



**Campus de São Carlos**

RECONHECIMENTO DE IMAGENS  
INTERFEROMÉTRICAS APLICADO A  
SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DE ALTO  
DESEMPENHO

**LUCIANA MONTANARI**

Prof. Assoc. Jaime Gilberto Duduch

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**



**ESCOLA DE ENGENHARIA  
DE SÃO CARLOS**

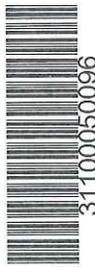
**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**RECONHECIMENTO DE IMAGENS INTERFEROMÉTRICAS  
APLICADO A SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DE ALTO  
DESEMPENHO.**

**LUCIANA MONTANARI**  
Mestre em Engenharia Mecânica  
Engenheira Mecânica

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.

DEDALUS - Acervo - EESC



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



São Carlos  
- 2004 -

Class.	TESE EESC
Cott.	13706
Tombo	T 020/05
Sysno	142.2316

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M764r Montanari, Luciana  
Reconhecimento de imagens interferométricas aplicado a sistemas de posicionamento de alto desempenho / Luciana Montanari. -- São Carlos, 2004.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Assoc. Jaime Gilberto Duduch.

1. Posicionadores.
  2. Projeto de ultraprecisão.
  3. Interferometria.
  4. Redes neurais artificiais.
- I. Título.

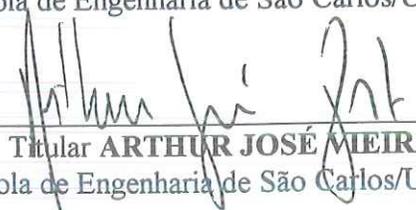
**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidata: Engenheira **LUCIANA MONTANARI**

Tese defendida e julgada em 29-10-2004 perante a Comissão Julgadora:

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

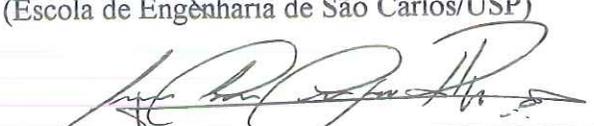
Aprovada

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **ARTHUR JOSÉ MEIRA PORTO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovada

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **RENATO GOULART JASINEVICIUS**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

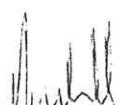
APROVADA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **JUAN CARLOS CAMPOS RUBIO**  
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

APROVADA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **APARECIDO CARLOS GONÇALVES**  
(UNESP/Ilha Solteira)

APROVADA

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

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho à minha família, base para o meu sucesso.

Aos meus pais amados: Heitor e Zélia

Aos meus queridos irmãos: Nelci, Suzelei, Adevair e Geovana

Às minhas adoradas sobrinhas: Anna, Paula e Isa

## ***AGRADECIMENTOS***

Agradeço a Deus por mais esta conquista.

Ao Prof. Assoc. Jaime Gilberto Duduch pela orientação, confiança e amizade durante todos esses anos.

Ao Prof. Tit. Arthur José Vieira Porto pela ajuda sempre que necessária.

Ao Prof. Dr. Renato Goulart Jazinevicius pelas sugestões para o aperfeiçoamento desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio (UFMG) pelas sugestões, incentivo e amizade.

À Kelen e Luciane, excelentes amigas para se dividir uma vida. Obrigada pela paciência, ajuda e carinho em todos os momentos. Foi uma honra conviver com vocês.

À Gi, uma grande amiga. Obrigada pelo seu carinho e entusiasmo.

Aos meus amigos e companheiros de laboratório: Carlos Burato, João Paulo, Pagotto, Renato Tsukamoto, Rogério, Fabiano, Paulo, Sherfis e Lucas pela ajuda e paciência, além de proporcionarem um ótimo ambiente de trabalho. Especialmente ao Helder, um amigo para sempre.

Ao Alan Garcia Santos pela amizade e ajuda, principalmente com problemas relacionados a elementos finitos.

Ao Mariano Eduardo Moreno pela sua presteza.

Ao Benigno Alonso Gomez pela ajuda com processamento de imagens e LabVIEW®.

Aos Senhores Adão Santo Bolzan, José Carlos Risardi e José Carlos Botelho pela fabricação dos diversos elementos constituintes do sistema proposto.

Ao Sr. José Francisco de Moraes pela ajuda na soldagem dos cabos dos atuadores piezelétricos.

