o TE, que tira a não linearidade do eixo Z, portanto as amostras devem ser totalmente planas. Ainda, as amostras devem possuir um tamanho máximo de 10mm x 10mm (em X e Y), porém em Z, deve ser menor que o especificado (que é 10mm). Ao preparar as amostras, algumas ficaram inclinadas. Esta inclinação acabou influenciando nas medidas. Por esta razão, ao observar os valores apresentados na tabela 5.4, tanto Ra como Rz, estão muito altos. Pois, está levando em consideração a inclinação da peça nas medidas obtidas.

Tabela 5.4 – valores de Ra com o TD – peça 1

Setor	Ra em nm	Rz em μm
1	29	6,46
2	64	6,49
3	190	5,04
4	169	8,82
5	115	6,02
6	119	5,62
7	178	5,60
8	85	6,93
9	25	6,73
10	108	6,09
11	114	5,43
12	134	5,42

◇◇**Observação 3:** Com os equipamentos, TE e TD, foi executada uma única medição em cada setor com cada aparelho, uma vez que: 1) O tempo necessário para a execução das medições nestes aparelhos é muito grande e, o desenvolvimento deste trabalho contou com a disponibilização por parte dos departamentos ao qual eles pertencem. 2) Suas resoluções em Z e X são 0,01nm e 0,1nm respectivamente, e assim os valores obtidos foram usados como limites atingíveis pelas tecnologias atuais disponíveis. 3) A dimensão máxima medida com estes equipamentos é de 25 x 25μm e de 50 x 50μm, respectivamente, o que em termos de comparação, eqüivale a um comprimento de amostragem das medições realizadas com o PM e IO cujas faixas de medição eram de 250 x 250μm e 367 x 367μm, respectivamente.

5.1.4 - Resultados das Medições da Rugosidade com o Aparelho IO, Medição por Interferometria Óptica, Sem Contato

Com o IO, foram realizada três medidas da rugosidade Ra e Rz de cada setor da peça (conforme apêndice II), a tabela 5.5 apresenta o valor médio destas medidas.

Tabela 5.5 – Valores de Ra e Rz em nm – peça 1

Setor	Ra	Rz
1	10,97	58,37
2	10,53	51,00
3	10,93	52,40
4	10,07	53,57
5	10,21	50,63
6	10,03	49,93
7	52,87	254,67
8	34,30	258,67
9	18,27	95,20
10	10,53	47,70
11	7,10	46,27
12	7,06	33,07

As figuras a seguir foram obtidas com o IO, sendo que, as de número 5.25 até 5.36 são gráficos que representam a rugosidade Ra em nm de uma das medidas feita em cada um dos 12 setores da peça, as de número 5.37 até 5.48, são as imagens topográficas destas superfícies medidas.

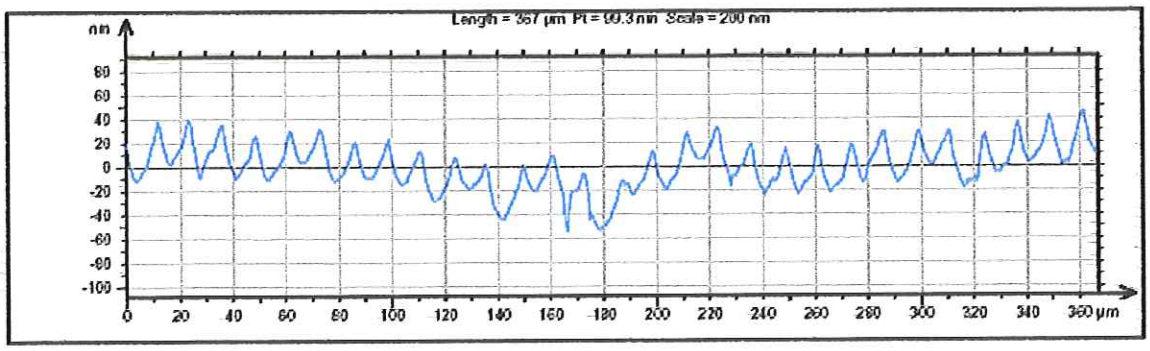

Figura 5.25 – Rugosidade Ra do setor 1.

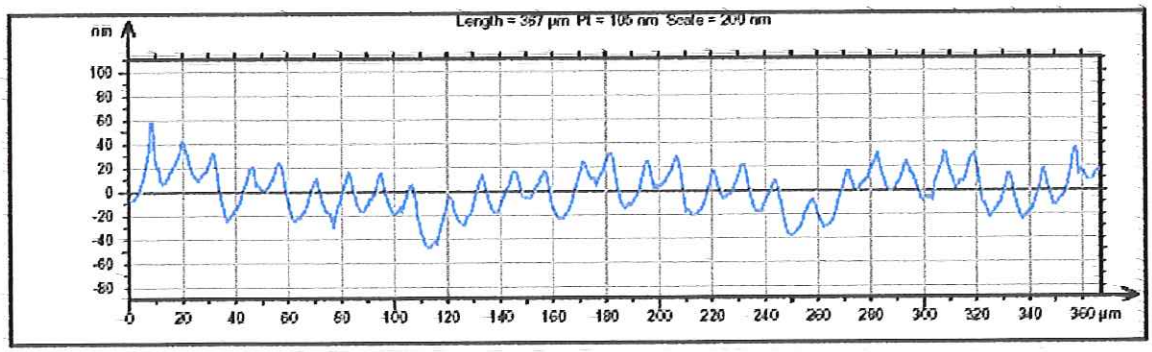

Figura 5.26 – Rugosidade Ra do setor 2.

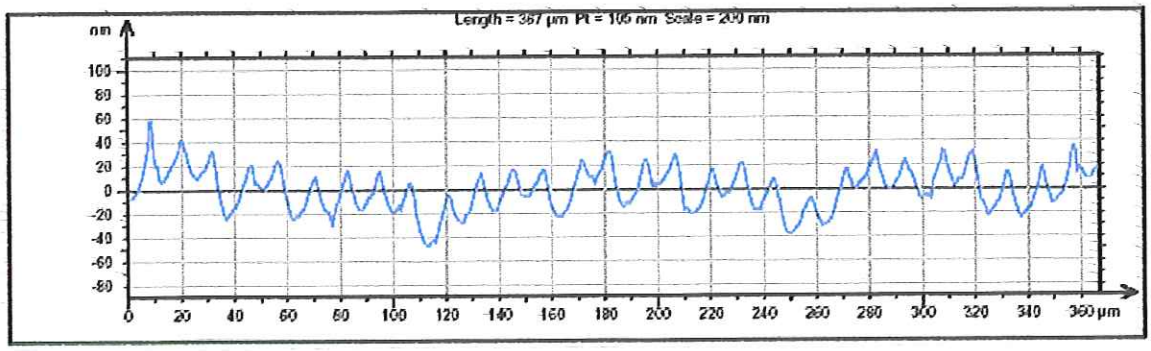

Figura 5.27 – Rugosidade Ra do setor 3.

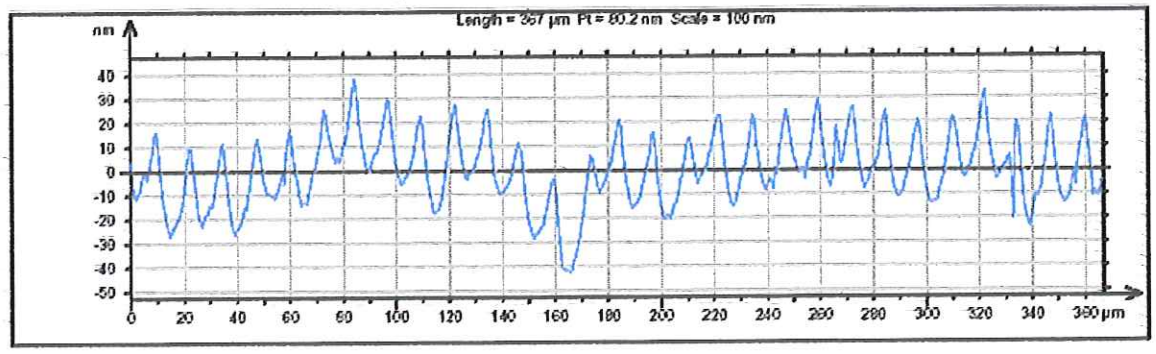

Figura 5.28 – Rugosidade Ra do setor 4.

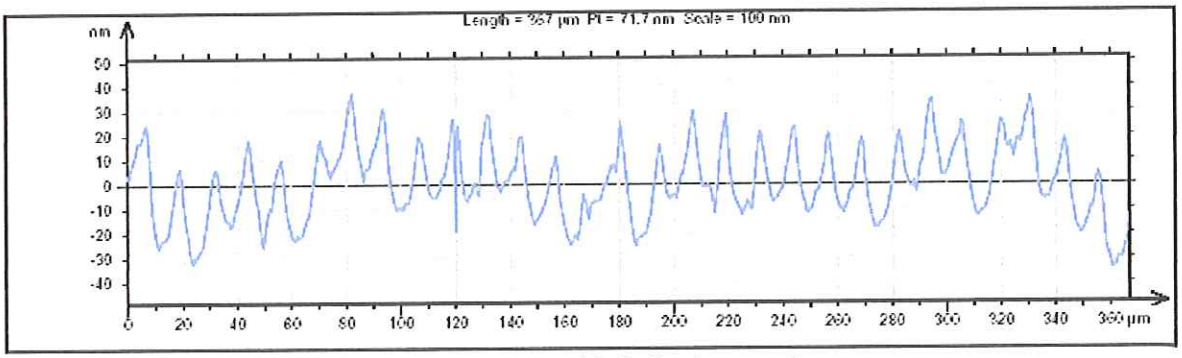

Figura 5.29 – Rugosidade Ra do setor 5.

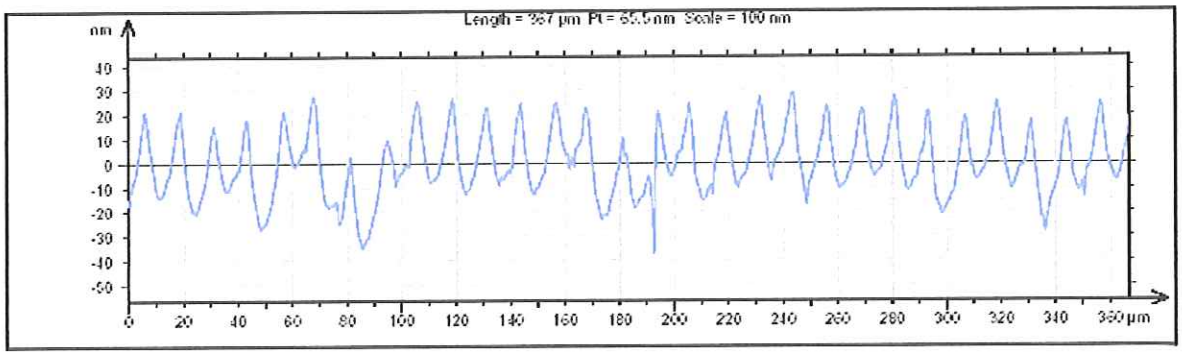

Figura 5.30 – Rugosidade Ra do setor 6.

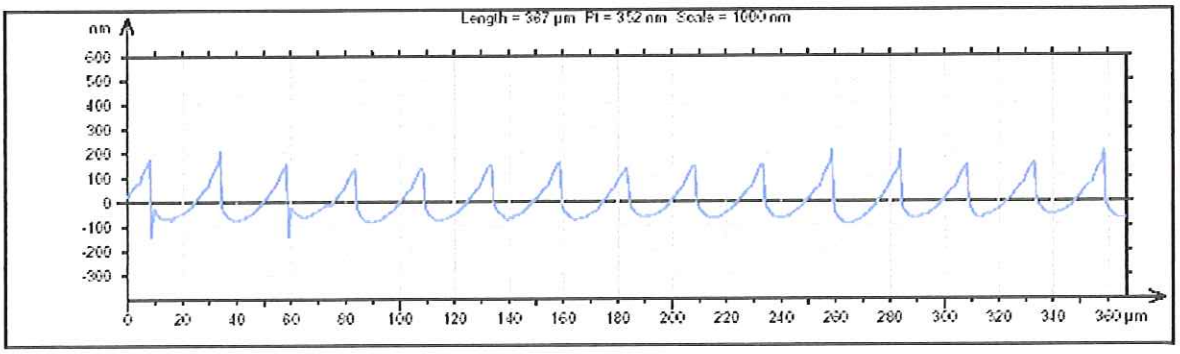

Figura 5.31 – Rugosidade Ra do setor 7.

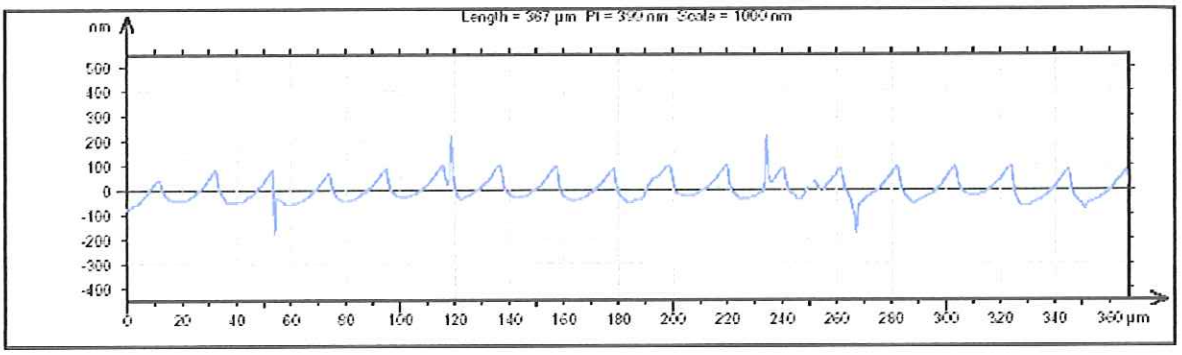

Figura 5.32 – Rugosidade Ra do setor 8.

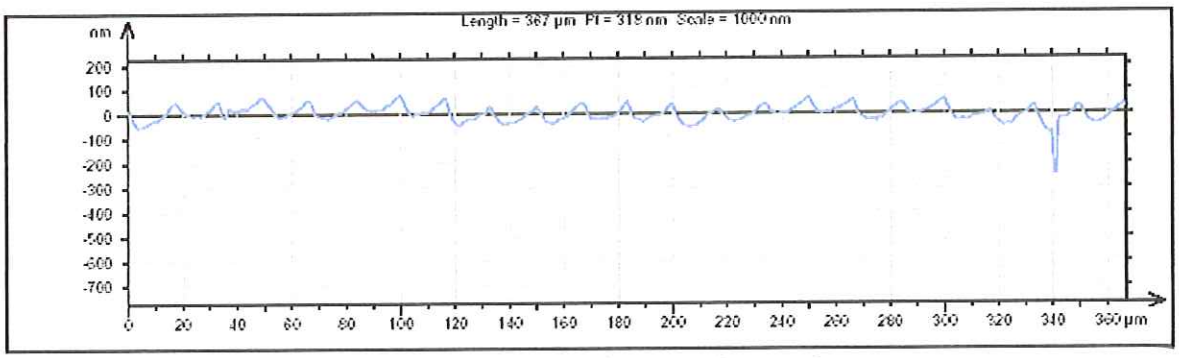

Figura 5.33 – Rugosidade Ra do setor 9.

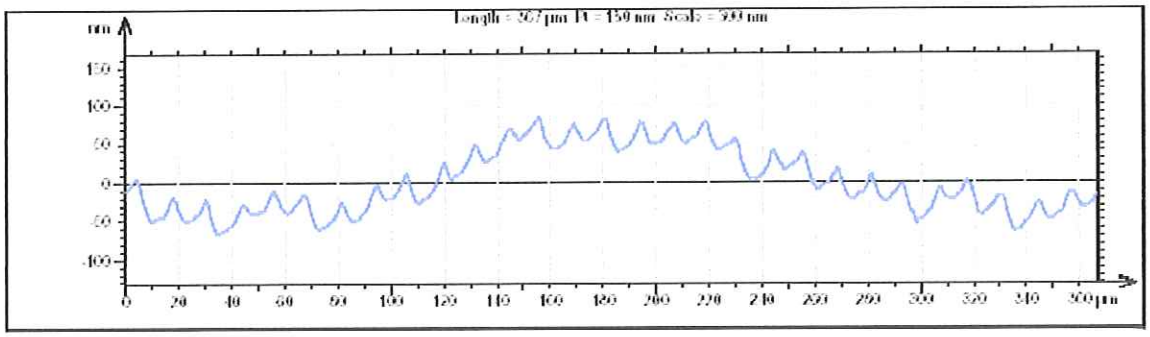

Figura 5.34 – Rugosidade Ra do setor 10.

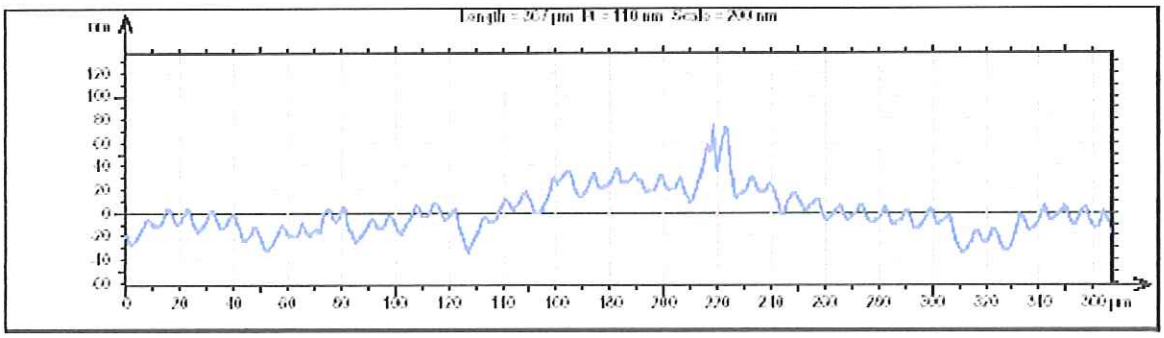

Figura 5.35 – Rugosidade Ra do setor 11.

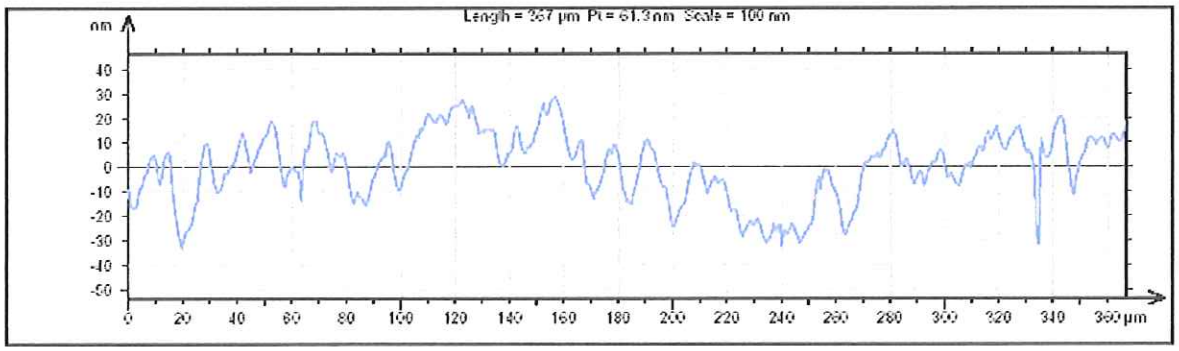

Figura 5.36 – Rugosidade Ra do setor 12.

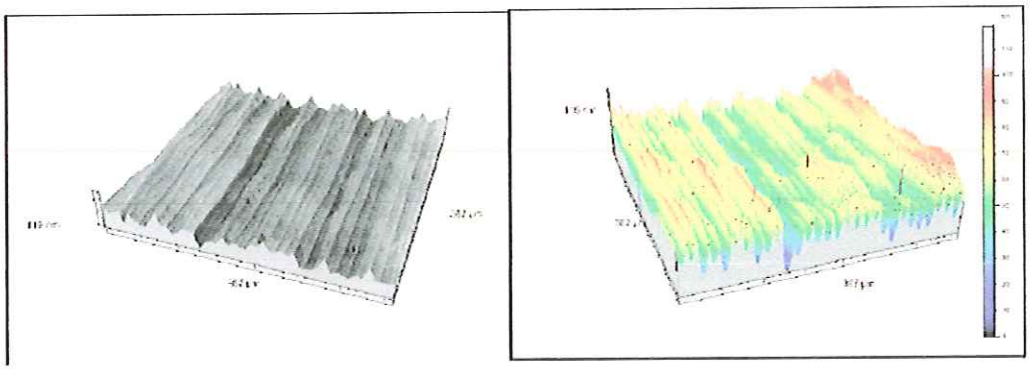

Figura 5.37 – Superfície topográfica do setor 1.

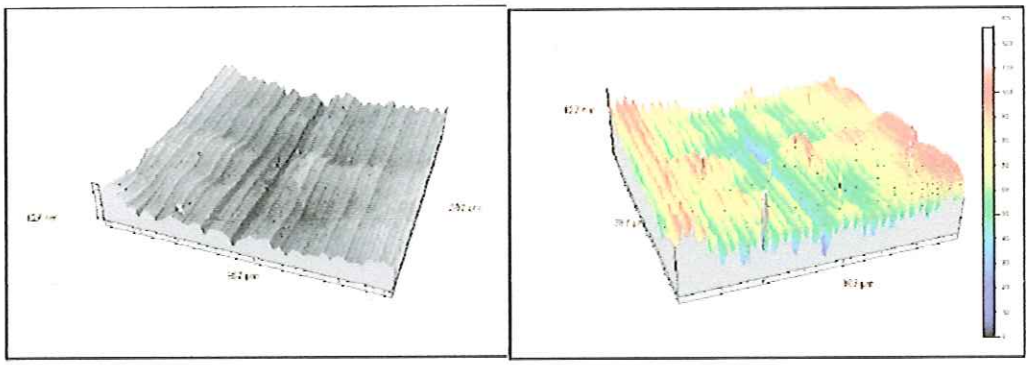

Figura 5.38 – Superfície topográfica do setor 2.

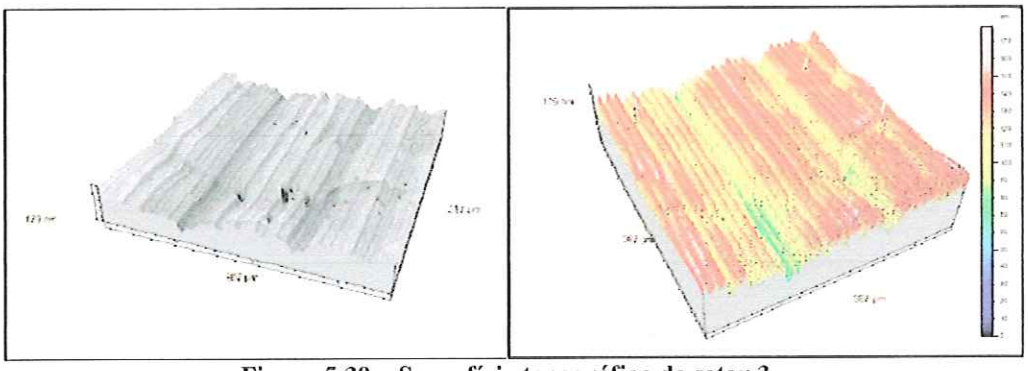

Figura 5.39 – Superfície topográfica do setor 3.