Aos meus amigos Alessandro, Leonardo, Paulo Marcos, Graziela, Juliana, Eliz, Zé Luiz, Volnei, Cláudio, Teodora, Rogério, Naga, Toddy, Romeu, Canto, Amauri, Édson, Demian e Alessandro (Guaraná). Em especial, ao Geraldo, Paulo Roberto, Rodrigo, Fabiana, Alice e Beth. Obrigada pelas boas risadas nos momentos fáceis e apoio irrestrito nos difíceis.

À D. Nilza e Sr. Romualdo pela atenção e carinho.

À Secretaria de Pós-Graduação, assessorada pela Ana Paula.

Aos meus amigos do vôlei, em especial à Tati.

Ao CNPq pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradecimento especial aos meus pais e irmãos pelo incentivo e apoio.

Todos aqui citados foram de grande importância e tomo a contribuição de todos com igual relevância. Tenho certeza que agradei apenas a uma pequena fração das pessoas a quem devo muito e peço especial perdão àquelas que omiti.

## *Sumário*

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações Gerais.....	1
1.2. Justificativa.....	8
1.3. Objetivos.....	8
1.4. Organização da Tese.....	9
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1. Introdução.....	10
2.2. Sistemas de Posicionamento de Ultraprecisão.....	10
2.3. Reconhecimento de Imagens.....	14
2.3.1. Imagem.....	16
2.3.2. Formação de Imagem.....	17
2.3.3. Visão Computacional.....	21
2.3.4. Reconhecimento de Padrões.....	23
2.3.4.1. Métodos para Reconhecimento de Padrões.....	24
2.3.5. Processamento de Imagens.....	25

---

2.3.6. Processamento Digital de Imagens.....	28
2.3.7. Abordagens de alguns Conceitos em Processamento de Imagens.....	30
2.3.8. Reconhecimento e Caracterização.....	33
2.4. Métodos Ópticos Aplicados a Reconhecimento de Imagens.....	36
2.4.1. Métodos Ópticos.....	37
2.4.2. Interferometria.....	37
2.4.3. Interferômetro de Fizeau.....	38
2.4.3.1. Medição de Planicidade.....	40
2.4.4. Processamento Digital de Padrões de Franjas.....	43
2.4.5. Análise de Franjas.....	45
2.5. Conclusões Preliminares.....	55
<b>CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....</b>	<b>57</b>
3.1. Introdução.....	57
3.2. Montagem do Sistema para Realização dos Testes.....	58
3.3. Processo de Aquisição de Imagem.....	63
3.4. Identificação da Variação Angular.....	64
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>70</b>
4.1. Introdução.....	70
4.2. Microposicionador Angular Rotativo (MAR).....	70
4.2.1. Análises Numéricas.....	72
4.2.2. Análise Usando o Método dos Elementos Finitos no MAR.....	73
4.2.2.1. Criação do Modelo.....	73
4.2.2.2. Análise Estática do MAR.....	74
4.2.2.3. Análises Preliminares.....	74
4.2.3. Identificação dos modos de vibrar do MAR.....	81
4.2.4. Refinamento do MAR.....	84

---

4.2.5. Reestruturação do Modelo.....	91
4.2.5.1. Definição das Restrições e Cargas.....	94
4.2.5.2. Simulações e Resultados (Análise Estática).....	96
4.2.5.3. Conclusão das Análises Estáticas.....	102
4.2.6. Identificação dos Modos de Vibirar.....	102
4.2.7. Início da Implementação do Sistema de Fixação.....	103
4.2.7.1. Fixação do MAR ao Torno de Precisão ASG 2500.....	103
4.3. Testes Experimentais.....	107
4.3.1. Aquisição e Processamento de Imagens.....	114
4.3.2. Aplicação de Redes Neurais Artificiais.....	123
4.4. Conclusões Preliminares.....	132
<b>CAPÍTULO 5 – CONSLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>133</b>
5.1. Conclusões.....	133
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	135
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>137</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>I</b>
I.1. Redes Neurais Artificiais.....	I
I.1.2. Mapas Auto-Organizáveis.....	III
<b>APÊNDICE II.....</b>	<b>V</b>
II.1. Desenvolvimento Matemático do Fenômeno de Interferência .....	V
<b>APÊNDICE III.....</b>	<b>XI</b>
III.1. Sistema de fixação de peças em máquinas-ferramenta de ultraprecisão.....	XI
III.1.1. Placa de Vácuo.....	XII

## *Lista de figuras*

FIGURA 1.1 – Prognóstico do mercado de microsistemas (NEXUS MARKET ANALYSIS, 1997 apud CORBETT et al., 2000).....	2
FIGURA 1.2 – Correlação entre os desvios de trajetória e a topografia da peça (WECK & BISPINK, 1992).....	5
FIGURA 1.3 – Esquema que caracteriza os sistemas do trabalho proposto.....	7
FIGURA 2.1 – Função $(x, y)$ .....	18
FIGURA 2.2 – Sistema de visão artificial.....	18
FIGURA 2.3 – Grade usada para discretização da imagem em uma matriz de <i>pixels</i> , cada um associado a uma coordenada $(i, j)$ .....	19
FIGURA 2.4 – Importância da resolução ( $R_e$ ) e da quantização ( $Q$ ) na qualidade da imagem. As imagens superiores foram quantizadas com 256 níveis de cinza, enquanto as inferiores foram quantizadas com 4 níveis. As imagens da esquerda foram amostradas com 128 pontos, enquanto as da direita foram amostradas com 512 pontos (CARVALHO et al., 2003).....	21
FIGURA 2.5 – Classificação humana de padrões.....	22
FIGURA 2.6 – Diagrama em blocos de um sistema genérico de processamento de imagens (ALBUQUERQUE & ALBUQUERQUE, 2003) .....	27
FIGURA 2.7 – Exemplo de remoção do borrão da imagem de um objeto em movimento.....	28
FIGURA 2.8 – Imagem de grãos de arroz e seu histograma (MATLAB® 6.5, 2002)....	31
FIGURA 2.9 – Interferômetro de Fizeau (SLOCUM, 1992).....	38
FIGURA 2.10 – Formação de franjas no interferômetro de Fizeau.....	39
FIGURA 2.11 – Influência da inclinação da superfície de teste na formação de franjas.....	41

FIGURA 2.12 – Padrões de franjas para rotação de peças planas.....	42
FIGURA 2.13 – Interferômetro de Fizeau numa máquina-ferramenta de ultraprecisão (NOMURA et al., 1992).....	43
FIGURA 2.14 – Franjas retilíneas.....	46
FIGURA 2.15 – Franjas circulares.....	48
FIGURA 2.16 – Padrão de franjas irregulares.....	50
FIGURA 2.17 – Padrões básicos de franjas circulares.....	51
FIGURA 2.18 – Evolução de franjas abertas. (a) Franjas convexas no eixo X e (b) $\frac{1}{2}$ franja no eixo Y.....	52
FIGURA 2.19 – Franjas abertas.....	53
FIGURA 2.20 – Ajuste de franjas.....	53
FIGURA 2.21 – Avaliação de padrões de franjas complexos (MÖLLER–WEDEL OPTICAL, 2001).....	54
FIGURA 2.22 – Superfícies (a) Côncava; (b) Convexa.....	55
FIGURA 3.1 – Montagem do MAR para os testes com o interferômetro.....	59
FIGURA 3.2 – Posição inicial do MAR.....	59
FIGURA 3.3 – Configuração do experimento para medidas de deslocamento.....	61
FIGURA 3.4 – Sistema de aquisição de imagens.....	62
FIGURA 3.5 – Fixação da superfície óptica no MAR.....	62
FIGURA 3.6 – Esquema do sistema a ser usado.....	63
FIGURA 3.7 – Modelo do MAR.....	64
FIGURA 3.8 – Posição do sistema absoluto de coordenadas OXYZ no posicionador e ângulos de rotação em torno de X e Y – vista superior.....	65
FIGURA 3.9 – Posição do sistema absoluto de coordenadas <b>OXYZ</b> do posicionador – vista frontal.....	66
FIGURA 4.1 – Modelo de posicionador para uma base de fixação estacionária.....	71
FIGURA 4.2 – Microposicionador angular rotativo.....	71
FIGURA 4.3 – Modelo do MAR para análise por meio do MEF.....	73