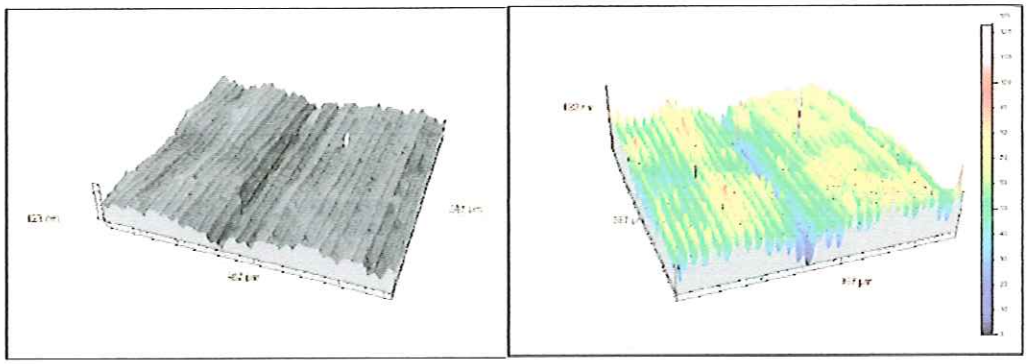

Figura 5.40 – Superfície topográfica do setor 4.

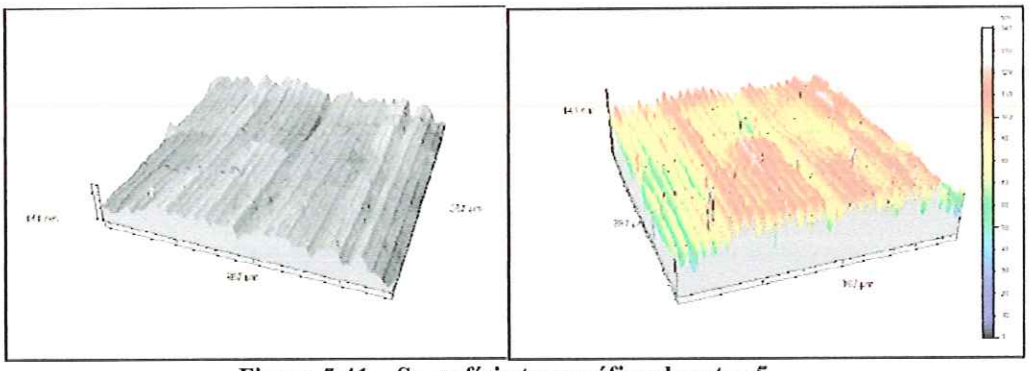

Figura 5.41 – Superfície topográfica do setor 5.

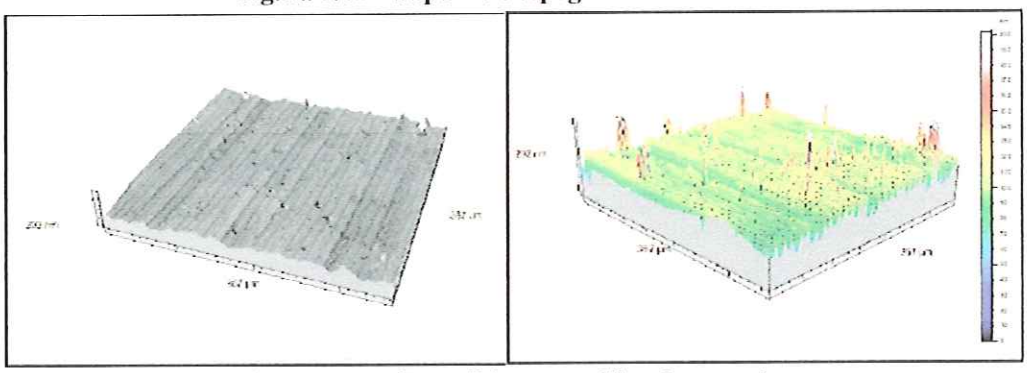

Figura 5.42 – Superfície topográfica do setor 6.

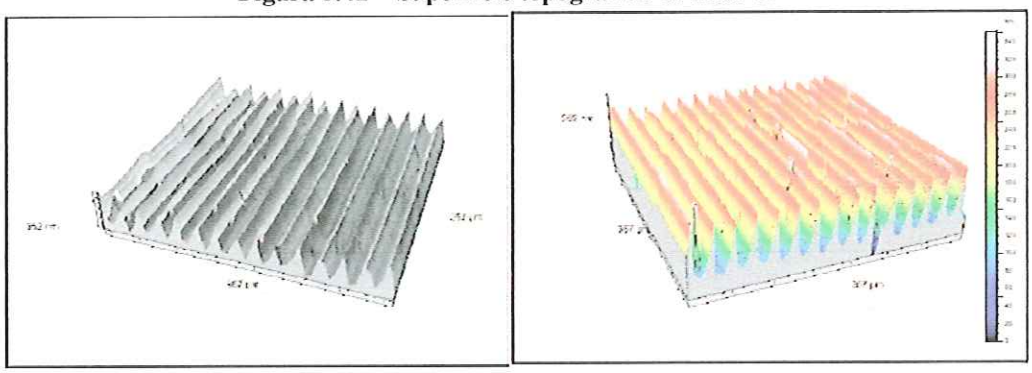

Figura 5.43 – Superfície topográfica do setor 7.

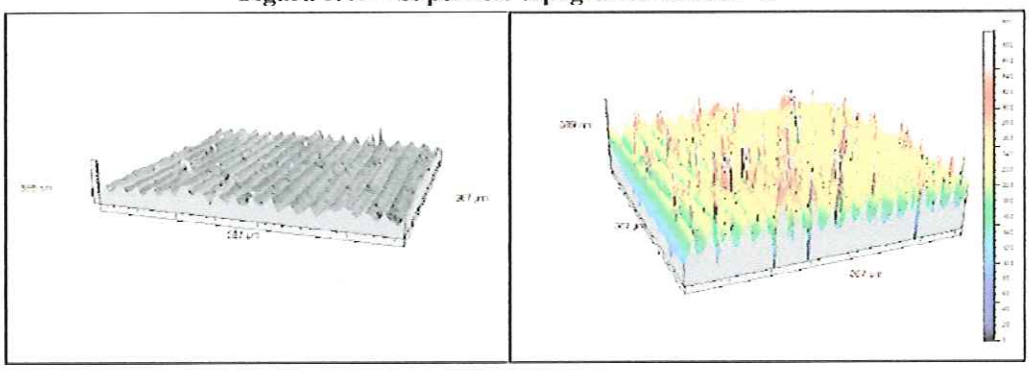

Figura 5.44 – Superfície topográfica do setor 8.

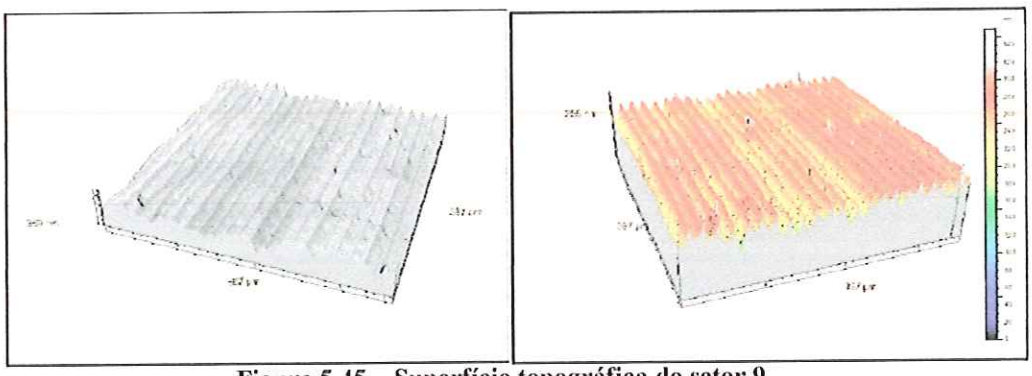

Figura 5.45 – Superfície topográfica do setor 9.

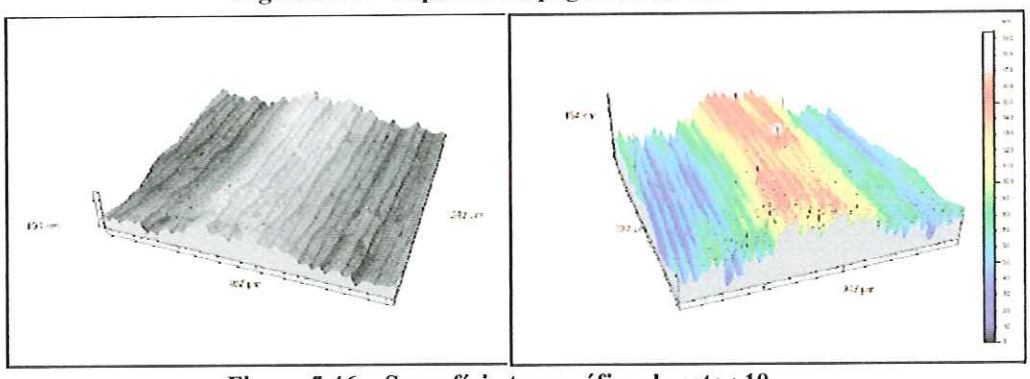

Figura 5.46 – Superfície topográfica do setor 10.

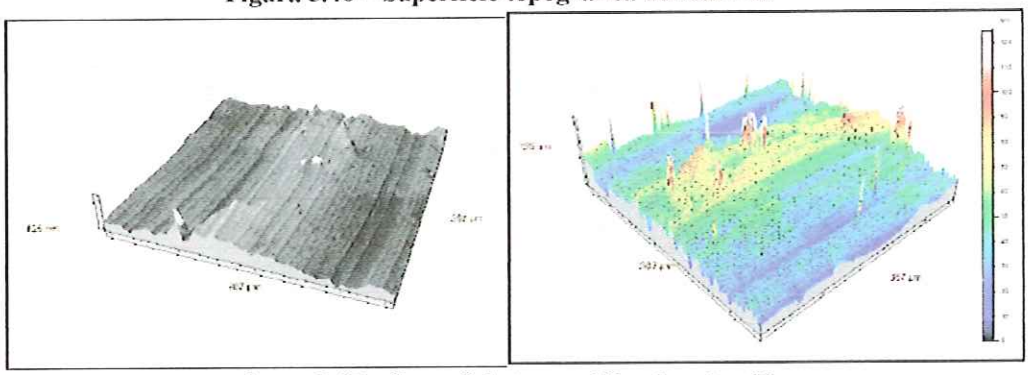

Figura 5.47 – Superfície topográfica do setor 11.

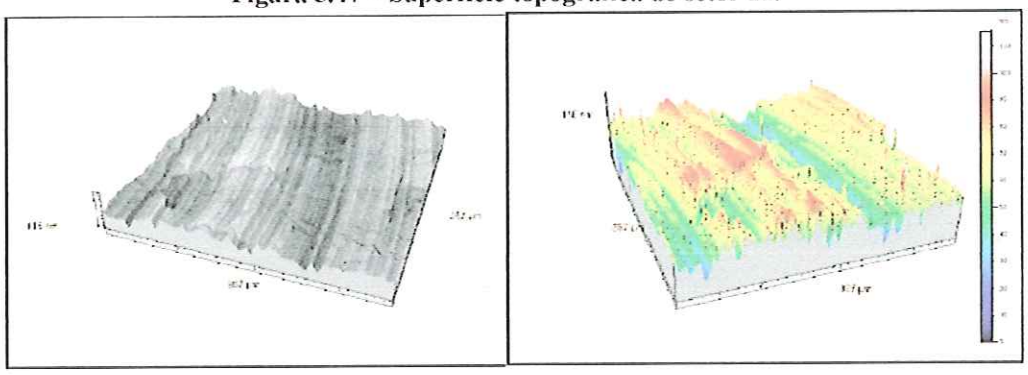

Figura 5.48 – Superfície topográfica do setor 12.

5.2 - Peça 2

Neste item serão apresentados os dados obtidos com a peça 2.

5.2.1 - Imagens Fotográficas das Superfícies da Peça Usinada

Uma vez que o IO, assim como, os AFMs também fazem a imagem topográfica da superfície que está sendo analisada, então optou-se por não fotografar esta peça com o microscópio vertical.

5.2.2 - Resultados das Medições da Rugosidade com o Aparelho PM, Medição Mecânica por Contato

Foram executada cinco medições da rugosidade Ra e Rz com o aparelho PM, conforme apêncice III. A tabela 5.6 apresenta o valor médio destas medidas.

Tabela 5.6 – Valores de Ra em nm – peça 2

Setor	Ra	Rz
1	53	244
2	23	116
3	23	111
4	18	100
5	18	100
6	12	81
7	54	243
8	18	108
9	16	120
10	13	77
11	35	151
12	22	119

5.2.3 - Resultados das Medições da Rugosidade com os Aparelhos TE e TD, Microscópios de Força Atômica (modo contato)

Uma vez que os AFMs, TE e TD, apresentam as características mencionadas nas observações 2 e 3, do item 5.1.3, as quais acabam por prejudicar o resultado final das medições, principalmente devido ao preparo das amostras. Decidiu-se não executar o controle da rugosidade superficial da peça 2 com estes equipamentos.

5.2.4 - Resultados das Medições da Rugosidade com o Aparelho IO, Medição por Interferometria Óptica, sem contato

Com o aparelho IO foram executas três medições de Ra e três de Rz em cada setor da peça 2, conforme mostra o apendice IV. A tabela 5.7, apresenta o valor médio destas medidas.

Tabela 5.7 – Valores de Ra e Rz em nm- peça 2

Setor	Ra	Rz
1	37,8	159,0
2	11,3	26,5
3	11,3	49,3
4	26,5	32,5
5	11,1	46,6
6	9,6	57,7
7	43,9	218,0
8	10,5	52,4
9	9,1	73,3
10	8,5	166,0
11	22,0	95,0
12	7,39	45,9

As figuras 5.49 até 5.60, são gráficos que representam a rugosidade Ra, de uma das medidas feita em cada um dos 12 setores da peça 2. E as figuras de 5.61 até 5.72, são as imagens topográficas destas superfícies medidas.

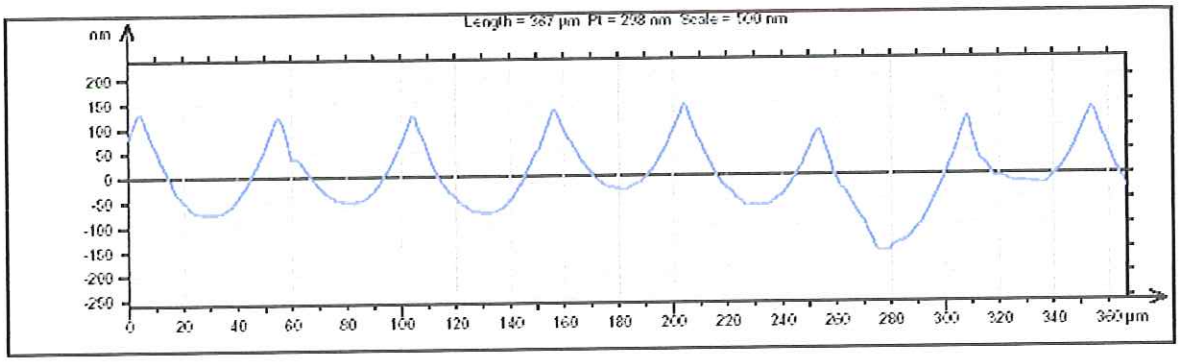

Figura 5.49 – Rugosidade Ra do setor 1

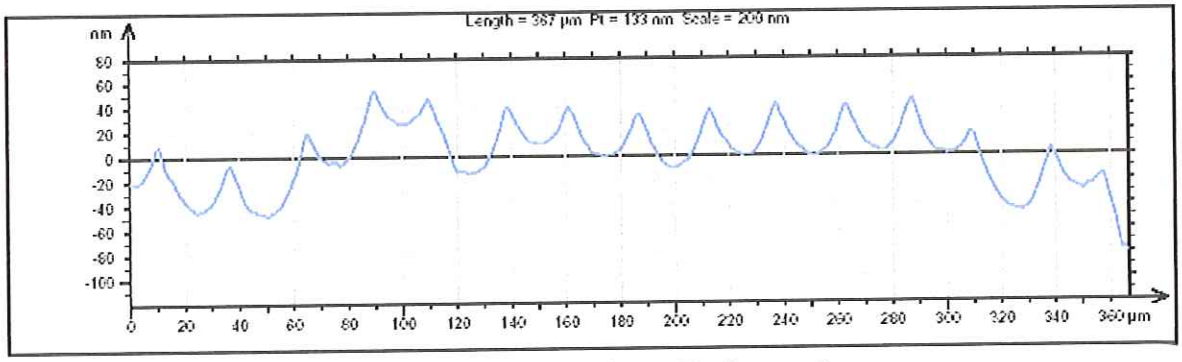

Figura 5.50 – Rugosidade Ra do setor 2

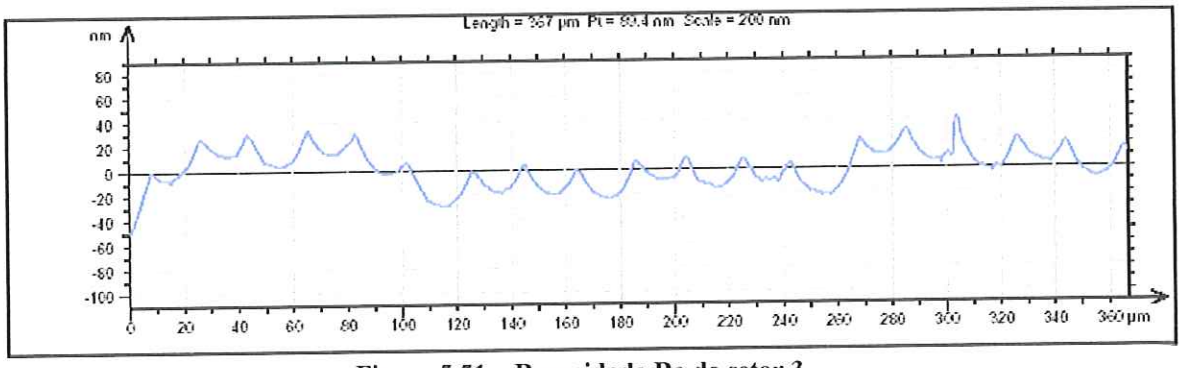

Figura 5.51 – Rugosidade Ra do setor 3

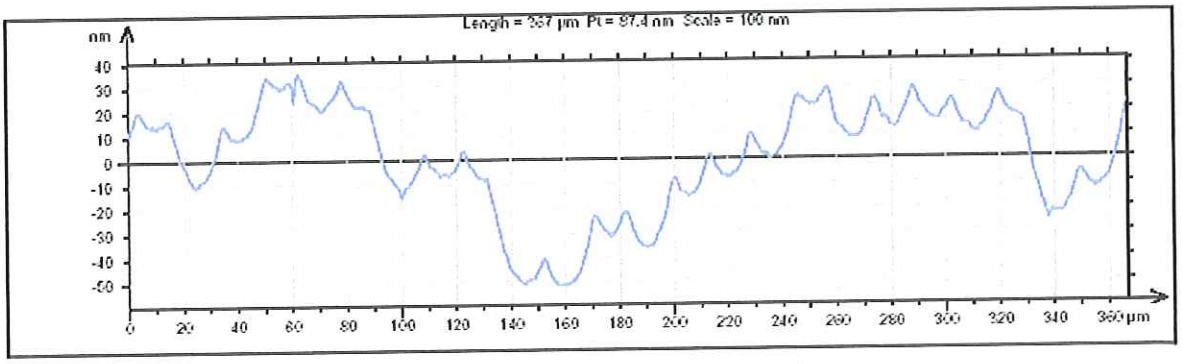

Figura 5.52 – Rugosidade Ra do setor 4

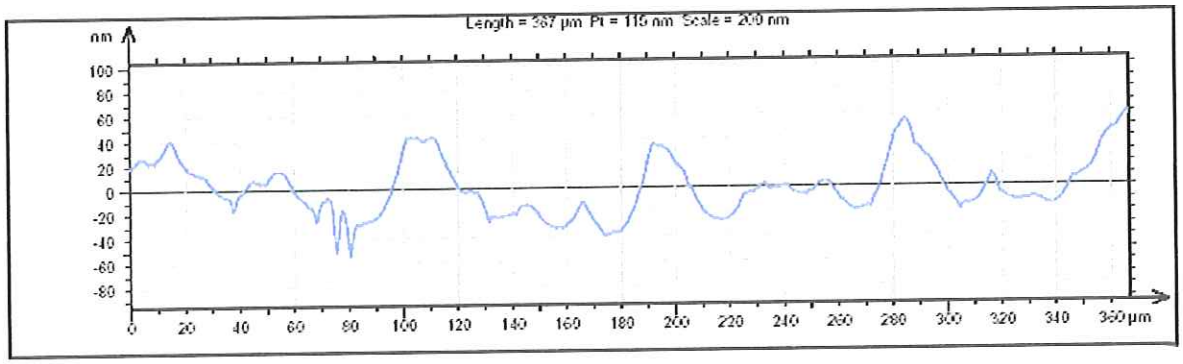

Figura 5.53 – Rugosidade Ra do setor 5

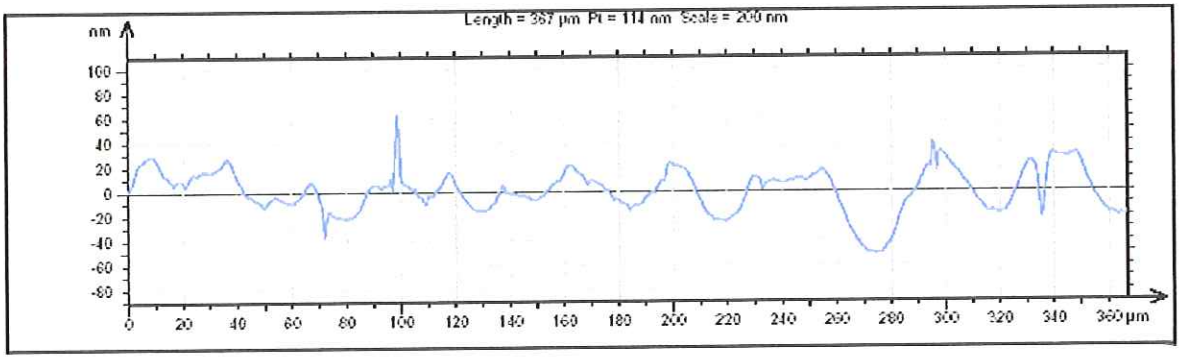

Figura 5.54 – Rugosidade Ra do setor 6

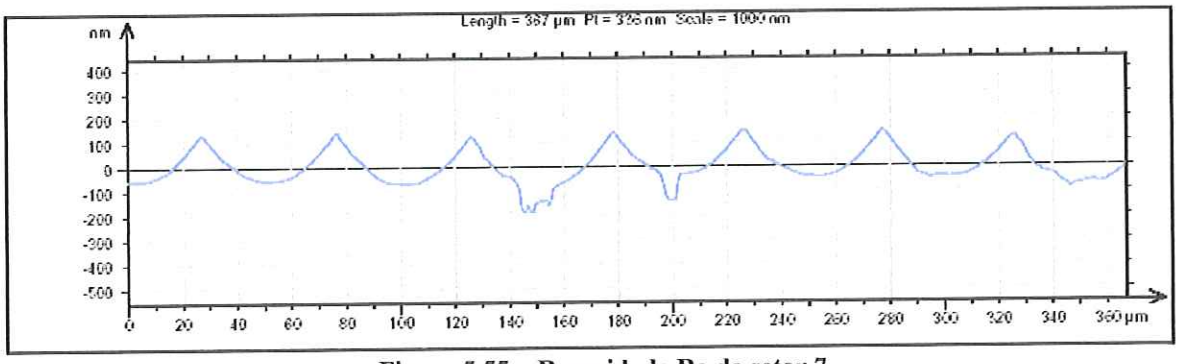

Figura 5.55 – Rugosidade Ra do setor 7

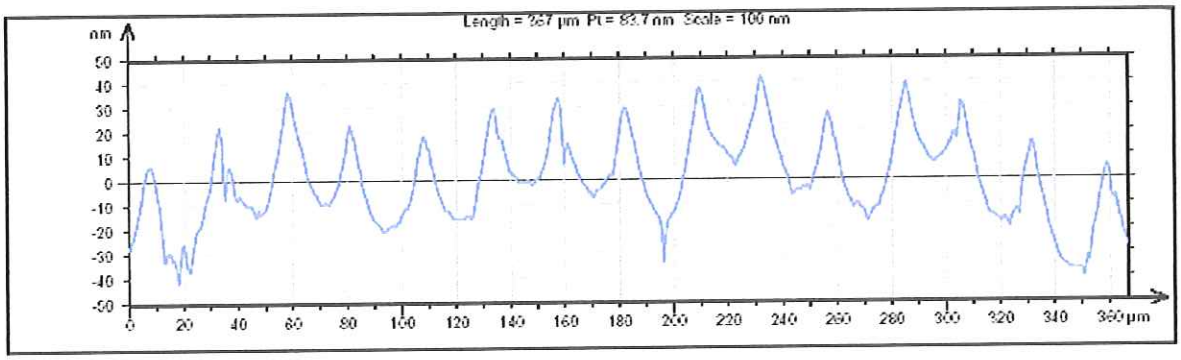

Figura 5.56 – Rugosidade Ra do setor 8

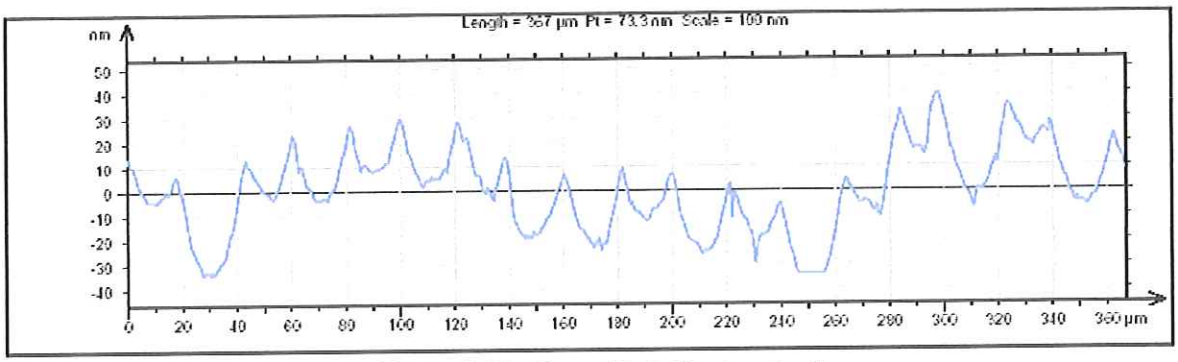

Figura 5.57 – Rugosidade Ra do setor 9

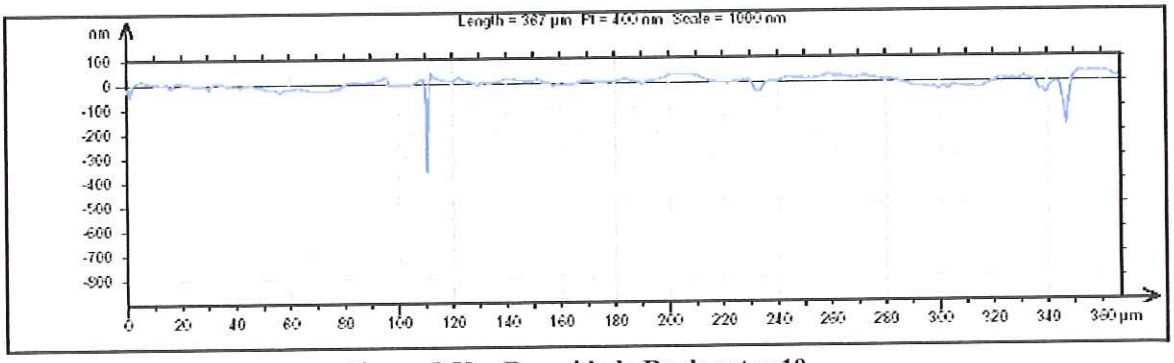

Figura 5.58 – Rugosidade Ra do setor 10

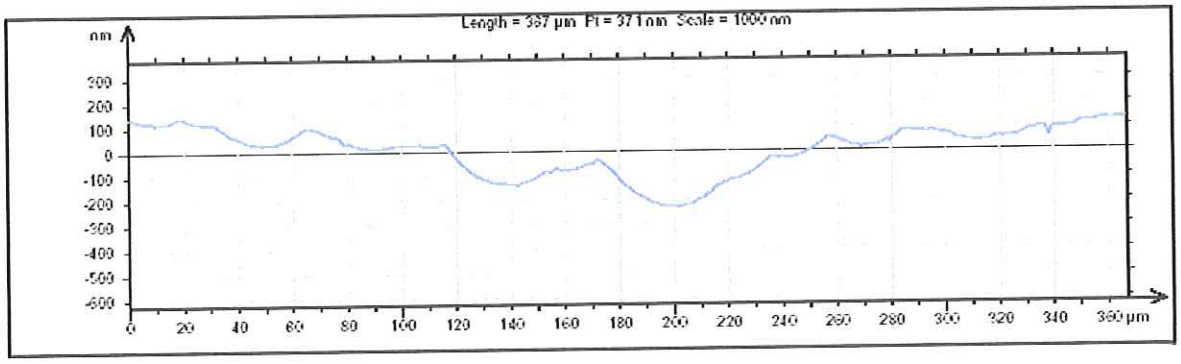

Figura 5.59 – Rugosidade Ra do setor 11

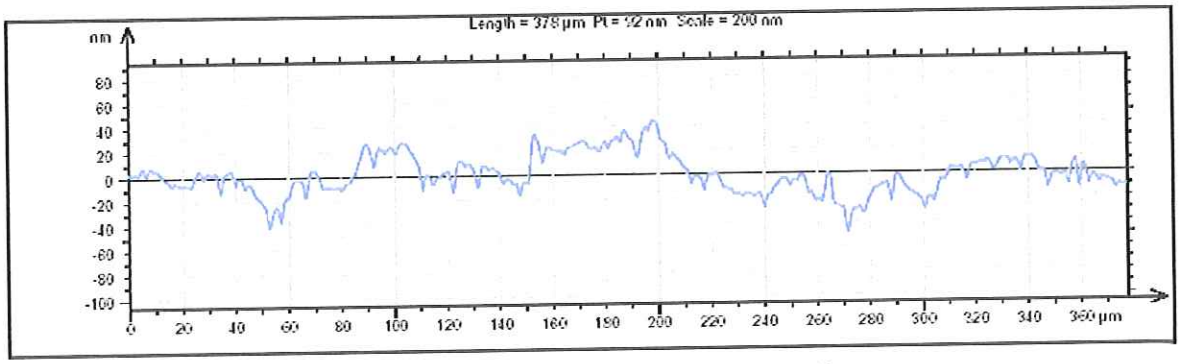

Figura 5.60 – Rugosidade Ra do setor 12

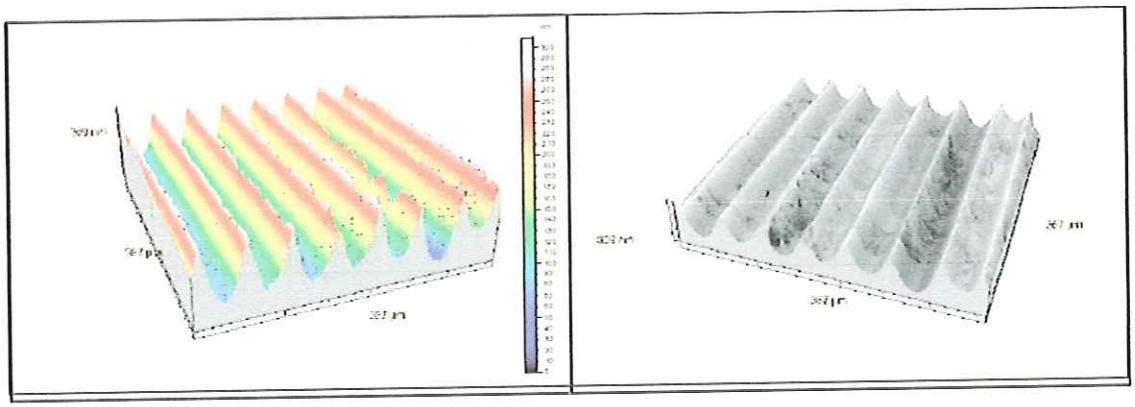

Figura 5.61 – Imagem topográfica do setor 1

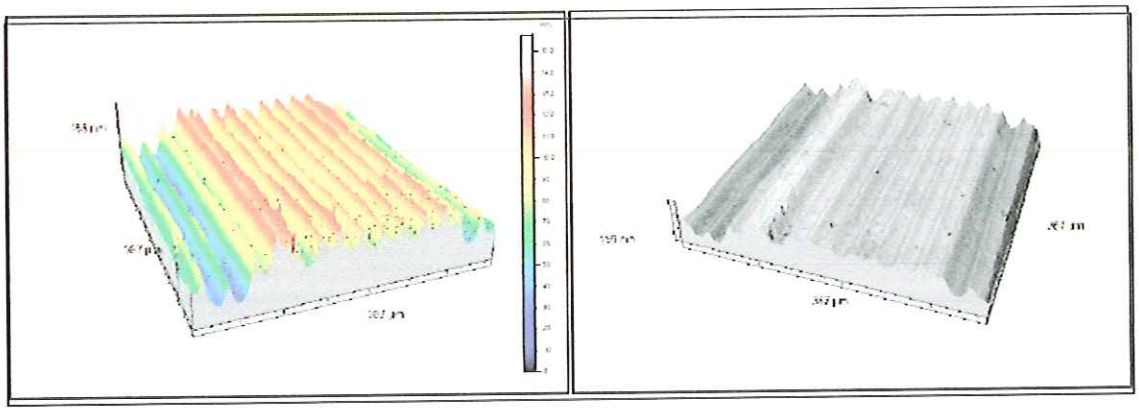

Figura 5.62 – Imagem topográfica do setor 2

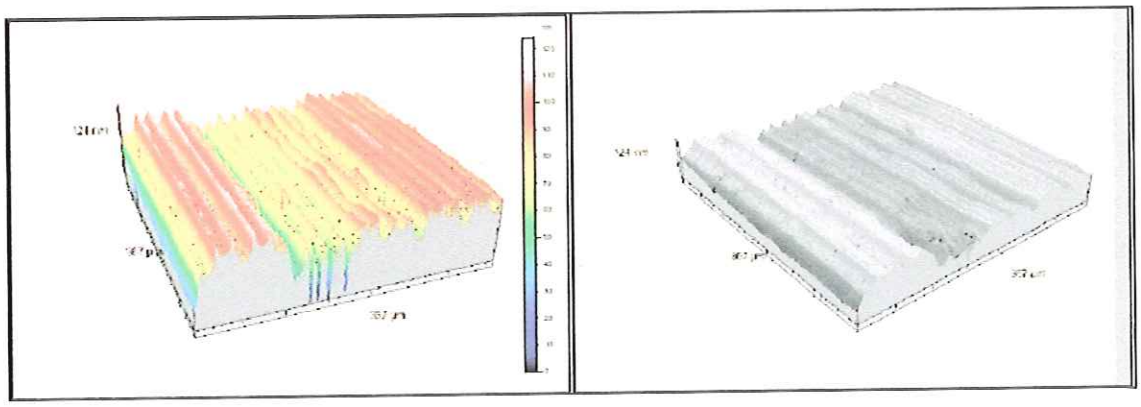

Figura 5.63 – Imagem topográfica do setor 3

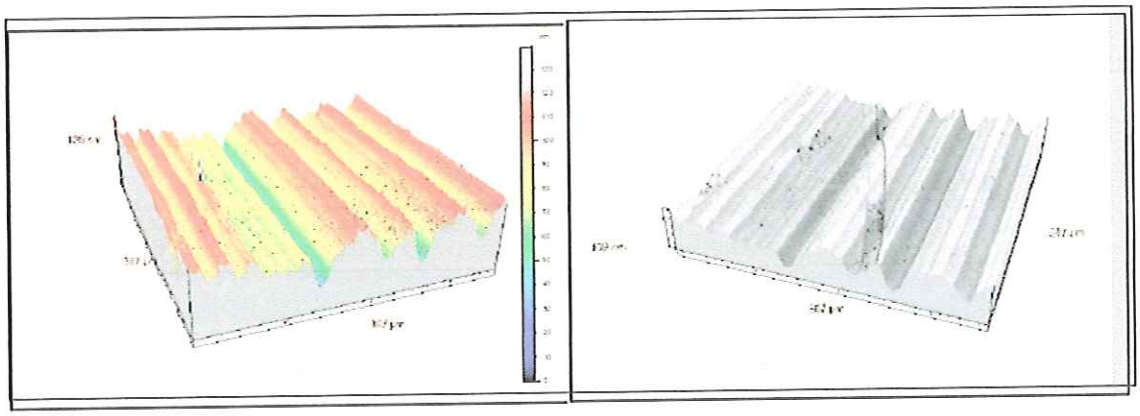

Figura 5.64 – Imagem topográfica do setor 4

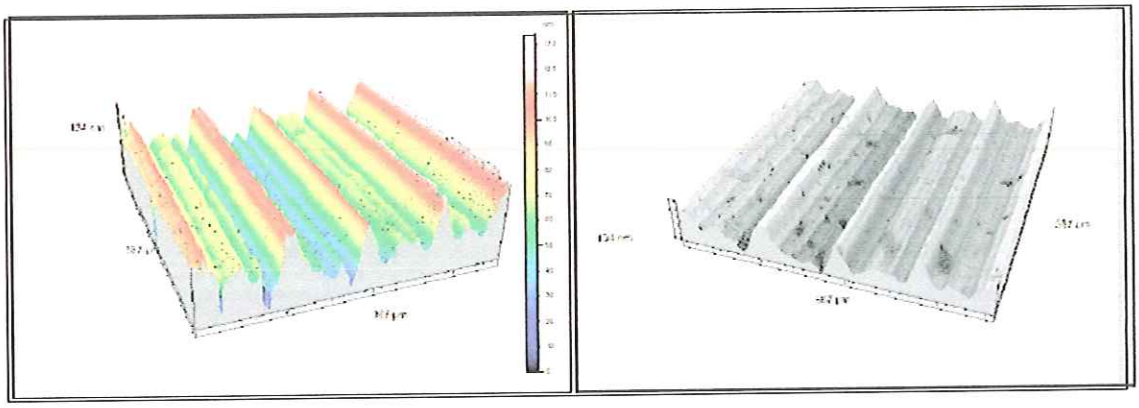

Figura 5.65 – Imagem topográfica do setor 5

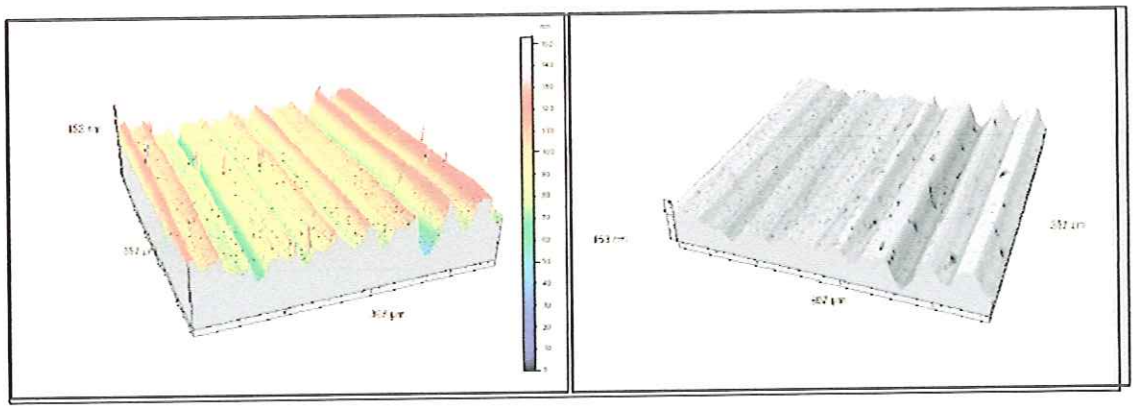

Figura 5.66 – Imagem topográfica do setor 6

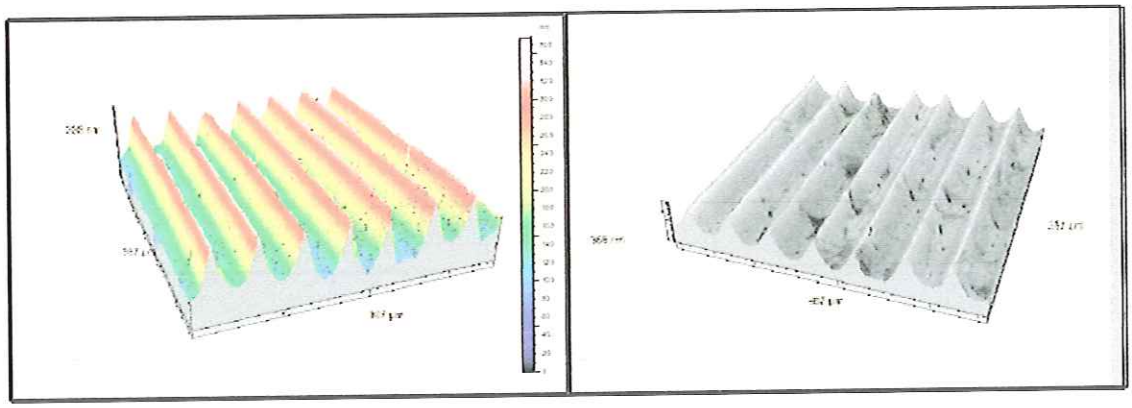

Figura 5.67 – Imagem topográfica do setor 7

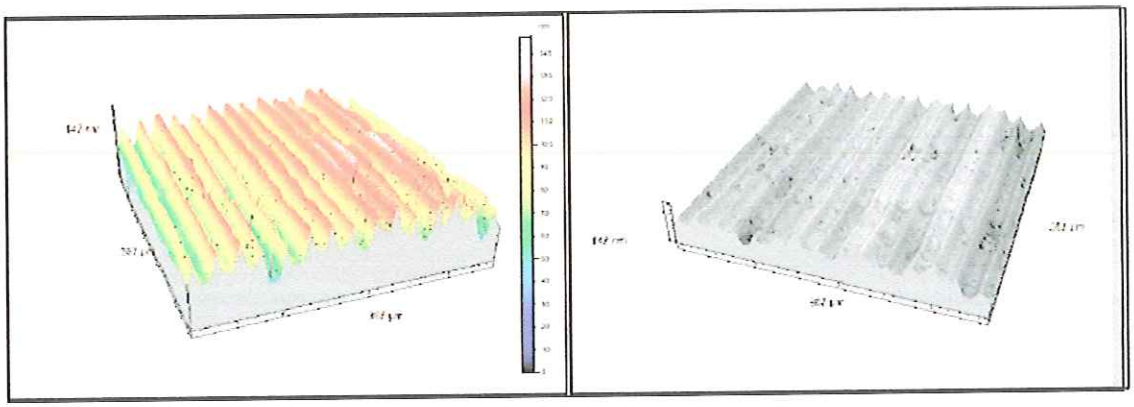

Figura 5.68 – Imagem topográfica do setor 8

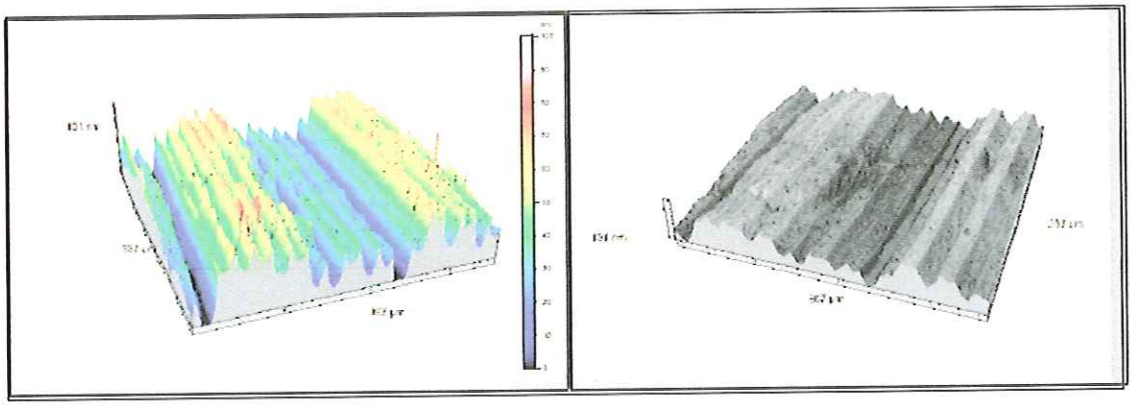

Figura 5.69 – Imagem topográfica do setor 9

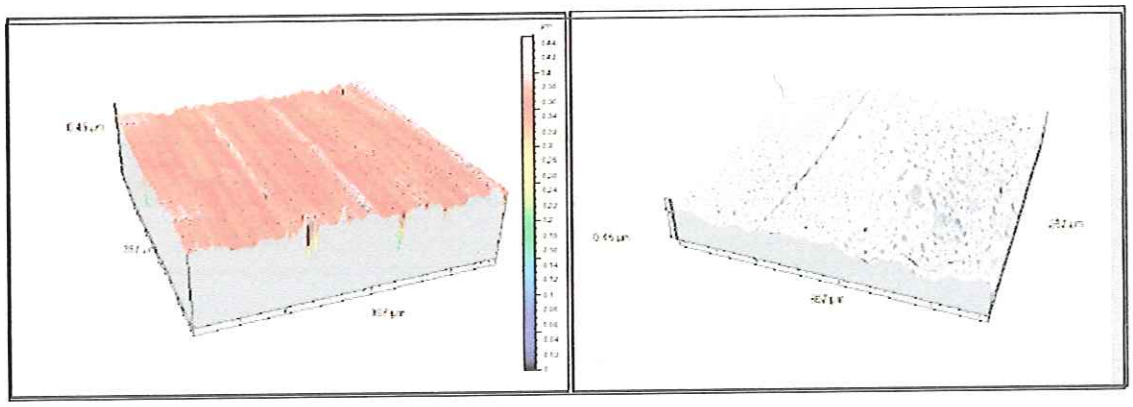

Figura 5.70 – Imagem topográfica do setor 10

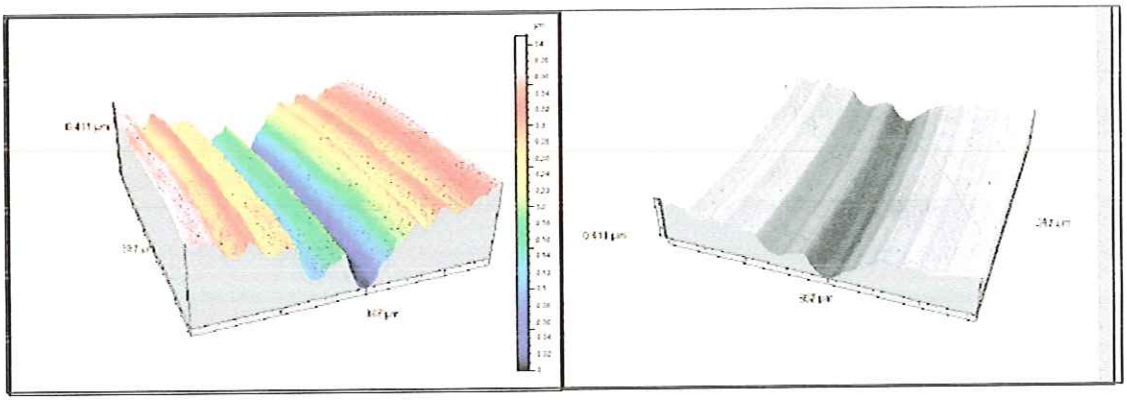

Figura 5.71 – Imagem topográfica do setor 11

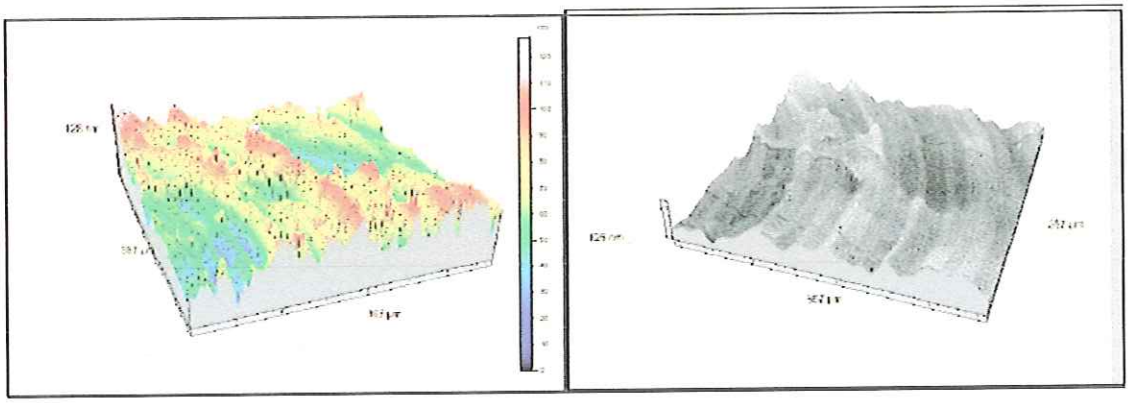

Figura 5.72 – Imagem topográfica do setor 12

CAPÍTULO VI

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as análises dos resultados das medições. Análises estas que conduzirão a avaliação da exatidão da medição da rugosidade superficial e a capabillidade do controle superficial do laboratório de usinagem de ultraprecisão. Para tanto serão apresentadas em duas partes:

6.1 - Análise dos Resultados das Medições Efetuadas na Peça 1

A seguir, serão analisados os resultados obtidos através dos quatro aparelhos utilizados, conforme comentados nos capítulos 4 e 5, nas medições executadas na peça 1.

6.1.1 - Avaliação das Imagens Obtidas Através do Microscópio Vertical

Da observação realizada nas superfícies fotografadas, não se constatou nada que pudesse interromper o processo em qualquer dos setores usinados. Assim, deu-se o prosseguimento das análises.

6.1.2 - Avaliação das Medições da Rugosidade Obtida com o Instrumento PM

A figura 6.1, mostra, graficamente, uma comparação entre os valores de Ra e Rz.

Ao avaliar os resultados obtidos nas medições da rugosidade com o PM, conforme mostra o gráfico da figura 6.1, pode-se observar que os valores dos setores 5 e 6 são muito altos.

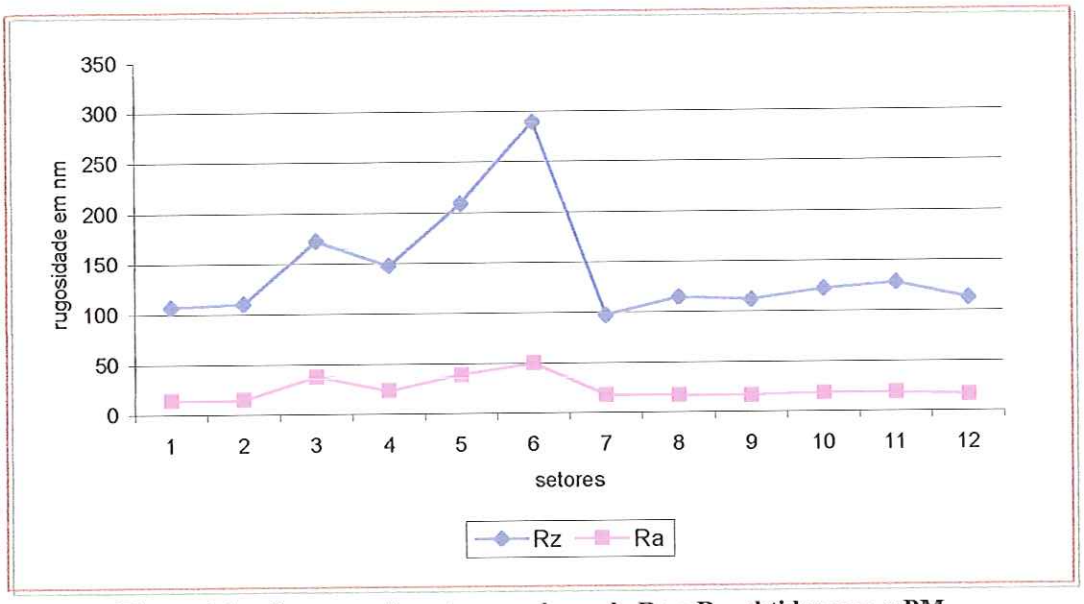