FIGURA 4.4 – Modelo usado nas simulações.....	75
FIGURA 4.5 – Gráfico de deslocamento vetorial na direção y [m].....	76
FIGURA 4.6 – Posição versus deformação nos nós (simulação I).....	77
FIGURA 4.7 – Gráfico de tensões de Von Misses (simulação I).....	78
FIGURA 4.8 – Gráfico de deslocamento vetorial na direção y [m].....	79
FIGURA 4.9 – Posição versus deslocamento (simulação II).....	80
FIGURA 4.10 – Gráfico de tensões de Von Misses (simulação II).....	81
FIGURA 4.11 – MAR com seis molas.....	85
FIGURA 4.12 – Deslocamento na direção normal para o MAR com seis molas.....	85
FIGURA 4.13 – Deformação segundo o critério de Von Misses (6 molas).....	86
FIGURA 4.14 – MAR com aumento da espessura do anel exterior da parte superior.....	87
FIGURA 4.15 – Deslocamento na direção z para camada adicional de 6mm.....	88
FIGURA 4.16 – Deslocamento na direção z com espessura de 8mm e 14mm no anel exterior.....	88
FIGURA 4.17 – Deslocamento na direção z com espessura de 16mm no anel exterior.....	89
FIGURA 4.18 – Tensão [Pa] e deformação de Von Misses com anel de 14mm.....	90
FIGURA 4.19 – Deslocamento [m] e deformação de Von Misses para um único atuador excitado.....	91
FIGURA 4.20 – Mesa angular superior.....	92
FIGURA 4.21 – Modelo de fixação da placa de vácuo ao MAR .....	93
FIGURA 4.22 – Modelo reestruturado ( <i>Software Ansys</i> <sup>®</sup> ).....	94
FIGURA 4.23 – Aplicação das restrições de movimento.....	95
FIGURA 4.24 – Gráfico de deslocamentos nodais (direção z em mm) .....	96
FIGURA 4.25 – Gráfico de deslocamentos nodais somente da região de interesse.....	97
FIGURA 4.26 – Gráfico de Tensões de Von Misses [MPa].....	98
FIGURA 4.27 – Gráfico de deslocamentos nodais (direção z em mm).....	98
FIGURA 4.28 – Gráfico de deslocamentos nodais somente da região de interesse.....	99

FIGURA 4.29 – Gráfico de Tensões de Von Misses [MPa].....	99
FIGURA 4.30 – Gráfico de deslocamentos nodais (direção z em mm).....	100
FIGURA 4.31 – Gráfico de deslocamentos nodais somente da região de interesse.....	101
FIGURA 4.32 – Gráfico de Tensões de Von Misses [MPa] .....	101
FIGURA 4.33 – MAR com a parte inferior modificada.....	104
FIGURA 4.34 – Caminho percorrido pelo fluxo.....	105
FIGURA 4.35 – Modificações feitas na mesa angular superior.....	106
FIGURA 4.36 – Modelo do MAR com conectores e placa de vácuo.....	106
FIGURA 4.37 – Posição dos atuadores segundo equações cinemáticas.....	107
FIGURA 4.38 – Gráfico Tensão x Deslocamento – (a) Atuador <b>A</b> ; (b) Atuador <b>B</b> .....	108
FIGURA 4.39 – Deslocamento do MAR.....	110
FIGURA 4.40 – Gráfico da variação angular – Atuador <b>A</b> acionado.....	112
FIGURA 4.41 – Gráfico da variação angular – Atuador <b>B</b> acionado.....	112
FIGURA 4.42 – Tensões limitantes para cada atuador.....	113
FIGURA 4.43 – Fluxograma de pré-processamento da imagem.....	115
FIGURA 4.44 – Exemplo de imagem de franjas interferométricas depois de selecionada a ROI – (a) antes da filtragem; (b) após a filtragem.....	116
FIGURA 4.45 – Exemplo de imagem de franjas interferométricas depois do <i>threshold</i> .....	116
FIGURA 4.46 – Exemplo de imagem de franjas interferométricas depois da dilatação.....	117
FIGURA 4.47 – Exemplo de imagem de franjas interferométricas depois de aplicado o filtro de partículas.....	118
FIGURA 4.48 – Representação da reta para contagem de franjas.....	119
FIGURA 4.49 – Número de franjas quando a tensão de 450V é aplicada ao atuador <b>A</b>	120
FIGURA 4.50 – Imagem quando aplicado 100V no atuador <b>A</b> .....	121
FIGURA 4.51 – Orientação das franjas – (a) Atuador <b>A</b> acionado (200 V); (b) Atuador <b>B</b> acionado (200 V).....	122
FIGURA I.1 – Representação de um neurônio artificial.....	I