Figura 6.1 - Comparação entre os valores de Ra e Rz, obtidos com o PM.

◇◇**Observação 1:** analisando as imagens das figuras 5.17 e 5.18, obtidas com o TE e a figura 6.2, obtida com o IO, referente ao setor 5 e 6, comprova-se que a peça está bastante riscada nestes setores e que portanto, os valores aí encontrados serão desconsiderados para análise.

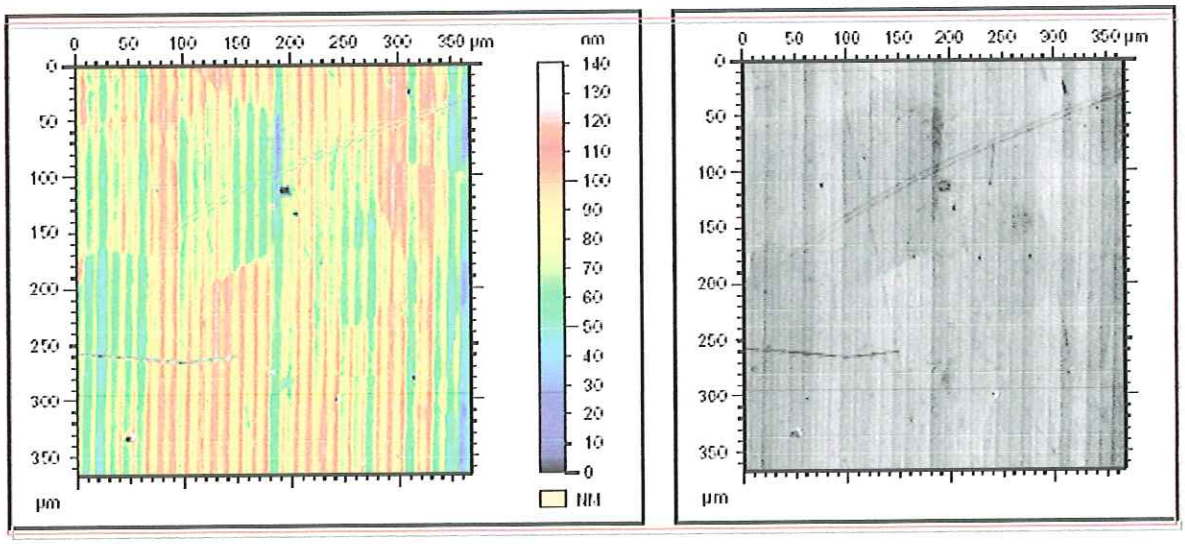

Figura 6.2 – Imagem do setor 5 (TE).

6.1.3 - Avaliação das Medições de Rugosidade Obtida com os AFMs, TE e TD

A figura 6.3 mostra graficamente uma comparação entre os valores Ra e Rz obtidas com o TE.

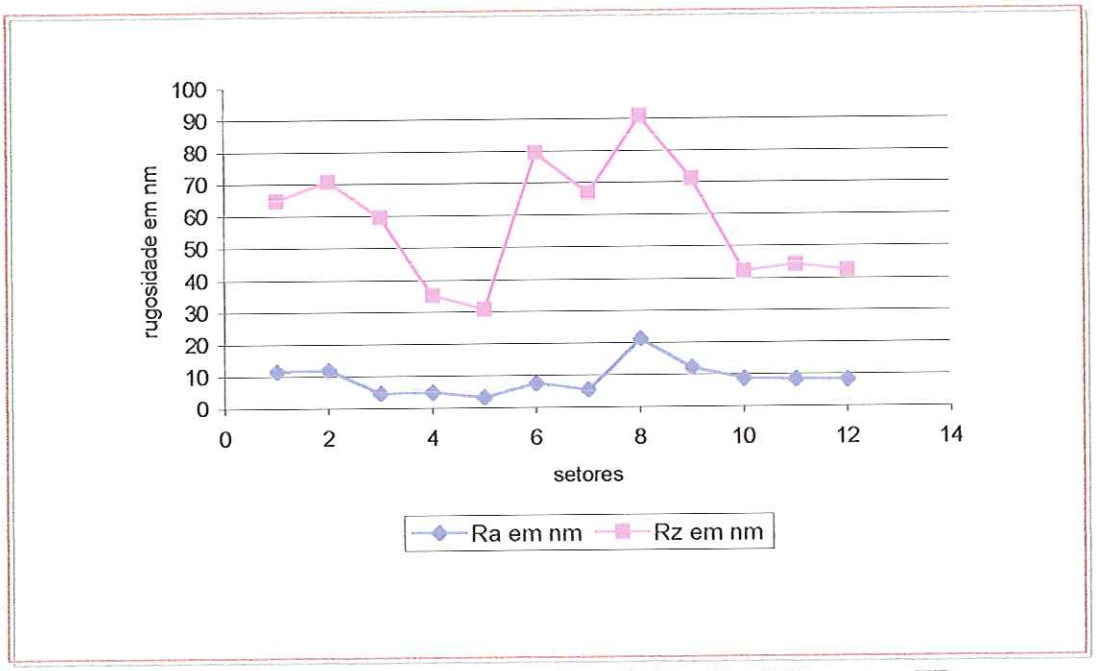

Figura 6.3 – Comparação entre os valores de Ra e Rz obtidos com o TE.

◢◤Avaliando os resultados obtidos nas medições da rugosidade, com o AFM e TE, conforme mostra o gráfico da figura 6.3. Pode-se observar que o setor 8 apresenta um valor muito diferente dos demais.

◇◇**Observação 1:** Ao analisar a imagem deste setor, obtida com o TE, figura 5.20, constata-se que não há nenhuma irregularidade na área. Desta forma, pode-se concluir que esse valor pode ser identificado como sendo um erro acidental, segundo o *Critério de Chauvenet* (LINK, 2000). Este critério estabelece que uma medida x_i, equação 6.1, deve ser rechaçada se o valor de r calculado for maior que o valor de Rc, conforme tabela 6.1, em função do número de medições efetuadas.

$$r = \frac{\left| x_i - \bar{X} \right|}{s(X)} \tag{6.1}$$

Tabela 6.1 – Valor de Rc em função do número de medições efetuadas

n	2	3	4	5	6	7	10	15	25	50	100
Rc	1,15	1,38	1,54	1,65	1,73	1,80	1,96	2,13	2,33	2,57	2,81

Fonte: Link (2000).

◇◇**Observação 2:** Efetuando-se o cálculo de r, conforme equação 6.2, com valores da média e desvio padrão, de acordo com o que consta na tabela 6.2, pode-se concluir que o valor obtido no setor 8 pode ser desconsiderado.

$$r = \frac{|21 - 8{,}8|}{4{,}89} = 2{,}49 \qquad (6.2)$$

Tabela 6.2 – Valores de Ra (em nm), efetuados com o TE

Medida realizada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	média	Desvio padrão
Ra (nm)	11,3	11,7	4,43	4,74	3,0	7,3	5,2	21,0	12,0	8,5	8,1	8,1	8,8	4,9

O gráfico da figura 6.4, mostra uma comparação dos resultados de Ra, medidos com o TE e com os valores obtidos com o PM, eliminando os setores 5, 6 e 8. E o gráfico da figura 6.5, mostra uma comparação dos resultados de Rz.

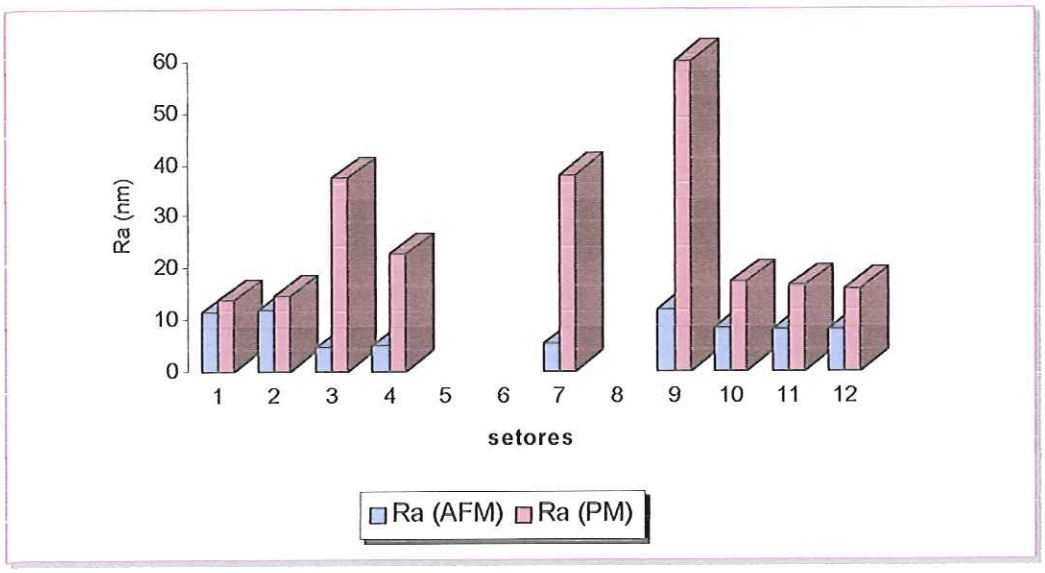

Figura 6.4 –Comparação entre os valores de Ra (TE) e Ra (PM), com os valores dos setores 5, 6 e 8 rechaçados.

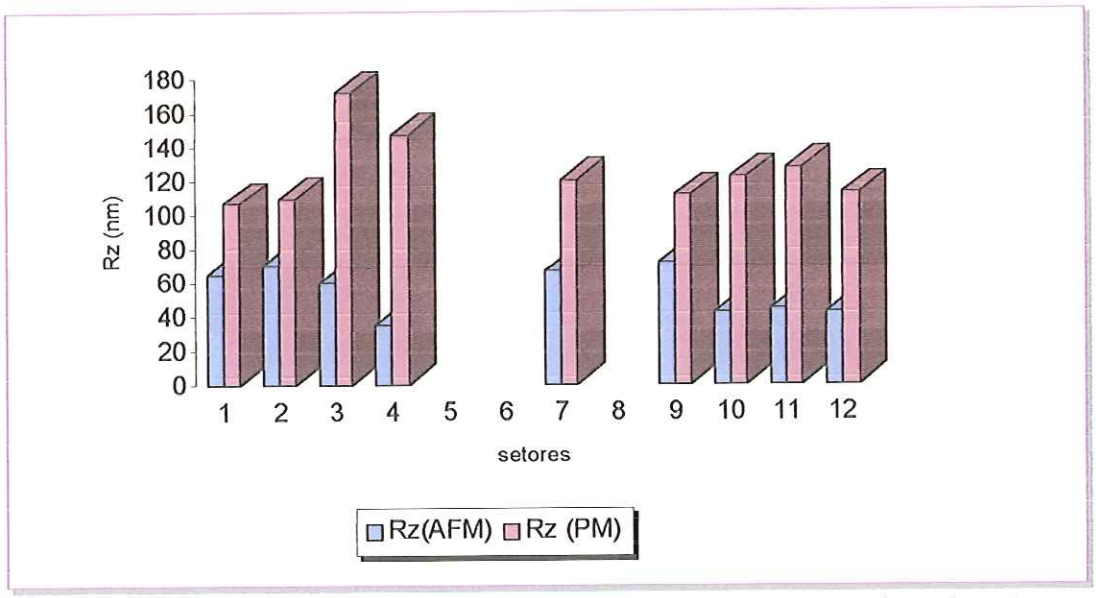

Figura 6.5 –Comparação entre os valores de Rz (TE) e Rz (PM), com os valores dos setores 5, 6 e 8 rechaçados.

O gráfico da figura 6.6, mostra uma comparação entre as linhas de tendência dos resultados de Ra, medidos com o TE e o PM. Em ambos os gráficos foram eliminados os setores 5, 6 e 8.

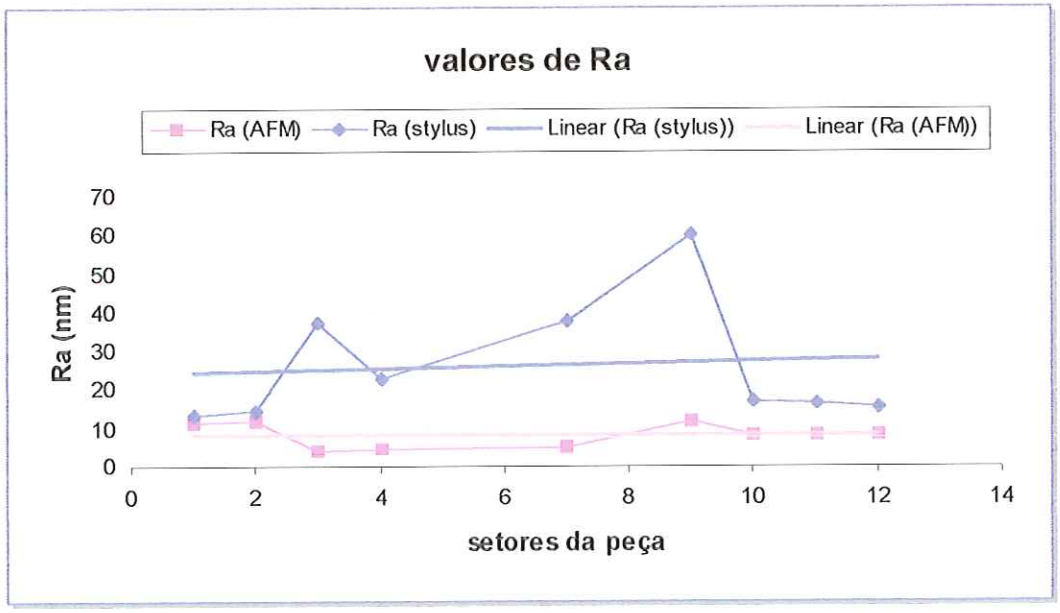

Figura 6.6 – Comparação entre as linhas de tendência dos valores de Ra.

O gráfico da figura 6.7, mostra uma comparação entre as linhas de tendência dos resultados de Ra, medidos com o TE e o PM. Em ambos os gráficos foram eliminados os setores 5, 6 e 8.

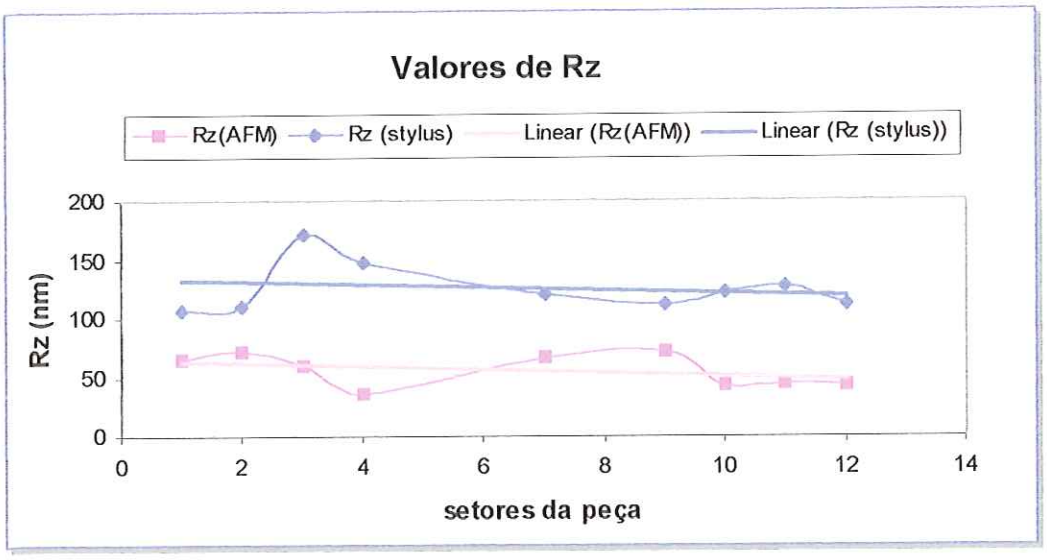

Figura 6.7 – Comparação entre as linhas de tendência dos valores de Rz.