---

FIGURA II.1 – Interferômetro de Michelson.....	VI
FIGURA III.1 – Princípio de uma placa de vácuo (KÖNIG et al., 1991).....	XIII

## *Lista de tabelas*

TABELA 2.1 – Aplicações de técnicas de processamento de imagens em linhas de produção (HATA, 1993).....	17
TABELA 2.2 – Comparação de métodos de pré-processamento.....	30
TABELA 3.1 – Características do LASER do interferômetro de Fizeau (WYKO® 6000, 1989).....	60
TABELA 4.1 – Nós escolhidos na simulação I.....	76
TABELA 4.2 – Nós escolhidos na simulação II.....	79
TABELA 4.3 – Frequências naturais obtidas ( <i>Block Lanzos e Subspace</i> ).....	83
TABELA 4.4 – Frequências naturais obtidas ( <i>Block Lanzos</i> ).....	102
TABELA 4.5 – Deslocamento nos atuadores <b>A</b> e <b>B</b> .....	108
TABELA 4.6 – Deslocamento no centro do MAR.....	109
TABELA 4.7 – Variação angular.....	111
TABELA 4.8 – Apresentação de 7 conjuntos de dados à rede neural – atuador <b>A</b> .....	123
TABELA 4.9 – Neurônios vencedores dos 7 conjuntos de dados – atuador <b>A</b> .....	124
TABELA 4.10 — Percentagem de acerto da rede neural.....	125
TABELA 4.11 – Neurônios vencedores com 7 conjuntos de dados – atuador <b>A</b> .....	126
TABELA 4.12 – Acertos da rede neural.....	127
TABELA 4.13 – Conjuntos de dados de entrada – atuadores <b>A</b> e <b>B</b> .....	128
TABELA 4.14 – Neurônios vencedores.....	128
TABELA 4.15 – Neurônios vencedores – atuadores <b>A</b> e <b>B</b> .....	129
TABELA 4.16 – Acertos da rede neural.....	130
TABELA 4.17 – Ordem de apresentação dos exemplos de entrada e neurônios vencedores.....	131

## *Lista de abreviaturas e siglas*

A/D – Analógico/digital

ADC – Conversor analógico digital (do inglês *Analogic Digital Convertor*)

AOI – *Area of Interest*

ART – *Adaptative Ressonance Theory*

ASG – *Aspheric Surface Generator*

BS - Divisor de feixes (do inglês *beam splitter*)

CCD – *Charge Coupled Device*

CNC – Controle Numérico Computadorizado

D – Diâmetro da franja

D – Fotodetector

Desl – Deslocamento

DNA – Ácido desoxidorribonucléico

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

FFT – *Fast Fourier Transform*

ICPE – *International Conference on Production Engineering*

ISO – *International Organization for Standardization*

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

L<sub>R</sub> – Comprimento do braço de referência do interferômetro (do inglês *reference length*)

L<sub>S</sub> – Comprimento do braço da amostra do interferômetro (do inglês *sample length*)

LUT – *Look-up-table*

MAR – Microposicionador Angular Rotativo

MEF – Método dos Elementos Finitos

MLP – *Multi-Layer Perceptron*

MEMS – Sistemas microeletromecânicos (do inglês *micro-electromechanical systems*)

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MFA – Microscopia de Força Atômica

MLP – *Multilayer Perceptron*

$n$  – Índice de refração

N – Número de franjas

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

OPD – Diferença de Caminho Óptico

PI - Physik Instrumente®

PIXEL – *Picture Element*

PMI – Técnica de Medida de Fase (do inglês *Phase Measure Interferometry*)

PZT – Titanato Zirconato de Chumbo

Q – Quantização

R – Espelho fixo (de referência)