◇◇**Observação 3:** Observando as linhas de tendência nos gráficos das figuras 6.6 e 6.7, nota-se que as mesmas são paralelas, desta forma mostram que os parâmetros analisados pouco dependem das condições de usinagem (otimizadas) que foram utilizadas.

◢◤ Como mencionado na observação 2, do item 5.3, os resultados das medições efetuadas com o TD, foram excessivamente altos. Assim sendo, estes resultados não serão analisados.

◇◇**Observação 4:** A diferença entre os gráficos Ra e Rz é normal, uma vez que Ra representa um valor médio para as rugosidades enquanto que, Rz ressalta a existência de picos e vales, por isso o ideal é ter ambos baixos e aí, ter-se-á uma superfície espelhada. Os valores mais altos de Rz mostram que a usinagem ainda deixa "riscos" significativos.

6.1.4 - Avaliação das Medições de Rugosidade Obtidas com o IO

A figura 6.8 mostra graficamente uma comparação entre os valores de Ra e Rz.

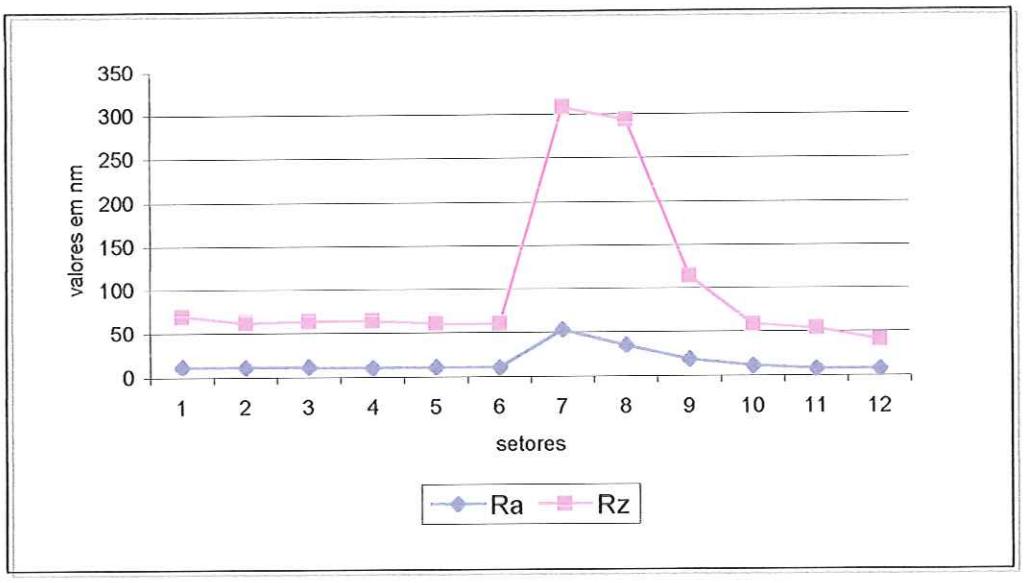

Figura 6.8 - Comparação entre os valores de Ra e Rz, obtidos com o IO.

◢◤Avaliando os resultados obtidos nas medições de rugosidade, sem contato, com o IO, conforme mostra o gráfico da figura 6.8, pode-se observar que os setores 7 e 8, apresentam valores muito altos.

◇◇**Observação 1:** Ao analisar a imagem topográfica do setor 7, obtida com o IO, apresentadas pelas figuras 5.43 e 6.9, em ambas, com as cores representando a altura dos picos e vales, de acordo com a escala estabelecida na figura, e os gráficos das medições executadas neste setor, na figura 6.10. Pode-se constatar que os picos são bem maiores que os vales.

EESC · USP
Biblioteca
CAMPUS DE S. CARLOS

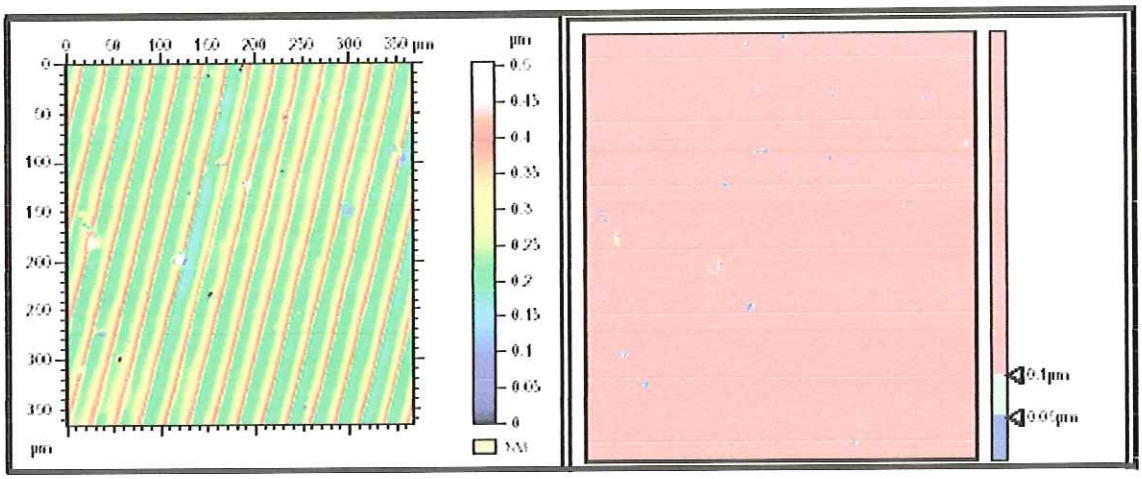

Figura 6.9 – Imagem topográfica do setor 7.

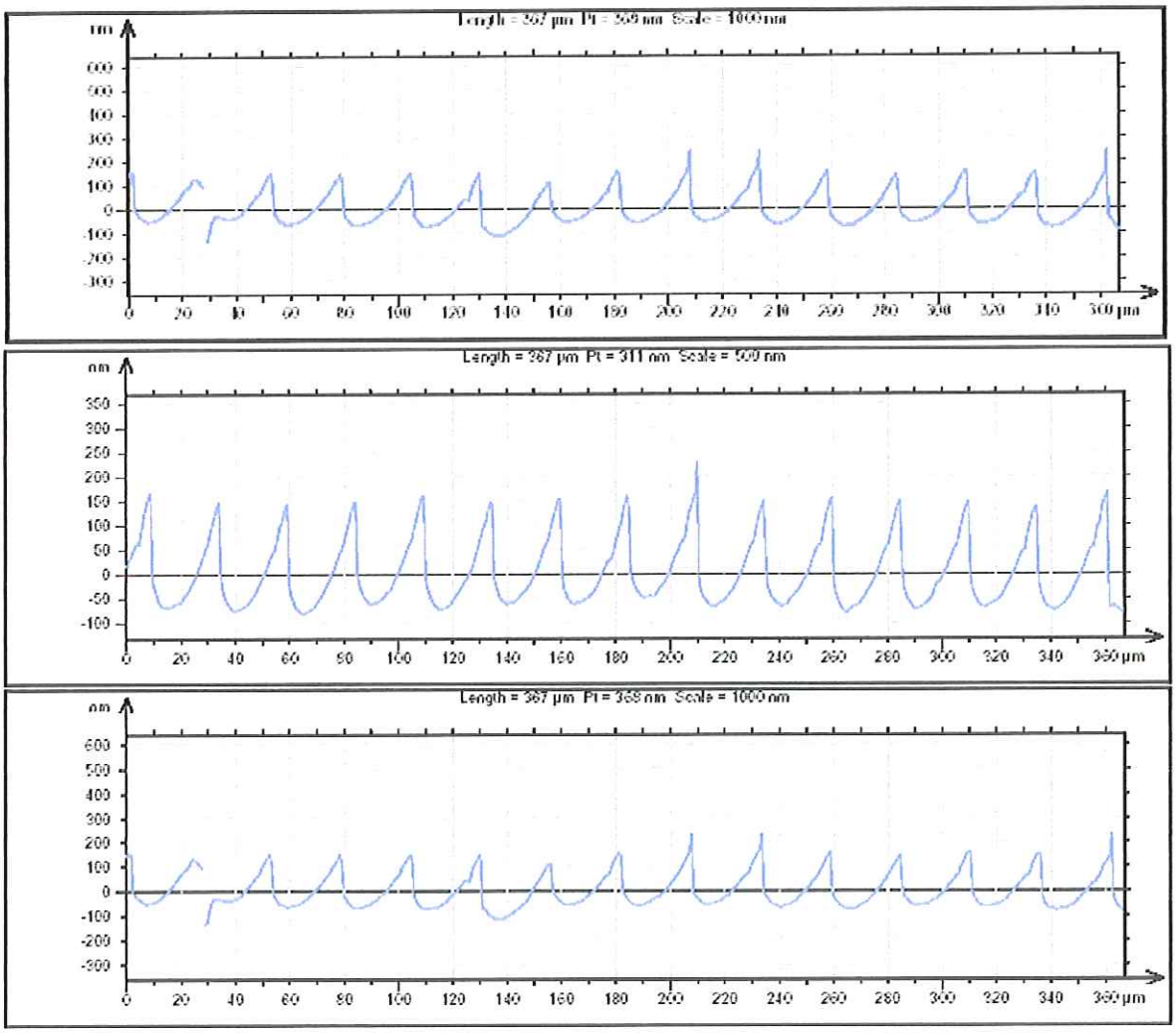

Figura 6.10 – Gráficos das medições efetuadas no setor 7.

◇◇**Observação 2:** Numa análise visual da peça, é aparente uma contaminação por oxidação no setor 8. Ao analisar as imagens deste setor, obtidas com o Talysurf CCI3000, apresentadas pelas figuras 5.44 e 6.11 mostrando as imagens topográficas da superfície em 3D e a topografia em 2D, respectivamente (em ambas as cores representando a altura dos picos e vales, de acordo com a escala estabelecida na figura), e pela figura 6.12, que apresenta o gráfico de uma das medições de Ra efetuada neste setor. Pode-se constatar que existem alguns picos que não são conseqüência da usinagem, o que confirma a existência de oxidação, a qual provavelmente interferiu no resultado das medições.

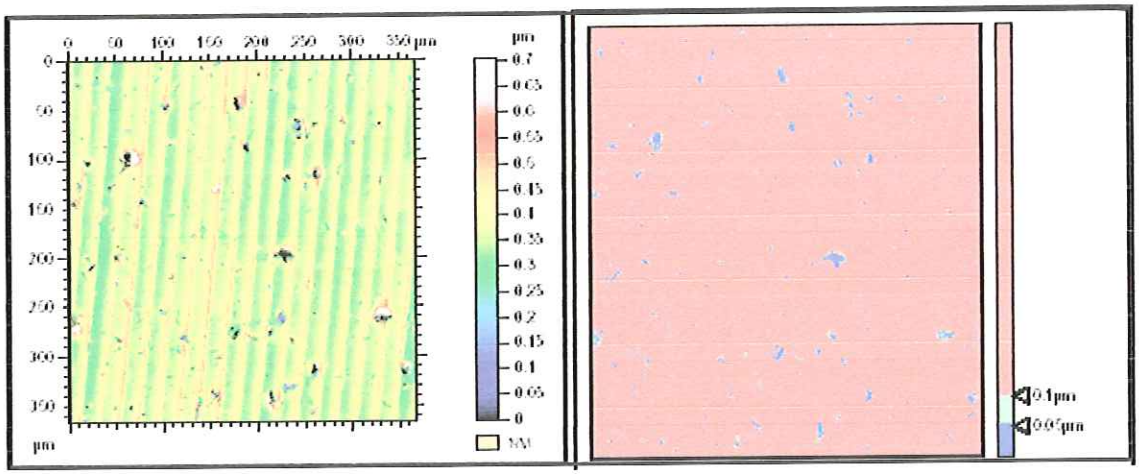

Figura 6.11 – Imagem topográfica do setor 8.

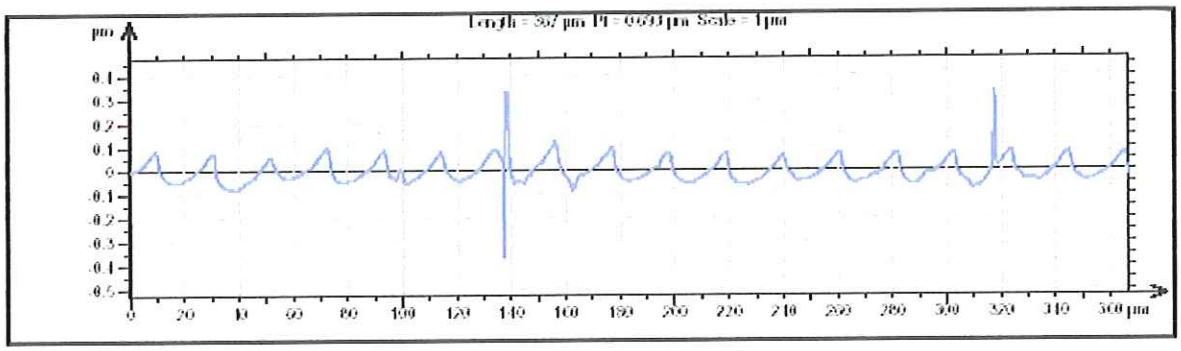

Figura 6.12 – Gráfico da medição de Ra efetuada no setor 8.

6.1.5 - Avaliação Através da Comparação dos Resultados Obtidos Entre os Quatros Aparelhos

As tabelas 6.3 e 6.4 mostram os valores da rugosidade Ra e Rz, obtidos com os quatro aparelhos. Em azul estão os valores, os quais por alguma razão apresentaram valores muito altos, como já comentados nos itens 6.3 e 6.4, deste capítulo. Ainda nesta tabela também estão os parâmetros de usinagem da amostra.

Tabela 6.3 – Valores de Ra obtidos com os 4 aparelhos – peça 1

setores	Valores de Ra em nm				Parâmetros de usinagem	
	PM	TE	TD	IO	ap (μm)	f (μm/rev)
1	13,6	11,3	29	11,0		10
2	14,4	11,7	64	11,0		15
3	37,4	4,4	190	11,0		15
4	22,6	4,7	169	10,1	10	15
5	38,0	3,0	115	10,2		10
6	60,0	7,3	119	10,0		10
7	17,2	5,2	178	52,8	5	25
8	16,4	21,0	85	34,3	15	20
9	15,8	12,0	25	18,2	20	15
10	17,8	8,5	108	10,5	25	15
11	18,2	8,1	114	7,1	50	10
12	15,8	8,1	134	7,1	20	20

Tabela 6.4 – Valores de Rz obtidos com os 4 aparelhos – peça 1

setores	Valores em nm				Parâmetros de usinagem	
	PM	TE	TD	IO	ap (μm)	f (μm/rev)
1	107	64,6	6460	58,4		10
2	110	70,6	6490	51,0		15
3	172	59,4	5040	52,4		15
4	147	35,0	8820	53,6	10	15
5	208	31,0	6020	50,6		10
6	289	79,3	5620	49,9		10
7	120	66,6	5600	254,6	5	25
8	114	90,7	6930	258,6	15	20
9	111	71,1	6730	95,2	20	15
10	122	42,1	6090	47,7	25	15
11	127	44,1	5430	46,3	50	10
12	112	42,2	5420	33,1	20	20

As figuras 6.13 e 6.14, mostram graficamente, os valores de Ra e Rz, respectivamente, porém tendo extraído os valores que estão em azul nas tabelas 6.3 e 6.4.

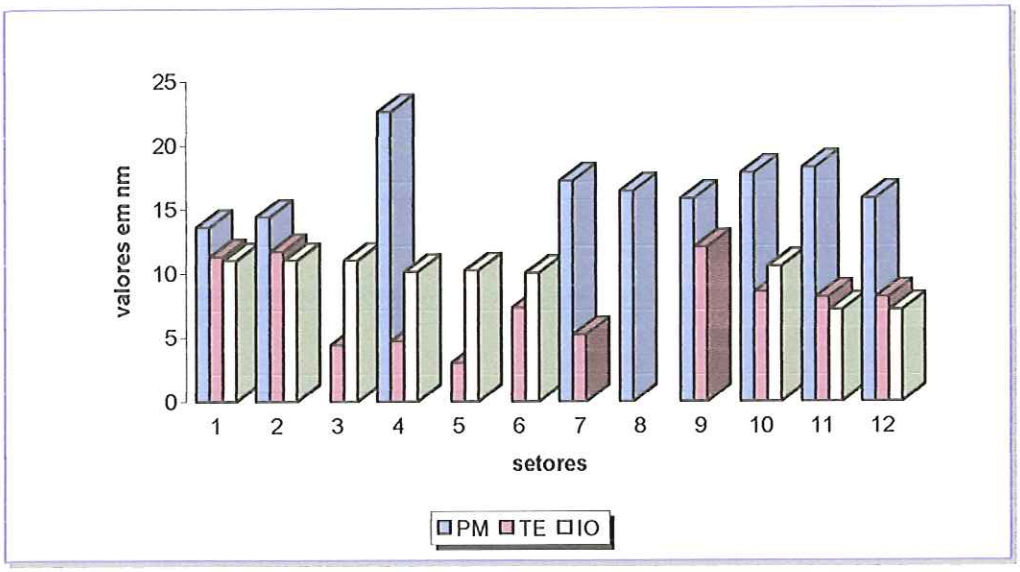

Figura 6.13 – Comparação entre valores de Ra obtidos com os três aparelhos.

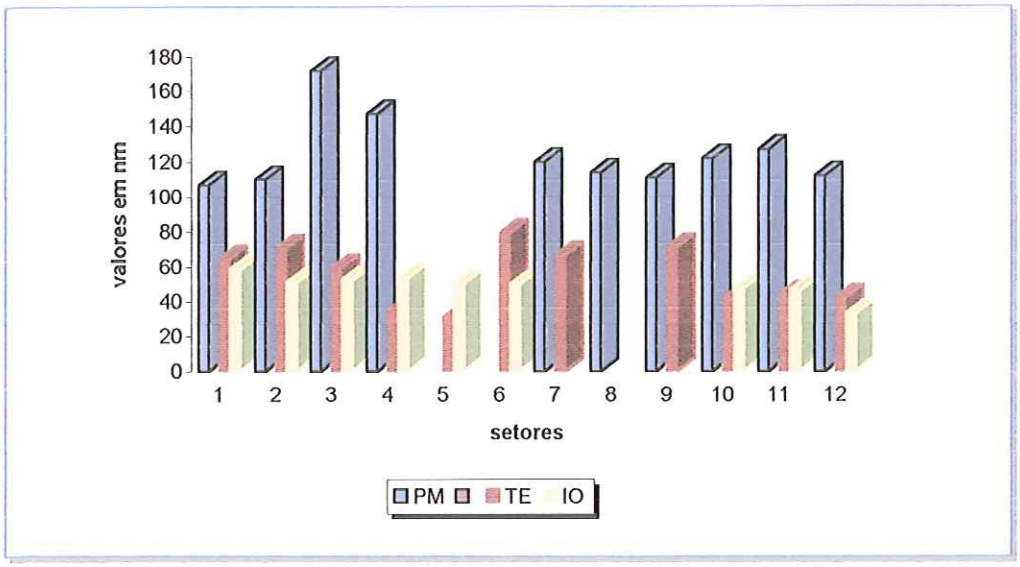

Figura 6.14 – Comparação entre os valores de Rz obtidos com os três aparelhos.

◇◇**Observação 1:** Observando a tabela 6.3 e o gráfico da figura 6.13, nota-se que os valores de Ra obtidos com o aparelho PM, são maiores que os outros dois aparelhos. E que o TE apresenta valores menores que o IO.

◇◇**Observação 2:** Observando a tabela 6.4 e o gráfico da figura 6.14, nota-se que os valores de Rz obtidos com o aparelho PM são maiores que os outros dois aparelhos.

As figuras 6.15 e 6.16, mostram graficamente, os valores de Ra e Rz, respectivamente, juntamente com os parâmetros de usinagem.

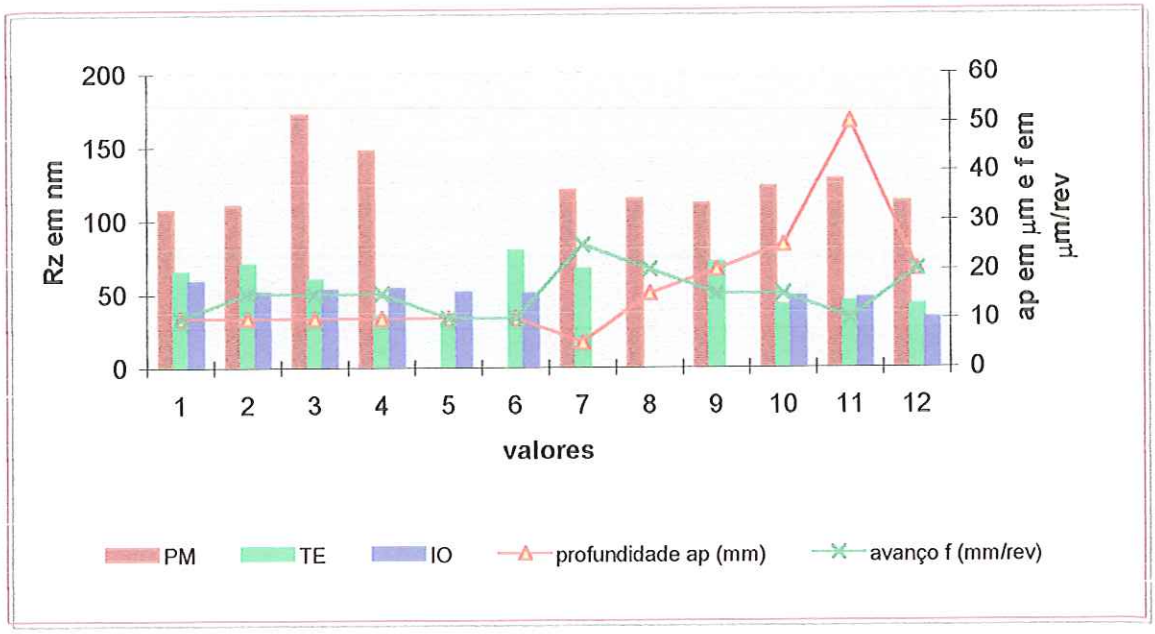

Figura 6.15 – Valores de Ra e parâmetros de usinagem.