RBF – *Radial Basis Functions*

Re – Resolução

RNA – Rede Neural Artificial

ROI – *Region of Interest*

S – Espelho de amostra

SOM – *Self-Organizing Maps*

USP – Universidade de São Paulo

$y$  – Direção normal dos atuadores

## *Lista de símbolos*

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Unidade</b>
$D_i$	Componente do deslocamento elétrico	[C.m <sup>-2</sup> ]
$E_i$	Componente do campo elétrico	[V.m <sup>-1</sup> ]
$\vec{E}_{(subscrito)}$	Campo elétrico constante	[V/m]
$I$	Intensidade da luz	[W.m <sup>-2</sup> ]
$K$	Rigidez do sistema	[N/m]
$M$	Massa do sistema	kg
$N$	Ordem das franjas	
$R$	Raio de curvatura da superfície esférica	[m]
$a$	Espaçamento entre franjas	[mm]
$c$	Distância entre as linhas exteriores das franjas	[mm]
$d$	Translação do ponto central do MAR na direção Z	[μm]
$d_A$	Deslocamento do atuador A	[μm]
$d_B$	Deslocamento do atuador B	[μm]
$d_C$	Deslocamento do atuador C	[μm]
$d$	Distância exigida de movimento	[μm]
$f_0$	Primeira frequência natural	[Hz]
$f_n$	Frequência natural	[Hz]
$f(u)$	Função de ativação da rede neural	
$h$	Altura da franja	[mm]
$i$	$\sqrt{-1}$	
$j$	Neurônio	

$\vec{k}$	Vetor de onda ( $ \vec{k}  = 2\pi/\lambda$ )	[m <sup>-1</sup> ]
$m$	Número de vetores de entrada	
$n_c$	Velocidade crítica	[rpm]
$r$	Distância dos atuadores ao centro do mecanismo	[mm]
$x_k$	Vetor de entrada da rede neural	
$w_j$	Vetor peso da rede neural	
$z$	Número de intervalos de franjas entre linhas	
$\Delta p$	Desvio de altura	[mm]
$\Delta u$	Diferença de caminho óptico	[m]
$\Delta Y$	Deslocamento perpendicular ao caminho óptico	[m]
$\alpha$	Ângulo de incidência em relação à normal	graus
$\gamma_{x,y,z}$	Ângulo de rotação em X, Y ou Z	[rad]
$\delta$	Espaçamento entre duas franjas	
$\varepsilon_{ij}$	Componente da constante dielétrica relativa	[F.m <sup>-1</sup> ]
$\theta_1$	Giro em torno do eixo X	graus
$\theta_2$	Giro em torno do eixo Y	graus
$\lambda$	Comprimento de onda	[nm]
$\phi$	Fase	[rad]
$\omega_n$	Frequência natural angular	[Hz]

## *Resumo*

MONTANARI, L. (2004). *Reconhecimento de imagens interferométricas aplicado a sistemas de posicionamento de alto desempenho*. 146p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

De maneira geral, a necessidade de melhorar o desempenho e diminuir o tamanho de sistemas mecatrônicos tem levado a indústria moderna a desenvolver mecanismos de posicionamento com características excelentes de aceleração e precisão. O uso de posicionadores em equipamentos de precisão, em particular no posicionamento da ferramenta/peça na usinagem de ultraprecisão, deve-se à necessidade de se obter rígido controle do perfil a ser fabricado. Neste sentido, foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Precisão da EESC-USP um microposicionador angular rotativo capaz de monitorar a posição da ferramenta em relação à peça durante o processo de usinagem e fazer as devidas compensações de erros, além da possibilidade de obtenção de geometrias diferenciadas. Neste trabalho encontram-se estudos referentes à aplicação do método dos elementos finitos com o intuito de verificar a funcionalidade do sistema mecânico proposto, avaliando suas características estáticas e dinâmicas. Além disso, propõe-se validar o uso de redes neurais artificiais como ferramenta capaz de auxiliar no desenvolvimento de um algoritmo de identificação de imagens, baseado no conhecimento, que emprega como elemento multi-sensor, imagens interferométricas, representando posições. Dentre as principais características a serem alcançadas pelo algoritmo idealizado está a habilidade de identificar a posição de uma superfície justaposta ao sistema microposicionador angular e, assim, permitir maior rapidez de processamento das informações, possibilitando seu emprego em sistemas de controle em tempo real. A aplicação desta técnica foi avaliada por meio de simulação e apresenta resultados significativos para incentivar pesquisas envolvendo imagens interferométricas.

Palavras-chave: posicionadores, projeto de ultraprecisão, interferometria, redes neurais artificiais.