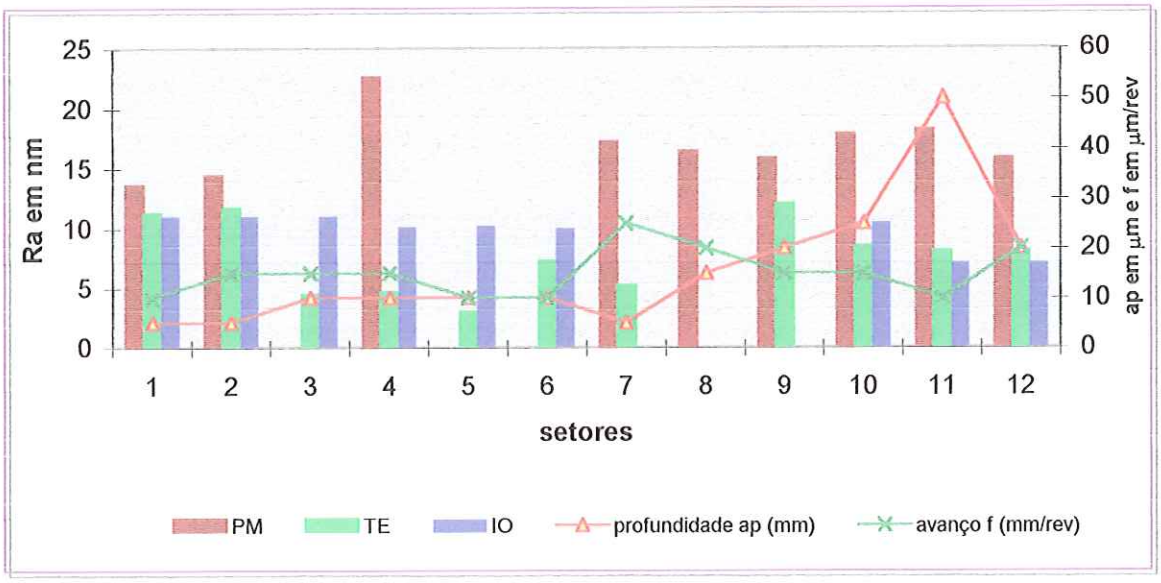

Figura 6.16 – Valores de Rz e parâmetros de usinagem.

◇◇**Observação 3:** Antes de concluir o porque das *observações 1 e 2,* serão apresentadas algumas das diferenças técnicas entre os três aparelhos utilizados.

6.1.6 - Avaliação Através da Comparação dos Dados Técnicos Entre os Três Aparelhos

A tabela 6.5, mostra alguns dados técnicos, que constam das especificações dos três aparelhos de medição de rugosidade, no ato das medições executadas. Os quais são relevantes para a análise dos resultados, são eles: tipo de filtro, *cutt-off*, resolução em Z, resolução lateral, quantidade de pontos/medida, área de medição e capacidade de medição em Z.

Tabela 6.5 – Especificações técnicas aplicadas durante as medições

Especificações técnicas	Aparelho de medição de rugosidade		
	PM	TE	IO
Filtro	Gaussian	Gaussian	Gaussian
Cut-off	800 μm	-	80 μm
Resolução em Z	5 nm	0,01nm	0,01nm
Resolução lateral	(em X) 0,1 μm	0,1nm	0,36 μm
Pontos/medida	-	500	1 milhão
Área medida	250μm (linear - X)	50 x 50 μm	367 x 367 μm
capacidade em Z	-	10 μm	100 μm

◇◇**Observação 1:** O campo de medição do TE é muito menor que os outros dois aparelhos. Sendo assim, o mais provável é fornecer valores de Ra bem menores que os outros, uma vez que este parâmetro fornece o valor da área analisada. Porém, na avaliação de Rz, a tendência é fornecer valores maiores, porque este parâmetro fornece a altura média de picos e vales.

◇◇**Observação 2:** O *cut-off* utilizado no PM é maior que o comprimento analisado. Assim, muito pouco foi filtrado na medição.

◇◇**Observação 3:** o aparelho PM na avaliação do parâmetro Ra, fornece o valor da altura de um retângulo, cuja área deste retângulo é igual a soma absoluta das áreas delimitas entre o perfil de rugosidade e a linha média.. Enquanto que o aparelho IO se baseia no foco de marcas da superfície de medição. Ou seja, fornece uma média dos sinais obtidos de uma área destas marcas. Desta forma a parte lisa da superfície não é considerada, conseqüentemente os resultados são bem menores (MILLS, 2005).

◇◇**Observação 4:** O aparelho PM tende a tornar os picos mais largos, conseqüentemente aumenta a área analisada. Mesmo o equipamento possuindo recursos para compensar o raio do apalpador, ainda assim, tende a aumentar no valor final da rugosidade (MILLS, 2005).

◇◇**Observação 5:** O PM tende a empurrar as partículas de contaminação que possam existir na superfície analisada, como por exemplo, filme de óleo. Já os outros dois equipamentos não podem fazer o mesmo (MILLS, 2005).

6.2 - Análise dos Resultados das Medições Efetuadas na Peça 2

6.2.1 - Avaliação das Medições da Rugosidade Obtida com os Instrumentos PM e IO

Para a realização da medição da peça 2, foi alterado o comprimento avaliado pelo PM, passando para 1mm. E o valor do *cut-off* foi mantido, 0,8mm. A tabela 6.6, apresenta os valores de Ra obtidos com os aparelhos PM e IO e os parâmetros de usinagem da peça.

Tabela 6.6 – Valores de Ra e parâmetros de usinagem

Parâmetros de usinagem			Valores da rugosidade Ra em (nm)	
setor	f (µm/rev)	ap (µm)	PM	IO
1	50	2	53	37,8
2	25	2	23	11,3
3	20	2	23	11,3
4	15	2	18	26,5
5	10	2	18	11,1
6	5	2	12	9,59
7	50	1	54	43,9
8	25	1	18	10,5
9	20	1	16	9,05
10	15	1	13	8,46
11	10	1	35	22
12	5	1	22	7,39

◇◇**Observação 1:** De acordo com a equação 2.3, quanto maior o valor do avanço, maior será a rugosidade Ra.

◇◇**Observação 2:** Pode-se observar na tabela 6.6 que os valores do setor 11 estão fora da lógica apresentada, onde quanto maior f (µm/rev), na mesma proporção, o valor da rugosidade Ra também aumenta. Analisando a imagem topográfica deste setor, figura 5.59, nota-se um vale mais profundo nesta região, assim como riscos, provável justificativa para o alto valor de Ra.

◇◇**Observação 3:** Pode-se observar na tabela 6.6 que o valor do setor 4, medido com o IO, também está fora da lógica apresentada. Analisando as figuras 5.52 e 6.17, que são imagens topográficas deste setor, nota-se um risco bem acentuado nesta região, provável justificativa para o alto valor de Ra.

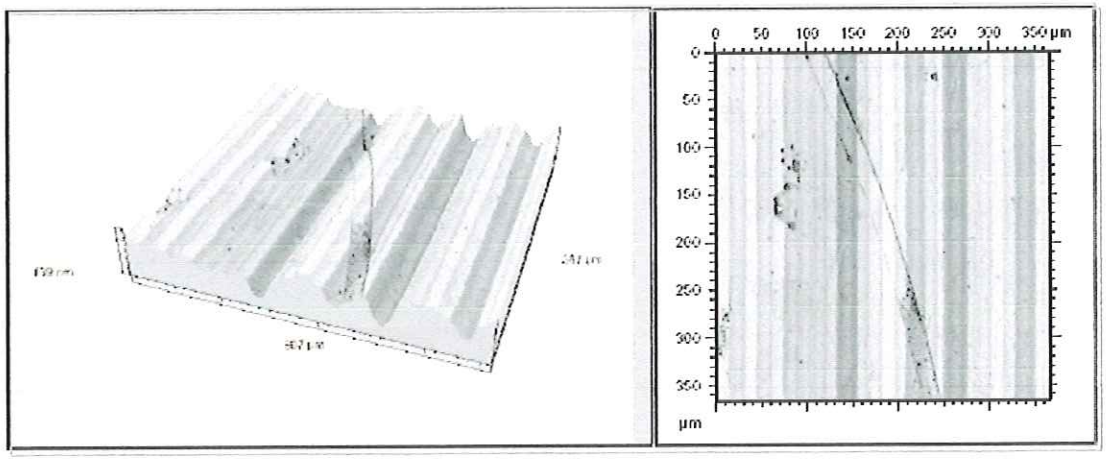

Figura 6.17 – Imagens topográficas do setor 4.

◇◇**Observação 4:** Pode-se observar na tabela 6.6 que o valor do setor 12, medido com o PM, também está fora da lógica apresentada. Analisando as figuras 5.60 e 6.18, que são imagens topográficas deste setor, obtidas com o IO, nota-se que é uma região bastante irregular por estar bem próxima do centro, e portanto pode ter sido executado medições em partes mais complicadas deste setor.

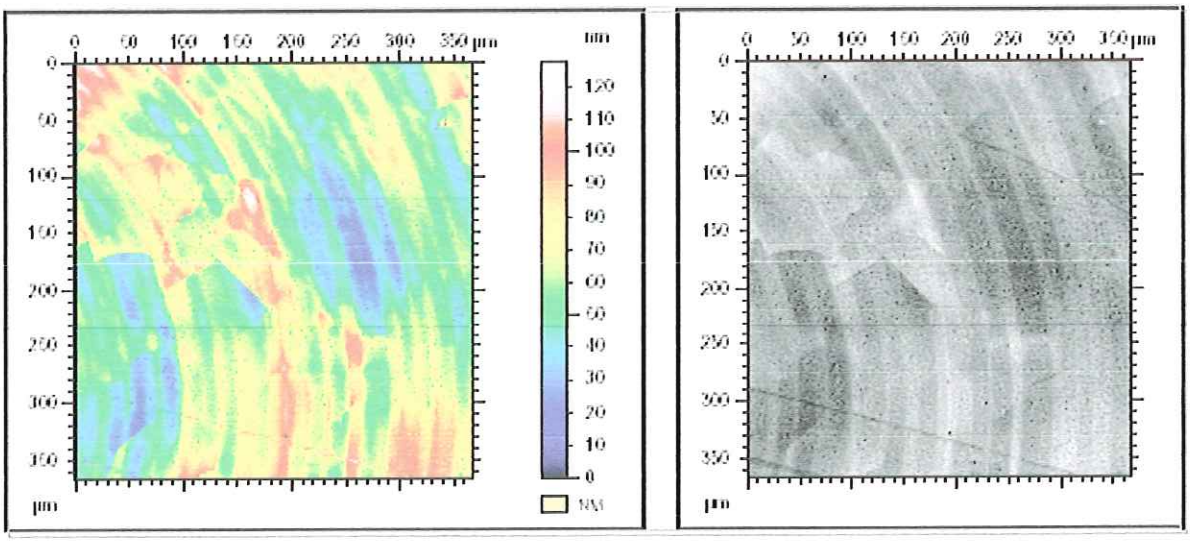

Figura 6.18 – Imagens topográficas do setor 12.

A tabela 6.7 mostra os valores de Rz medido com os aparelhos PM e IO e os parâmetros de usinagem.

Tabela 6.7 – Valores de Rz e parâmetros de usinagem

	Parâmetros de usinagem		Valores da rugosidade Rz em (nm)	
Setor	**f(μm/rev)**	**ap (μm)**	**PM**	**IO**
1	50	2	244	159
2	25	2	116	26,5
3	20	2	111	49,3
4	15	2	100	32,5
6	5	2	81	57,7
7	50	1	243	218
8	25	1	108	52,4
9	20	1	120	73,3
10	15	1	77	166
11	10	1	151	95
12	5	1	119	45,9

A figura 6.19, mostra, graficamente, os valores de Ra, obtidos com o PM e o IO, sendo retirado os valores dos setores 4 e 11 (obtidos com o IO) e o setor 12 (obtido com o PM). Também apresenta os parâmetros de usinagem.

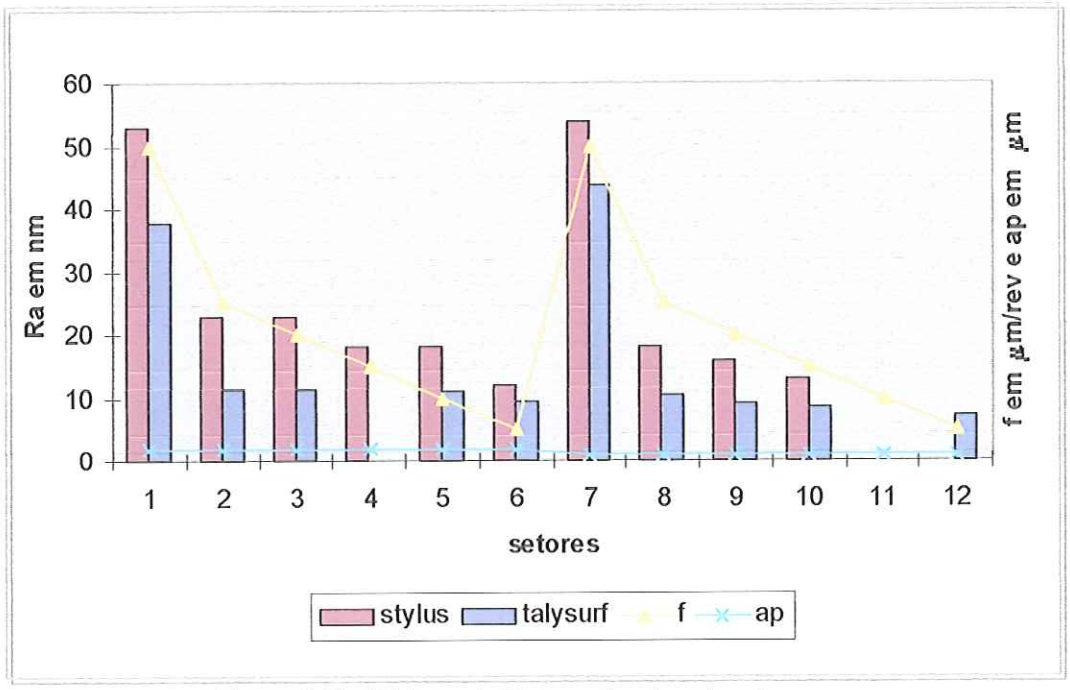

Figura 6.19 – Valores de Ra e parâmetros de usinagem.

◇◇**Observação 5:** Pode-se 0bservar pela figura 6.19, que aumentando o valor do avanço, também aumenta a rugosidade.

6.2.2 - Cálculo da Incerteza dos Resultados das Medições de Ra realizadas com os Instrumentos PM e IO

A tabela 6.8, apresenta as medições de Ra, obtidas com os instrumentos PM e IO, assim como a média e desvio padrão dos valores medidos.

Tabela 6.8 - Valores da rugosidade Ra em nm

Medicos com PM					Medições com IO				
m1	m2	m3	média	Desvio padrão	m1	m2	m3	média	Desvio padrão
50	54	55	53	2,6	36	38,6	38,8	37,8	1,56
20	24	25	23	2,6	10,8	11,5	11,6	11,3	0,44
21	24	24	23	1,7	10,1	11,9	11,9	11,3	1,04
17	18	19	18	1,0	24,5	27,0	27,0	26,5	1,44
15	19	20	18	2,6	9,6	11,6	12,1	11,1	1,32
11	12	13	12	1,0	8,5	9,9	10,4	9,6	0,98
50	55	57	54	3,6	42,7	44,6	44,4	43,9	1,04
15	19	20	18	2,6	9,4	10,8	11,3	10,5	0,98
15	16	17	16	1,0	8,5	9,3	9,5	9,1	0,53
12	13	14	13	1,0	8,4	8,0	8,6	8,5	0,31
33	36	36	35	1,7	20,3	22,8	22,9	22,0	1,47
19	23	24	22	2,6	6,6	7,7	7,9	7,4	0,70

No processo de medição de rugosidade, é necessário determinar a influência da incerteza no seu resultado. Assim, é construído um diagrama de causa e efeito, conforme figura 6.20, e quantificado as componentes de incertezas do processo (o Apêndice II é explicativo para o cálculo da incerteza).

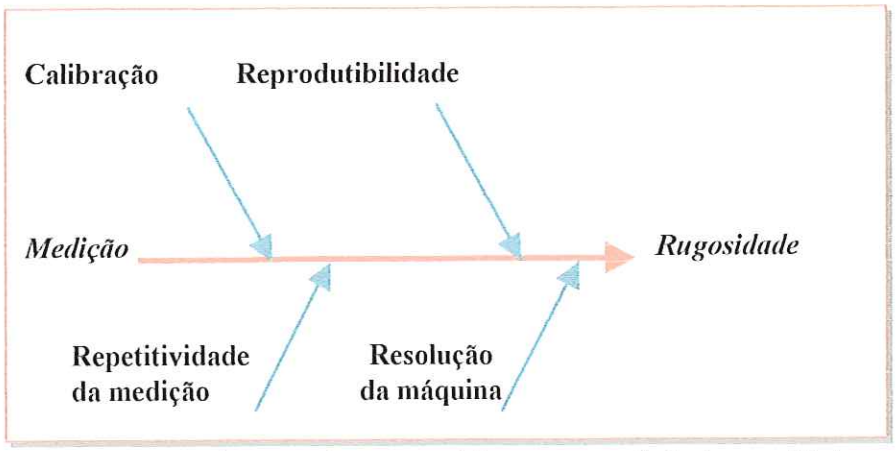

Figura 6.20 – Diagrama de causa e efeito para a medição de rugosidade.

As tabelas 6.9 e 6.10, mostram os cálculos da incerteza expandida, para o pior e o melhor caso, respectivamente, ou seja, a pior e a melhor repetitividade, dos valores de Ra obtidos com o IO, na peça 2.

Tabela 6.9 - Cálculo da incerteza do resultado da medição, com o IO, no setor 7

Grandezas	Estimativa	Distribuição de probabilidades	Incertezas padronizadas		Coeficiente de sensibilidade	Incerteza combinada	Graus de liberdade
Padrão	43	R	1,732051	%	0,43	0,745	infinito
Dispersão	43,9	N	0,600444	nm	1	0,600	2
Resolução	0	R	0,028868	nm	1	0,029	infinito
Reprodutibilidade	0	R	0,11547	%	0,43	0,050	infinito
						0,96	13
					2,24	**2,1 nm**	

Tabela 6.10 - Cálculo da incerteza do resultado da medição, com o IO, no setor 10

Grandezas	Estimativa	Distribuição de probabilidades	Incertezas padronizadas		Coeficiente de sensibilidade	Incerteza combinada	Graus de liberdade
Padrão	8,5	R	1,732051	%	0,085	0,147	infinito
Dispersão	8,5	N	0,178979	nm	1	0,179	2
Resolução	0	R	0,028868	nm	1	0,029	infinito
Reprodutibilidade	0	R	0,11547	%	0,085	0,010	infinito
						0,23	6
					2,66	**0,6 nm**	

As tabelas 6.11 e 6.12, mostram os cálculos das incertezas expandidas, para o pior e o melhor caso, respectivamente ou seja, a pior e a melhor repetitividade, dos valores de Ra obtidos com o PM, na peça 2.

Tabela 6.11 - Cálculo da incerteza do resultado da medição, com o PM, no setor 7

Grandezas	Estimativa	Distribuição de probabilidades	Incertezas padronizadas		Coeficiente de sensibilidade	Incerteza combinada	Graus de liberdade
Padrão	54	R	2,886751	%	0,54	1,559	infinito
Dispersão	54	N	2,078461	nm	1	2,078	2
Resolução	0	R	1,443376	nm	1	1,443	infinito
Reprodutibilidade	0	R	0,11547	%	0,54	0,062	infinito
						2,97	8
					2,37	**7,1 nm**	

Tabela 6.11 - Cálculo da incerteza do resultado da medição, com o PM, no setor 10

Grandezas	Estimativa	Distribuição de probabilidades	Incertezas padronizadas		Coeficiente de sensibilidade	Incerteza combinada	Graus de liberdade
Padrão	13	R	2,886751	%	0,13	0,375	infinito
Dispersão	13	N	0,57735	nm	1	0,577	2
Resolução	0	R	1,443376	nm	1	1,443	infinito
Reprodutibilidade	0	R	0,11547	%	0,13	0,015	infinito
						1,60	118
					2,03	**3,2 nm**	

◇◇**Observação 1:** A incerteza expandida com o IO, no setor 7, pior caso, é de 2,1nm. E para o setor 10, melhor caso, é de 0,6nm.

◇◇**Observação 2:** A incerteza expandida com o PM, no setor 7, pior caso, é de 7,1nm. Para o setor 10, melhor caso, é de 3,2nm.

◇◇**Observação 3:** Nos ensaios realizados, como as superfícies usinadas são espelhadas - portanto, não havia ondulações com freqüências próximas das dos *cut-off*-, o uso de diferentes *cut-off's* -que são menores do que as incertezas calculadas-, não alteram significativamente os resultados.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma metodologia para a avaliação da capabilidade de controle de superfícies técnicas usinadas em torno de ultraprecisão. Seu desenvolvimento se deu pela necessidade de se agregar confiabilidade à competência do laboratório de usinagem de ultraprecisão em realizar o controle de acabamento superficial de superfícies técnicas produzidas. Esta confiabilidade deve estar embasada em métodos e processos que sejam claramente demonstrados, para que seu resultado seja aceito, com o objetivo de gerar informações confiáveis.

É fundamental quando analisando uma superfície que se saiba exatamente:

a) o que controlar;
b) como controlar e
c) qual o equipamento mais adequado para se realizar esse controle.

Estas foram às premissas para as peças usinadas em um torno de ultraprecisão, controlando-se a rugosidade superficial em três tipos de equipamentos, com métodos de medições distintos .

De posse do resultado da medição de rugosidade, não se quer apenas um número, este deve estar associado à incerteza de medição, que especifica, quantitativamente, o grau de desconhecimento que se tem no resultado.

As análises dos resultados das pesquisas e das medições executadas, permitiram fazer a avaliação do processo de controle do estado das superfícies, e identificar particularidades em cada método utilizado.

7.1 – *O que controlar*

☞ Uma das formas de controle de superfície espelhada, obtida em torneamento de ultraprecisão, é através da rugosidade superficial, que de acordo com a tabela 4.7, deve ser < 0,03 μm para luz infravermelha ou < 0,005 μm para luz visível. Assim sendo, conclui-se que os resultados de Ra obtidos, com PM ou IO, estão dentro do esperado.

Para se obter superfície espelhada deve-se usar parâmetros de usinagem recomendados, conforme comprovado pela peça 2, que forneceu valores de Ra menores que a peça 1, com os instrumentos PM e IO.

É fundamental estabelecer o melhor parâmetro para o controle da rugosidade, para o método de medição escolhido. Foram escolhidos os parâmetros Ra e Rz, porque o primeiro informa a uniformidade da rugosidade através da média aritmética de vales e picos, e o Rz detecta se houve alguma ocorrência anormal durante a usinagem como riscos, trepidação, etc.

7.2 – *Como controlar*

O controle deve ser através de métodos de medição, pré-determinados, avaliando suas vantagens e desvantagens e características técnicas. Neste trabalho foram utilizados três métodos, através da utilização dos instrumentos: PM, AFM e IO, com os quais chegou-se as seguintes conclusões:

7.2.1 - Perfilômetro Mecânico (PM)

☞ É o método mais utilizado, por possuir normas técnicas nacionais e internacionais, portanto seus resultados podem ser rastreáveis, dando assim, maior segurança e confiança ao usuário.

☞ O apalpador pode empurrar algum contaminante que possa estar no percurso de medição, como, por exemplo, óleo.

☞ Executa a medição com certa rapidez.

☞ Quase não sofre a influência de vibrações.

☞ Os gráficos não reproduzem o real perfil da superfície, por que este depende do raio do apalpador. Também, do raio do apalpador depende a resolução lateral.

☞ A força devido à pressão exercida pelo apalpador sobre a peça pode danificar a superfície analisada, deixando um risco sobre a mesma, que, por fim, não se sabe se a rugosidade obtida é a real ou se está atenuada pelo dano causado pelo apalpador.

7.2.2 - Microscópio de Força Atômica (AFM)

☞ A área de medição é muito reduzida.

☞Segundo as pesquisas, nota-se que este equipamento vem sendo bastante utilizado nas medições de rugosidade em peça produzidas por ultraprecisão, pelo fato de produzir imagens topográficas em 3D. Também, por produzir imagens superficiais que permitem a análise dos grãos cristalográficos, que é um tipo de análise muito estudada para o controle de acabamento superficial em ultraprecisão. E ainda, por que apesar de ser um método de modo contato, não danifica a superfície da peça.

☞ A execução das medições é um pouco demorada devido aos ajustes e preparos do equipamento.

☞ A capacidade máxima, quanto à dimensão da amostra, é muito pequena. As amostras devem possuir um tamanho que muitas vezes é bem menor que o tamanho da peça usinada. O que implica na destruição da peça, e pode prejudicar o resultado final das medidas caso o corte da peça não deixe as amostras com uma forma completamente plana.

☞ A vibração tem forte influência no resultado das medições.

☞ A ponta de contato pode ser contaminada com muita facilidade, necessitando de troca, porém a mesma tem preço muito elevado, elevando o custo quando na utilização deste equipamento.

7.2.3 - Interferometria Óptica (IO)

☞ Produz imagem topográfica em 3D.

☞ O valor de Ra tem mais exatidão comparado ao PM, uma vez que este último, na avaliação do parâmetro Ra, fornece o valor da área de um retângulo, enquanto que o aparelho IO se baseia no foco de marcas da superfície de medição, ou seja, fornece uma média dos sinais obtidos de uma área destas marcas. Desta forma a parte lisa da superfície não é considerada, conseqüentemente os resultados são bem menores.

☞ O aparelho não sofre influência de vibrações, pois, possui um sistema pneumático, que elimina esta influência nas medições.

☞ Executa as medições e fornece vários tipos de imagens e gráficos, previamente selecionados, com muita rapidez.

☞ Tem uma base, suporte para as amostras, que possui um sistema de nivelamento da amostra.

☞ Fornece gráfico espectral e gráfico do perfil da usinagem, que são extremamente úteis em análise da rugosidade superficial em ultraprecisão.

☞ Não danifica a peça durante a análise.

☞ Aplica-se a qualquer superfície.

☞ Consegue atingir desde o ponto mais profundo até o topo do vale, sem distorcer o perfil real da superfície.

7.3 – *Qual o Equipamento mais Adequado para se Realizar esse Controle*

A escolha do equipamento depende da amplitude, resolução e exatidão que se deseja ou necessita para a medição. Portanto, deve-se analisar as seguintes características do equipamento, para se fazer a melhor escolha:

☞ Amplitude -faixa de medição-;

☞ *cut-off*;

☞ resolução vertical;

☞ resolução lateral;

☞ tipo de apalpação e

☞ formas de saída dos dados (valores numéricos, gráficos 2D; 3D).

7.4 – Conclusões sobre a Incerteza do Resultado da Medição

Só pode haver confiança no resultado de uma medição, se a ele estiver atribuída a sua incerteza, que segundo o VIM –Vocabulário Internacional de Metrologia – "*incerteza é um parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores*". Neste trabalho obteve-se as seguintes incertezas expandidas (**U**) para os resultados de Ra, no melhor caso, para a peça 2:

Com o IO ◈ **U = ± 0,6 nm**

Com o PM ◈ **U = ± 3,2 nm**

☞ Esta diferença nos valores das incertezas das medições, vem corroborar com o que foi mencionado no item 7.1.2.3 sobre as características deste tipo de equipamento.

7.5 – Comentário Final

☞ A peça 2 foi medida somente com o PM e IO, porque:

1) O instrumento PM é atualmente o mais utilizado nos laboratórios e também por está disponível no laboratório de usinagem de ultraprecisão da USP-São Carlos.
2) O instrumento IO apresentou dados compatíveis com as necessidades (repetitividade e exatidão).
3) Concluiu-se que os AFMs utilizados não permitem avaliar a peça sem corte de amostras, e os dados obtidos não são compatíveis com as necessidades (repetitividade e exatidão), assim este equipamento foi eliminado para efeito de comparação da medição da rugosidade, neste trabalho.

Assim sendo:

☞ Querendo resultados absolutos, deve-se utilizar o Interferômetro óptico.

☞ Querendo resultados relativos e limite de 0,05μm, pode-se utilizar o perfilômetro mecânico.

☞ Desejando análise cristalográfica, o Microscópio de Força Atômica pode produzir boas imagens para este tipo de análise.

CAPÍTULO VIII

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do trabalho exposto com suas observações e conclusões, são dadas algumas sugestões para a continuidade desta pesquisa, tais como:

📖 Como se atingiu o limite "mecânico", a próxima etapa seria, desenvolver esta mesma metodologia, porém, desta vez, com outros métodos de medição de rugosidade, por exemplo:

- ◈ meios ópticos usando difração;
- ◈ formação de reticulados por interferência óptica;
- ◈ holografia, etc.

📖 Desenvolver a pesquisa, avaliando conjuntamente as outras características, que também são próprias de uma superfície espelhada, tais como:

- ◈ refletividade,
- ◈ desvio de forma e
- ◈ acabamento.

☞ As sugestões para novas pesquisas, acima mencionadas, dariam uma avaliação completa sobre a integridade superficial de peças usinadas em torno de ultraprecisão, além de mostrar a capacidade dos equipamentos avaliados para a realização do controle destas peças.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTING, L.; KIMURA., F; HANSEN, H. N.; BISSACO, G. (2003). Micro Engineering. *Annals of the CIRP.* v.52, n.2, p.635-111.

BAEK, D. K.; KO, J. T.; KIM, H. S. (1997). A dynamic surface roughness model for face milling. *Precision Engineering*, v.20, n.3, p.171-178.

BJUGGREN, M.; KRUMMENACHER, L.; MATTSON;L. (1997). Noncontact surface roughness measurement of engineering surfaces by total integrated infrared scatteringpag. *Precision Engineering*, v.20, n.1, p.33-45.

BOWEN, D. K.; WORMINGTON, M. (1994). Measurement of surface roughness and topography at nanometer levels by diffuse X-Ray scaterring. *Annals of the CIRP.* v.43, n.1, p. 497-589.

BRINKSMEIER, E.; RIEMER, O. (1991). Tools and Tool Setting for Improved Surface Finish in Diamond Turning. *Precision Engineering*, v.13, n.4, p.125-133.

BRINKSMEIER, E., GLÄBE, R. (2001). Advances in precision machining of steel. *Annals of the CIRP.* v.50, n.1, p.385-388.

BUSCH, T. (1989). *Fundamental of dimensional metrology.* Ed. Delmar. 2a. ed. Albany, New York. 444p.

CALLISTER, W. D. (2002). *Ciência e engenharia de materiais.* Ed. LTC. 5ª ed. Rio de Janeiro. 589p.

CARNEIRO, K.; JENSEN, C. P.; JORGESEN, J. F.; GARNOES, J. (1995).Roughness parameters of surfaces by atomic force microscopy. *Annals of the CIRP.* v.44, n.1, p.517-522.

CHAVES, A. (2002). *Nanociência e nanotecnologia.* Comciência. Revista Eletrônica de Jornalismo Científico. SBPC/Labjor Brasil. www.comciencia.com.br.

CHEN, Q.; YANG, S.; LI, Z. (1999). Surface roughness evaluation by using wavelets analysis. *Precision Engineering*, v.23, p.209-212.

CHEUNG, C.F.; LEE, W.B. (2000a) A theorical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra-precision diamond turning. International. *Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.40, p. 979-1002.

CHEUNG, C.F; LEE, W. B. (2000b). A multi-spectrum analysis of surface roughness formation in ultra precision machining. *Precision Engineering*, v.24, p.77-87.

CONNOR, B. P. O'.; MARSH, E. R.; COUEY, J. A. (2005). On the effect of crystallographic orientation on ductile material removal in silicon. *Precision Engineering*, v.29, p.124-132.

CORBETT, J.; MCKEOWN, P. A.; PEGGS, G. N.; WHATMORE, R. (2000). Nanotechnology: International developments and emerging products. *Annals of the CIRP.* v.49, n.2, p. 523-545

DE CHIFFRE, L.; CHRISTIANSEN, S.; SKADE, S. (1994). Advantagesand industrial applications of tree-dimensional surface roughness analysis. *Annals of the CIRP.* v.43, n.1, p.473-478.

DE CHIFFRE, L.; HANSEN, H. N.;BRONSTEIN, A. (1996). Investigation on the surface topography in polishing using atomic force microscopy. *Annals of the CIRP.* v.45, n.1, p.523-528.

DE CHIFFRE, L.; LONARDO, P.; TRUMPOLD, H.; LUCCA, D. A.; GOCH, G.; BROWN, C. A.; RAJA, J.; HANSEN, H. N. (2000). Quantitative characterization of surface texture. *Annals of the CIRP.* v.49, n.2, p.635-651.

DE CHIFFRE, L.; KUNZMANN, H.; PEGGS, G. N., LUCCA, D. A. (2003). Surfaces in precision engineering, microengineering and nanotechnology. *Annals of the CIRP.* v.52, n.2, p.561-577.

DIXSON, R.G.; KÖNING, R.; FU, J.; VORBURGER, T. V.; RENEGAR, T. B. (2000). Accurate Dimensional Metrology with atomic force microscopy. *Precision Engineering*, v.20, p. 362-368.

DIXSON, R.G.; KÖNING, R.; TSAI, V. W.; FU, J.; VORBURGER, T. V. (1999). Dimensional metrology with the NIST calibrated atomic force microscope. *Precision Engineering*, v.20, p. 20-34.

DORNFELD, D. A.; OLIVEIRA, J. F. G.; LEE, D. VALENTE, C. M. O. (2003). Analysis of tool and workpiece interaction in diamond turning using graphical analysis of acoustic emission. *Annals of the CIRP.* v.52, n.1, p. 479-482.

DOW, T. A.; MILLER, M. H.; FALTER, P.J. (1991). Application of a fast tool servo for diamond turning of nonrottionally symmetric surfaces. *Precision Engineering*, v.13, n.4, p. 243-249.

DUDUCH, J.G. (1993). *Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle materials*. Thesis (PhD). Cranfiled Institute of Technology. School of Industrial and Manufacturing Science. Cranfild. England.

FAWCETT, C. S., DOW, T. A. (1991). Development of a model for precision contour griding of brittle materials. *Precision Engineering*, v.13, n.4, p.270-276.

FRÜHAUF, J.; TRUMPOLD, H. (2002). Silicon Standards for Assessment and calibration of stylus probes. *Annals of the CIRP*. v.51, n.1, p.475-478.

GONZÁLEZ, C.; ZELENG; R. (1995). Metrologia. Ed. Mc Grow Hill. 1a. ed. México.

HAITJEMA, H. (1999). Uncertainty analysis of roughness standard calibration using stylus instruments. *Precision Engineering*, v.22, n.2, p.110-119.

HARA, Y.; MOTONISHI, S.; IOSHIDA, K. (1990). A new micro-cutting device with high stiffness and resolution. *Annals of the CIRP*. v.39, n.1, p. 375-378.

HANSEN, H. N.; KOFOD, N.; DE CHIFFRE, L.; WANHEIN, T. (2002). Calibration and industrial application of instrument for surface mapping based on AFM. *Annals of the CIRP*. v.51, n.1, p. 471-474.

HERRMANN, P. S. P., MATTOSO, L. H. C., BERNARDES, R. F, FROMMER, J., CIDDADE, G. A. G.; BISCH, P. M.; WEISSMULLER, G. (2005). *Microscopia de varredura por sonda: Aspectos práticos e suas aplicações na nanociência e Nanotecnologia*. Embrapa – Instrumentação agrícola. Capítulo 6 (livro a ser publicado). São Carlos.

HIPÓLITO, D. (2005). Rugosidade Superficial. *Apostila do curso A4 da Mitutoyo Sul Americana*. São Paulo.

HUNSALZ, G.; FLECHSIG, U.; KURSTEN, D. (1991). Investigations on single Crystal Diamond Tools for the Ultra-precision Manufacturing Process. *Precision Engineering*, v.13, n.4, p. 360-361.

IKAWA, N.; DONALSON, R. R.; KOMANDURI, R.; KOENG, W.; AACHEN, T. H. (1991). Ultraprecisions metal cutting-The past, the present and the future. *Annals of the CIRP*. v.40, n.2, p. 587-594.

INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial). (2005). *A Nanotec Expo 2005, será uma vitrine para se conhecer as nanotecnologias já disponíveis*. http:www:inmetro.gov.br.

ISO 3274: 1996. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristic of contact (stylus) instruments.

ISO 11562:1996. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Metrological characteristics of phase correct filters.

JASINEVICIUS. R. G.; PORTO, A. J. V.; DUDUCH, J. G.; PURQÉRIO, B. M. (1993). Uma revisão sobre ferramenta de diamante monocristalino para usinagem de ultraprecisão. *RBCM – Revista Brasileira de Ciências Mecânicas – Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. v.15, n.4, p. 409-414.

JASINEVICIUS, R. G. (1994). *Caracterização da usinabilidade de ultra precisão em ligas de alumínio fabricadas no Brasil*. Dissertação de mestrado. Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

JASINEVICIUS, R. G., PORTO, A. J. V., DUDUCH, J. G. (1995). Influência das condições de usinagem no torneamento de ultra-precisão de uma liga de alumínio com ferramenta de diamante. *COBEM-CIDIM*.

JASINEVICIUS, R. G. (1998). *Influência da transição de fase sobre os limites de ductilidade observados no torneamento de ultraprecisão do silício mono cristalino*. Tese de doutorado. Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

JASINEVICIUS, R. G.; DUDUCH, J. G.; PORTO, A. J. V.; PURQÉRIO, B. M. (1999). Critical aspects on the behavior of material from the mechanical tool-workipece interaction in single point diamond turning. *RBCM –Revista Brasileira de Ciências Mecânicas – Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. v.21, n.3, p.509-518.

JASINEVICIUS, R. G.; CAMPOS, G. P.; MONTANARI, L.; TSUKAMOTO, R.; GARCIA, CAMARGO, R.; J. P; DUDUCH, J. G.; PORTO, A. J. V. (2003). Influence of mechanical and metallurgical state of the Al-Mg alloy on the surface integrity in ultraprecision machining. *RBCM –Revista Brasileira de Ciências Mecânicas – Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. v.25, n.3, p. 222-228.

KOMANDURI, R. (1997). Technological Advances in fine abrasive proceses. *Annals of the CIRP*. v.46, n.2, p.545-596.

KOMANDURI, R.; LUCCA, D. A.; TANI, Y. (1996). On material removal mechanisms in finishing of advanced ceramics and glasses. *Annals of the CIRP*. v.45, n.1, p.509-514.

KÖNIG,W.; BERKTOLD, A.; KOCH, K. F. (1993). Turning versus griding – A comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies. *Annals of the CIRP*. v.42, n.1, p.39-43.

KÖNIG,W.; WECK, M.; SPENRATH, N.; LUDERICH, J. (1991). Diamond machining technology. *Fraunhofer – Institut für Produktions technologie (IPT)*. Aachen. Germany.

KRAUSKOPF, B. (1984). Diamond Turning: Reflecting Demands for Precision. *Manufacturing Engineering*, may, p.90-100.

LEE, K.C.; HO, S.J.; HO, S.Y. (2005). Accurate estimation of surface roughness from texture features of the surface image using and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Precision Engineering*, v.29, p. 95-100.

LEACH, R. & HART, A. (2002). A comparison of stylus and optical methods for measuring 2D surface texture. *NPL repot BTLM* 15,1-46.

LEACH, R. & HART, A. (2001). Investigation into the shape of diamond styli used for surface texture measurement as part of project LE9953, milestone 5.3.1.9. *NPL repot BTLM* 10,1-12.

LI, H. Q. (1997). *Atomic force microscopy*. H.H. Wills Physics Laboratory. University of Bristol. Bristol. UK.

LI, H.; JIANG, X.; LI, Z. (2004). Robust estimation in gaussian filtering for engineering surface characterization. *Precision Engineering*, v.28, n.4, p. 186-193.

LINK, W. (2000). Tópicos avançados da metrologia mecânica. Confiabilidade metrológica e suas aplicações.Mitutoyo Sul Americana Ltda.

LONARDO, P.M.; TRUMPOLD, H.; CHIFFRE, DE L. (1996). Progress in 3D surface microtopography characterization. *Annals of the CIRP*. v.45, n.2, p. 589-598.

LONARDO, P.M.; BRUZZONE, A.A. (2000). Measurement and topography characterization of surfaces produced by selective laser sintering. *Annals of the CIRP*. v.49, n.1, p. 427-430.

LONARDO, P.M.; LUCCA, D.A; DE CHIFFRE, L. (2002). Emerging Trends in Surface Metrology. *Annals of the CIRP*. v.51, n.2, p.701-723.

LUCCA, D.A.; SEO, Y. W. (1994). Aspects of surface generation in orthogonal ultraprecision machining. *Annals of the CIRP*. v.43, n.1, p.43-46.

LUCCA, D. A.; BRINKSMEIER, E.; GOCH, G. (1998). Progress in assessing surface and subsurface integrity. *Annals of the CIRP*. v.47, n.2, p.669-693.

MAMALIS, A. G.; VOGTLÄNDER, L. O. G.; MARKOPOULOS, A. (2004).Nanotechnology and nanoestructured material: trends in carbon nanotubes. *Precision Engineering*, v.28, p. 16-30.

MIGUEL, P. A. C. (1997). Pequenos erros, grandes problemas. *Controle de qualidade*. Banas, São Paulo, v.7, p. 56-65.

MITUTOYO (1991). *Publicações da Mitutoyo do Brasil*.

MONTANARI, L. (2004). *Reconhecimento de imagens interferométricas aplicado a sistemas de posicionamento de alta precisão*. Tese de doutorado. Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

MOSCATI, G. (2002). As ações do CIPM- Comitê Internacional de Pesos e Medidas e suas implicações para os laboratórios metrológicos. *Encontro para a qualidade de laboratórios – ENQUALAB*. São Paulo.

NAMBA, Y.; ABE, M. (1993). Ultraprecision grinding of optical glasses to produce super-smooth surfaces. *Annals of the CIRP*. v.42, n.1, p.417-420.

NAMBA, Y.; SAEKI, M. (2003). Optical surface generation of organic nonlinear crystals by single-point diamond turning. *Annals of the CIRP*. v.52, n.1, p.475-478.

NANOTEC (2005). *Nanotecnologia: A nova revolução industrial absorve investimentos de 75 bilhões de dólares*. www.nanotec.com.

NBR 6405:1988. Rugosidade de Superfícies. ABNT.

NBR ISO 12179:2002. Especificações Geométricas de Produtos (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil – calibração de instrumentos de medição por contato (com sapata de apalpação).

NBR ISO 3274:2003. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Características nominais de instrumentos por contato (com sapata de apalpação). ABNT

PAGOTTO,C. R. (2004). *Estudos em torneamento e endentação de vidros ópticos e silício monocristalino*. São Carlos. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PAUL, E.; EVANS, C. J.; MANGAMELLI, A.; MCGLAUFLIN, L.; POLVANIT, R. S. (1996). Chemical aspects of tool wear in single point diamond turning. *Precision Engineering*, v.18, p.4-19.

PERSON, U. (1999) A fibre-optic surface-roughness sensor. *Journal of Materials processing technology*, v.95, p.107-111.

PORTO, A. J. V. (1995). *Diagnóstico do processo de fabricação da operação de torneamento de face de ultraprecisão em cobre e ligas de alumínio*. São Carlos. 177p. Tese (livre docência). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

PORTO, A. J. V.;SILVA, H. A. T.; DUDUCH, J.G.; RÚBIO, J. C. C., MONTANARI, L.: JASINEVICIUS, R. G.; ALMEIDA, R. M.; SCHROETER, R. B. (2004). *Usinagem de ultraprecisão*. RiMa, FAPESP. 293p. São Carlos.

PORTO, A. J. V., DUDUCH, J. G., JASINEVICIUS, R. G. (1996). Torneamento de Ultra-Precisão. *Laboratório de Superfícies. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.*

RAJA, J.; MURALIKRISHNAN, B.; FU S. (2002) Recent advances in separation of roughness, waviness and form. *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology,* v.26, p.222-235.

SAITO, T. (1975). Machining of optics: an introduction. *Applied Optics*, v.14, p.1773-1776.

SATA, T.; LI, M; TAKATA, S.; HIRAOKA, H.; LI, C. Q.; XING, X. Z; XIAO, X., G. (1985). Analysis of surface roughness generation in turning operation and its applications. *Annals of the CIRP.* v.34, n.1, p.473-476.

SBPC/Labjor Brasil. www.comciencia.com.br. Consultado em fevereiro de 2005.

SEMBA, T.; TANI, Y.; SATO, H. (1993). Material characterization of a machined surface using an anisotropic acoustic leans. *Annals of the CIRP.* v.42, n.1, p.627-630.

SHERRINGTON, I. SMITH, E. H. (1986). The significance of surface topography em engineering. *Precision Engineering*, v.8, n.2, p.79-87

SHMALZ, G. (1936). *Technische oberflächenkunde*. Springer, Berlin,

SILVA, C.G. (2004). *Nanociência e nanotecnologia*. Comciência. Revista Eletrônica de Jornalismo Científico. http://www.nano.gov. Consultado em fevereiro de 2005.

SILVA, H. A. T. (2003). *Monitoramento do torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis.* São Carlos. 205p.Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SILVA, H. A. T. (1999). *Análise do comportamento da emissão acústica durante o torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis*. São Carlos. 115p. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SOMMARGREN, G. E. (1987). A new laser measurement system for precision metrology. *Precision Engineering*, v.9, p. 179-184.

TAKAYA, Y. (1991). Non-contact measurement of ultra-fine polished surface roughness. imeko XII.

TANIGUCHI, N. (1994). The state of the art of nanotechnology for processing of ultraprecision and ultrafine products. *Precision Engineering*, v.16, n.1, p. 5-24.

TANIGUCHI, N. (1983). Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing. *Annals of the CIRP.* v.32, n.2, p. 573-580.

TAYLOR & ROBSON. (2005). *A guide to surface texture parameters*. Leicester. England.

TEIXEIRA, C. A. (2005). A nanotecnologia: bem debaixo do nosso nariz. *Jornal O Globo.* Rio de Janeiro, v.7, n.03.

THOLATH, J.; RADHAKRISHNAN, V. (1999) Three-dimensional filtering of engineering surfaces using envelope system. *Precision Engineering,*v.23, p.221-228.

THOMAS, T. R. (1982). *Rough surfaces.* Longman, New York.

THOMAS, G. G. (1974). *Engineering Metrology*. London. Butterworths.

TO, S.; CHEUNG, C. F.; LEE, W. B. (2001). Influence of material swelling on surface roughness in diamond turning of single crystals. *Materials science and technology*, v.17, p.102-108.

UEGAMI, K. (1993). Crystallographic Orientation Analysis on Wear Shape of Single Crystal Diamond Cutting Toll. *Precision Engineering*, p. 657-667.

UEGAMI, K.; TAMAMURA, K. (1991). Consequence of Orientation on the Single Diamond Cutting Tool. *Precision Engineering*, v.13, n.4, p. 392-402.

VERMEULEN, J. P, M. B.; ROSIELLE, P. C. J. N.; SCHELLEKENS, P. H. J. (2000). An advanced ceramic optical diamond turning machine design and prototype development. *Annals of the CIRP.* v.49, n.1, p.407-410.

YOUSEFI, R.; YOSHIO, I. (2000). A study on ultra-high-speed cutting of aluminium alloy: Formation of welded metal on the secondary cutting edge of the tool and its effects on the quality of finished surface. *Precision Engineering*, v.24, p. 371-376

YUAN, Z. J.; YAO, Y. X., ZHOU, M.; BAI, Q.S. (2003). Lapping of single cristal diamond tools. *Annals of the CIRP.* v.52, n.1.

WANG, W.L; WHITEHOUSE, D.J. (1995). Method for setting fidelity criteria for surface-measuring instruments. *Precision Engineering*, v.17, p.274-280.

WANG, Z. (1993). The Influence of Cutting Edge Quality on Workpiece. International Progress in *Precision Engineering*, p.657-667.

WEULE, H.; HÜNTRUP, V.; TRITSCHLER, H. (2001). Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization. *Annals of the CIRP.* v.50, n.1, p.61-64.

WHITEHOUSE, D. J. (1988). Comparison between stylus and optical methods for measuring surfaces. *Annals of the CIRP.* v.37, n.2, p.649-653.

WILKS, E. M., WILKS, J. (1972). The resistence of diamond to abrasion. *J. Phys. D:Appl. Phys.* Great Britain, v.5, p.1902-1919.

WILKS, E. M., WILKS, J. (1982). The abrasion resistance of natural and synthetic diamond. *Elsevier Sequoia. Printed in the Netherlands*. Wear, v.81, p.329-346.

WUERZ, L.J. & QUELLE, R.C. (1983). Laser Interferometer system for metrology and machine tool applications. *Precision Engineering*, v.5, p. 111-114.

BIBLIOGRAFIA

ALVES, M. L. (2003). Investigação da reprodutividade de resultados de medição da rugosidade de massa-padrão classe F2. *Encontro para a qualidade de laboratórios – Enqualab*. São Paulo.

CAMARGO, R. (2000). Uma metodologia para o cálculo da incerteza das medições a três coordenadas. Dissertação de Mestrado. Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

CHI, F.; LEE; W. B. (2000). A multi-spectrum analysis of surface roughness formation in ultra precision machining. *Precision Engineering*, v.24, p. 77- 87.

DEVRIES, M. F. (1976). Relationship of surface roughness and surface integrity to functional properties. *Annals of the CIRP*. v.25, n.1.

GALYER, J.; SHOTBOLT, C. (1989). *Metrology for engineers*. Ed. Cassel. 4a. ed.London.

LEHMANN, P.; GOCH,G. (2000). Comparison of conventional light scattering and speckle techniques concerning an in-process characterization of engineered surface. *Annals of the CIRP*. v.49, n.1, p.419-422.

LUCCA, D.A; RHORER, R.L., MAGGIORE, C.J.; SEO, Y. W. (1995). Assessment of subsurface damage in ultraprecision-machined CdS by ion channeling. *Annals of the CIRP*. v.44, n.1, p.513-516.

LUCCA, D.A.; MAGGIORE, C.J.; RHORER, R.L. (1996). Subsurface damage distribution machined CdS. *Annals of the CIRP*. v.45, n.1, p.519-522.

MIYOSHI, T.; TAKAYA,Y.; SAITO, K. (1995). Nanometer measurement of silicon wafer texture based on fraunhonfer diffraction pattern. *Annals of the CIRP*. v.44, n.1.

NBR ISO 4287, 2002. Especificações Geométricas de Produtos (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil – Termos, definições, parâmetros da rugosidade. ABNT.

NICK, EVA; KELLNER, S. R. O. (1971). Fundamentos de estatística para as ciências do comportamento. Editora Renes. 3ª. ed. Rio de Janeiro.

PERSON, U. (1999)A fibre-optic surface-roughness sensor. *Journal of Materials Processing Technology,* v.95, p.107- 111.

APÊNCICE I

Metais de Transição

Os metais de transição são elementos encontrados entre os elementos dos Grupos IIa e IIb da tabela periódica. O Grupo IIb são às vezes considerados elementos de transição. E são também conhecidos como elementos d-block, porque o nível mais externo contém mais dois elétrons, próximo deles estão os principais níveis externos que têm as d sub-órbitas incompletas, que são progressivamente preenchidas passando de 8 para 18 elétron. Os elementos de transição vão preenchendo as d sub-órbitas que não é sempre regular.

Esses elementos de transição possuem paramagnetismo, que é causado pela presença de elétrons não parelhados na d sub-órbita, causando nesses elementos uma atração pelo campo magnético.

Fonte: http://www.ucc.ie/ucc/depts/chem/dolchem/html/comp/transmet.html

APÊNCICE II

Avaliação das incertezas das medições

A definição de consenso acerca do termo incerteza é dado no Vocabulário Internacional de Termos Básicos e Gerais em Metrologia - VIM: *incerteza é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.*

De uma forma simplificada, pode-se afirmar que incerteza é um atributo quantitativo de uma medição, que indica o nível de exatidão da medida ou do método analítico utilizado. Não existe nenhuma medida sem uma incerteza associada a ela. Um resultado pode ser apresentado com um certo nível de confiança (95% ou 99%), mas não se pode afirmar qual é o valor verdadeiro de um mensurando. E assim um resultado, analítico ou não, não tem significado algum senão vier acompanhado de sua incerteza.

As incertezas passam por três fases: incerteza padrão; incerteza combinada e incerteza expandida. A incerteza padrão é aquela expressa como desvio padrão. A incerteza combinada é uma combinação de todas as fontes de incerteza de um método analítico qualquer, possuindo um nível de confiança de 68%. A incerteza expandida é a incerteza combinada multiplicada por um fator de abrangência que depende do nível de confiança - 95% ou 99%.

Em rugosidade, em particular, é necessário especificar o que se está medindo e qual o método que vai ser utilizado para tal, assim como seus limites de detecção e outros fatores que possam influenciar o resultado da análise. Não especificar adequadamente o mensurando pode resultar em uma incerteza mais alta.

2. Incerteza Tipo A

As incertezas do tipo A são obtidos a partir de métodos estatísticos. Dependem da distribuição estatística de uma série de medições e são caracterizadas pelo desvio padrão experimental (dispersão de uma série de medidas). É função da repetitividade de um processo de medição.

As incertezas do tipo A só se caracterizam se houver um desvio padrão que, isto é, o processo de medição tem "sensibilidade" ou mobilidade suficientes para detectar variações. Se, por exemplo, um corpo de provas tiver suas propriedades químicas alteradas ao longo do tempo (amostra degrada), esse corpo não estará sob controle estatístico e, portanto, as variações não se caracterizam como incerteza tipo "A" para a avaliação de incertezas do método.

As contribuições tipo A podem ser caracterizadas de duas formas: a partir de desvios-padrão de uma série de medições ou de estudos de r&R - estudos de repetitividade (realizados por um mesmo técnico ou laboratório) e reprodutibilidade (realizados por diferentes técnicos ou laboratórios).

Estatisticamente uma série de medições, realizadas sob as mesmas condições, assumem uma distribuição de probabilidades normal (curva de Gauss). Pode-se calcular, portanto, a incerteza tipo "A" a partir da média aritmética de uma amostragem adequada. De acordo com as leis da estatística a média aritmética é a melhor estimativa do valor da componente de entrada ou influência, quando "n" observações independentes forem obtidas sob as mesmas condições. A média aritmética é calculada conforme a equação abaixo:

$$\overline{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} x_{i,k} \qquad (2.1)$$

A incerteza do tipo A de uma série de medições, é determinada a partir da variância média, que mede a dispersão de um conjunto de resultados experimentais. A raiz quadrada da variância fornece o desvio padrão da média (experimental), que é a medida da dispersão dos resultados da amostragem em relação à média das séries de medições. A incerteza do tipo A é , por definição, igual ao desvio padrão da média, e é calculada a partir da equação 2.3.

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^{n} (x_{i,k} - \overline{x}_i)^2} \qquad (2.2)$$

$$s(\overline{x_i}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \tag{2.3}$$

Como o foco de atenção é o valor médio medido a incerteza do tipo A é dada por:

$$u_A(x_i) = s(\overline{x_i}) \tag{2.4}$$

3 - Incertezas Tipo B

A avaliação das incertezas do tipo B leva em conta as distribuições de probabilidade assumidas, baseadas na experiência ou outras informações. Este tipo de grandeza de influência é avaliado através de um julgamento científico, baseado em informações sobre a variabilidade possível das grandezas de entrada, ou seja, sobre os fatores que podem influenciar o resultado de uma medida. A avaliação das incertezas tipo B é realizada seguindo-se procedimentos diferentes dos utilizados na avaliação da incerteza do tipo A.

As seguintes informações podem ser utilizadas para a avaliação da incerteza do tipo B:

- Dados de medições anteriores;
- Conhecimento dos comportamentos e propriedades dos instrumentos;
- Certificados de calibração dos equipamentos;
- Dados fornecidos pelo fabricante;
- Incertezas extraídas de manuais, etc.

O uso adequado dessas informações exige o conhecimento do processo e discernimento sobre os fatores que possam influenciar na medida.

Cada componente das incertezas do tipo B possui uma distribuição de probabilidade peculiar, e que depende de suas características de variação. Para avaliar as incertezas tipo B, deve-se conhecer ou estimar a distribuição de probabilidades de cada grandeza. Isso é necessário para o cálculo da incerteza combinada, já que todos os componentes de incerteza devem estar padronizados, isto é, terem um nível de confiança de 68%. As incertezas tipo B podem assumir três tipos diferentes de distribuição de probabilidades: distribuição triangular, retangular e bimodal, ou em U.

I) <u>Distribuição de Probabilidades Triangular</u>

Para "padronizar" esse tipo de distribuição, deve-se dividir o valor da incerteza por $\sqrt{6}$.

II) Distribuição de Probabilidades Retangulares

O fator de padronização para essa distribuição é: $\sqrt{3}$.

III) Distribuição Bimodal (Tipo U)

- Para padronizar essa distribuição, divide-se o valor da incerteza por $\sqrt{2}$.

4 - Cálculo Da Incerteza Padrão Combinada

Como visto em itens anteriores, para se combinar todas os componentes de incertezas considerados, é necessário expressar estas incertezas em termos de desvios padrão (incertezas padronizadas). Para a padronização, cada componente, conhecida sua distribuição de probabilidade, deve ser dividida pelo fator de redução correspondente, conforme item 3.

No modelo linear (variáveis com relação de variação unitária) as grandezas de entrada (de influência) possuem a ***mesma unidade*** da grandeza de saída (mensurando), o cálculo da incerteza combinada pode ser simplificado conforme a seguinte equação:

$$u_c(y) = \sqrt{u(a)^2 + u(b)^2 + \ldots + u(n)^2} \qquad (4.1)$$

sendo a, b, ... , n os componentes de incerteza e u(a), u(b), ... , u(n) os valores das incertezas padronizadas de cada componente.

5 - Cálculo Da Incerteza Expandida

Devemos multiplicar a incerteza combinada por um fator de abrangência, que define um intervalo de abrangência maior (nível de confiança). Para tanto é necessário determinar os graus de liberdade.

5.1. Graus De Liberdade

5.1.1. Calculando o Número de Graus de Liberdade para Incertezas Tipo "A"

O número de graus de liberdade de um conjunto de medidas (amostra de uma população) é dado pela seguinte relação:

$$\upsilon_i = n - 1 \qquad (5.1)$$

sendo υ_i o número de graus de liberdade do conjunto i de medidas, e n é o número de medidas do conjunto.

5.1.2. Calculando o Número de Graus de Liberdade para Incertezas Tipo "B"

Através do número de graus de liberdade efetivos, calculados a partir da equação de Welch-Satterthwaite:

$$\upsilon_{eff} = \frac{[u_c(y)]^4}{\sum_{i=1}^{n} \frac{[u_i(y)]^4}{\upsilon_i}} \tag{5.2}$$

onde $u_c(y)$ é a incerteza combinada do método; $u_i(y)$ é a incerteza padrão da componente i; e υ_i é o número de graus de liberdade da componente i.

* Valores calculados a partir da equação 4.2

Após o cálculo do número de graus de liberdade efetivos do método analítico, consultamos a tabela "t de Student"(ver Anexo 1)para verificar qual o valor do fator de abrangência "k" que deve ser usado para o cálculo da incerteza expandida. Esse fator k é, então, multiplicado pela incerteza padrão combinada (u_c) do método para se chegar ao valor da incerteza expandida (U):

$$U = u_c \,.\, k \tag{5.3}$$

6 - Definição de alguns termos utilizados

Mensurando - Grandeza específica sujeita à medição. Neste curso poderá ser representada pela letra *Y*, se for uma grandeza de saída ("Output") ou por *X* se for uma grandeza de entrada ("Input").

Incerteza de medição - Parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando. (O erro de uma medição não pode ser obtido. O que se pode é *avaliar* a sua incerteza.)

Medição - conjunto de operações que tem por objetivo determinar um valor de uma grandeza.

Método de medição - Seqüência lógica de operações baseadas num princípio de medição descritas genericamente para serem usadas na execução de medições.

Procedimento de medição - Conjunto de operações descrito, especificamente, para ser usado na execução de uma determinada medição seguindo um dado método de medição.

Exatidão de medição - Grau de concordância entre o resultado de uma medição e o valor verdadeiro do mensurando. (A exatidão é um atributo qualitativo de uma medição. Não confundir com o termo *Precisão*, que tem outra definição).

Repetitividade de uma medição - Grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas do mesmo mensurando efetuadas sob mesmas condições de medição. (Quanto mais alto é o grau de concordância maior é a *precisão* da medição.)

Reprodutividade de uma medição - Grau de concordância entre os resultados de medições do mesmo mensurando efetuadas sob condições alteradas. (Uma condição de medição alterada pode ocorrer devido a modificação do princípio de medição, do método de medição, do observador, da instrumentação, do local, das condições utilizadas, etc...)

Erro Relativo - Erro de medição apresentado de forma relativa (percentual). Numericamente, é obtido dividindo-se o erro de medição pelo valor verdadeiro do mensurando. (Como o valor verdadeiro não pode ser determinado, utiliza-se um valor convencionado "Valor Verdadeiro Convencional")

Erro Aleatório - Resultado de uma medição menos a média que resultaria se pudéssemos realizar um número infinito de medições do mesmo mensurando, guardadas as condições de repetitividade. (De acordo com as leis da estatística, aumentando-se o número de medições se reduz o erro aleatório.)

Erro Sistemático - Média que resultaria de um número infinito de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando.

Correção - Valor a ser adicionado algebricamente ao resultado de uma medição ainda não corrigida para compensar o erro sistemático. A correção é exatamente igual ao valor do erro sistemático com sinal invertido.

Fator de Correção - Fator numérico a ser multiplicado ao resultado de uma medição ainda não corrigida para compensar o erro sistemático.

Melhor capacidade de medição – Menor incerteza de uma medição (ou calibração) que um laboratório, dentro de seu escopo de medições, pode obter, realizar, reproduzir ou conservar a unidade desta grandeza, quando executa o seu trabalho de rotina em condições padrão de medição mais ou menos ideais.

Estimativa de um valor – Valor obtido como resultado de um processo estatístico utilizado para estimar uma grandeza medição.

Intervalo de confiança – A faixa de valores situada entre as funções T_1 e T_2 dos valores observados onde, com uma determinada probabilidade, o valor estimado deverá estar situado.

Graus de liberdade – Número de termos em uma soma menos o número de restrições aos termos da soma. (Normalmente se toma como sendo igual a (n - 1), onde n é o número de independentes observações)

Probabilidade – Número (real) variando entre 0 e 1 associado à realização de um evento aleatório. (Pode também ser relacionada a uma freqüência de ocorrência ao longo do tempo ou a um grau de confiança que um evento aleatório deverá ocorrer.)

Função distribuição de probabilidade – Uma equação matemática que define como a probabilidade de uma variável aleatória distribui-se ao longo de um dado intervalo. Em outras palavras é o valor que esta variável pode assumir num intervalo. (A probabilidade do conjunto inteiro de variáveis aleatórias será sempre igual a unidade). [Matematicamente é expressa como: $F(x) = Pr(X<x)$]

Função densidade de probabilidade – É a função derivada da função "distribuição de probabilidade" já definida. Representa como a função "distribuição de probabilidade" varia com a variável aleatória. [Matematicamente é dada por: $f(x) = dF(x)/dx$]

Esperança (valor esperado) – A esperança de uma variável aleatória discreta será dada pelo somatório do produto de cada valor multiplicado pela sua probabilidade. [Matematicamente é dada pela expressão □ = $E(X) = \sum p_i x_i$]. Para uma variável contínua, será dada pela integral da função densidade de probabilidade estendida a todos os intervalos da variação da variável aleatória. [□ = $E(X) = \int xf(x)dx$]

Desvio padrão experimental [$s(x_i)$] - Valor numérico decorrente da aplicação da expressão $s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{k=1}^{n}\left(x_{i,k} - \overline{x_i}\right)^2}$, a uma série de n medições do mesmo mensurando.

Variância – Medição de dispersão dos resultados experimentais em torno da média de n observações, dada pela expressão $s^2(x_i) = \frac{\sum_{k=1}^{n}(x_{i,k} - \overline{x}_i)^2}{n-1}$.

Covariância – É uma medição do grau de dependência entre as diferentes variáveis aleatórias em consideração.

Coeficiente de Correlação – É um coeficiente numérico estabelecido entre os limites de –1 e +1 e identifica a dependência mútua relativa de duas variáveis. Numericamente, é igual a razão da covariância entre as duas variáveis aleatórias pela raiz quadrada positiva do produto de suas variâncias individuais.

Coeficiente de sensibilidade – Coeficiente numérico que mostra como uma grandeza de saída varia com a variação de uma grandeza de entrada.

Incerteza padrão combinada – Incerteza de um resultado de uma medição quando este é obtido por meio de diferentes valores de outras grandezas que a compõe. Numericamente, é igual a raiz quadrada positiva de uma soma de termos sendo estes as variâncias e/ou covariâncias destas grandezas de entrada.

Incerteza expandida – Valor que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração de distribuição dos valores que possam ser, razoavelmente, atribuídos ao mensurando.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- *ISO GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. International Organization for Standardization, (ISO – 1993) – INMETRO, ABNT, 2ºEd. Brasileira, Agosto de 1998.

- *Guia Eurachem / CITAC*. Primeira Versão Brasileira, 2º Ed. 2002.

APÊNDICE III

Tabela das Medições Realizadas com o PM

A tabela 1 apresenta as medições de Ra e a tabela 2 as medições de Rz.

Tabela 1 – Valores de Ra em mm

setores	M1	M2	M3	M4	M5
1	0,054	0,053	0,055	0,053	0,052
2	0,027	0,027	0,020	0,020	0,020
3	0,023	0,0225	0,024	0,023	0,023
4	0,017	0,021	0,017	0,017	0,017
5	0,017	0,021	0,017	0,017	0,017
6	0,012	0,013	0,012	0,013	0,012
7	0,052	0,054	0,054	0,059	0,049
8	0,017	0,017	0,020	0,018	0,019
9	0,015	0,013	0,016	0,023	0,014
10	0,015	0,014	0,012	0,012	0,012
11	0,023	0,041	0,037	0,038	0,037
12	0,024	0,017	0,022	0,023	0,023

Tabela 2 – Valores de Rz em mm

setores	M1	M2	M3	M4	M5
1	0,242	0,239	0,246	0,253	0,239
2	0,123	0,120	0,133	0,102	0,104
3	0,110	0,111	0,108	0,114	0,114
4	0,099	0,099	0,100	0,106	0,098
5	0,098	0,106	0,100	0,099	0,099
6	0,081	0,076	0,081	0,072	0,097
7	0,238	0,260	0,256	0,245	0,218
8	0,107	0,107	0,122	0,095	0,111
9	0,187	0,077	0,112	0,138	0,086
10	0,086	0,076	0,069	0,068	0,085
11	0,123	0,179	0,142	0,157	0,153
12	0,121	0,108	0,119	0,123	0,123

APÊNDICE IV

Tabela das Medições Realizadas com IO

A tabela 1 apresenta as medições de Ra e a tabela 2 apresenta as medições de Rz.

	Tabela 1 - Medições de Ra em nm				
setores	M1	M2	M3	Média	desv pad
1	36,0	38,6	38,8	37,8	1,56
2	10,8	11,5	11,6	11,3	0,44
3	10,1	11,9	11,9	11,3	1,04
4	24,5	27,0	27,0	26,5	1,44
5	9,6	11,6	12,1	11,1	1,32
6	8,5	9,9	10,4	9,6	0,98
7	42,7	44,6	44,4	43,9	1,04
8	9,4	10,8	11,3	10,5	0,98
9	8,5	9,3	9,5	9,1	0,53
10	8,4	8,0	8,6	8,5	0,31
11	20,3	22,8	22,9	22,0	1,47
12	6,6	7,7	7,9	7,4	0,70

	Tabela 1 - Medições de Rz em nm				
setores	M1	M2	M3	Média	desv pad
1	36,0	38,6	38,8	37,8	1,56
2	10,8	11,5	11,6	11,3	0,44
3	10,1	11,9	11,9	11,3	1,04
4	24,5	27,0	27,0	26,5	1,44
5	9,6	11,6	12,1	11,1	1,32
6	8,5	9,9	10,4	9,6	0,98
7	42,7	44,6	44,4	43,9	1,04
8	9,4	10,8	11,3	10,5	0,98
9	8,5	9,3	9,5	9,1	0,53
10	8,4	8,0	8,6	8,5	0,31
11	20,3	22,8	22,9	22,0	1,47
12	6,6	7,7	7,9	7,4	0,70