## *Abstract*

MONTANARI, L. (2004). *Image Recognition and Interferometry Applied to High Performance Positioning Systems*. 146p. Ph.D. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

In broad terms, to achieve high performance and miniturization of mechatronic systems it is necessary to develop positioning mechanisms with high response and precision. The use of positioning devices compatible with precision equipment, particularly in the positioning of a tool relative to a workpiece in ultraprecision machining, results from the need for absolute control of the dimensions of cut. A microtilt stage was developed in the Precision Engineering Laboratory of EESC-USP which is capable of monitoring the position of a diamond tool relative to a workpiece, in-process, permitting error compensation and the generation of complex forms. Finite Element Method is applied to perform a functional analysis (static and dynamic) of the mechanical parts. The use of artificial neural networks as a tool to help the development of an algorithm for the identification of images is proposed. This algorithm is based on knowledge and employs interferograms as a multi-sensor element representing positions. One desired characteristic of the proposed algorithm is its ability to perform the identification of the position of a surface on the tilt stage and to permit fast processing of the information. This turns the device appropriate to be used in real time applications. This technique was assessed by simulation and presented significant results, encouraging further researches involving interferometric pattern recognition.

Palavras-chave: positioning actuators, ultra-precision design, laser interferometry, artificial neural networks.

## *Capítulo 1*

### **INTRODUÇÃO**

#### **1.1. Considerações Gerais**

Atualmente, a engenharia de precisão tem promovido grande avanço tecnológico, uma vez que é empregada na fabricação de produtos como elementos óptico-eletrônicos, principalmente das áreas de informática e micro-mecânica, onde alta precisão dimensional e qualidade superficial nanométrica são fundamentais. Por isso é dito que engenharia de precisão é uma área multidisciplinar, já que envolve várias tecnologias, a saber, usinagem de ultraprecisão, metrologia, controle e projeto de máquinas e seus componentes.

WATANABE (1992) afirma que a busca incessante da “perfeição” é característica inerente da engenharia de precisão, cujos equipamentos atuais serão os equipamentos comuns do futuro. Um exemplo concreto dessa busca é a miniaturização de produtos optoeletrônicos, os quais, a cada dia, são projetados cada vez menores, mais leves e com maior número de funções. Comprovando esse fato, DUDUCH (1993) relaciona ultraprecisão ao maior nível de exatidão alcançável numa determinada época, com um determinado tipo de equipamento. Da mesma forma, RUBIO (2000) define ultraprecisão como sendo o maior grau de exatidão atingido economicamente, num determinado instante, com o equipamento disponível.

JONES (1979) define engenharia de precisão pela relação existente entre dimensões de produtos e suas tolerâncias de fabricação ou incertezas de posicionamento permitidas em um equipamento e menciona que engenharia de precisão envolve atividades em projeto e construção. Dentro desta mesma linha, NAKAZAWA (1994) afirma que o principal objetivo da engenharia de precisão é a concepção de máquinas de alta precisão por meio da aplicação de fundamentos, tanto da área de projeto quanto de fabricação.

Simultaneamente ao desenvolvimento tecnológico, novas terminologias têm surgido e vêm sendo adotadas para caracterizar ou delimitar técnicas ou campos de atuação. Exemplos disso são termos tais como microengenharia, nanotecnologia, ultraprecisão, entre outros. O conceito básico de nanotecnologia foi proposto pelo Professor Norio Taniguchi nos *Proceedings of ICPE (International Conference on Production Engineering)* em 1974 e definido como o termo usado para classificar as tecnologias de manufatura integrada e sistemas de máquinas que fornecem capacidade de usinagem de ultraprecisão da ordem de um nanometro ( $10^{-9}$  m) (TANIGUCHI, 1983). Tal ordem de grandeza não é alcançada por adaptações ou modificações de processos convencionais, mas unicamente pelo desenvolvimento de novas técnicas de usinagem e medição, envolvendo posicionadores de ultraprecisão, metrologia e controle, usinagem de ultraprecisão, materiais para ferramenta e a interação entre ferramenta e peça durante a usinagem (PORTO, 1995). O campo de engenharia de precisão tem tido notável progresso desde o século passado, suportado pelo avanço destas tecnologias associadas (usinagem, metrologia, projeto e controle).

CORBETT et al. (2000) apresentam um gráfico que contém o prognóstico do potencial de mercado com relação ao desenvolvimento de microssistemas e produtos que estão surgindo com o progresso da nanotecnologia (FIGURA 1.1).

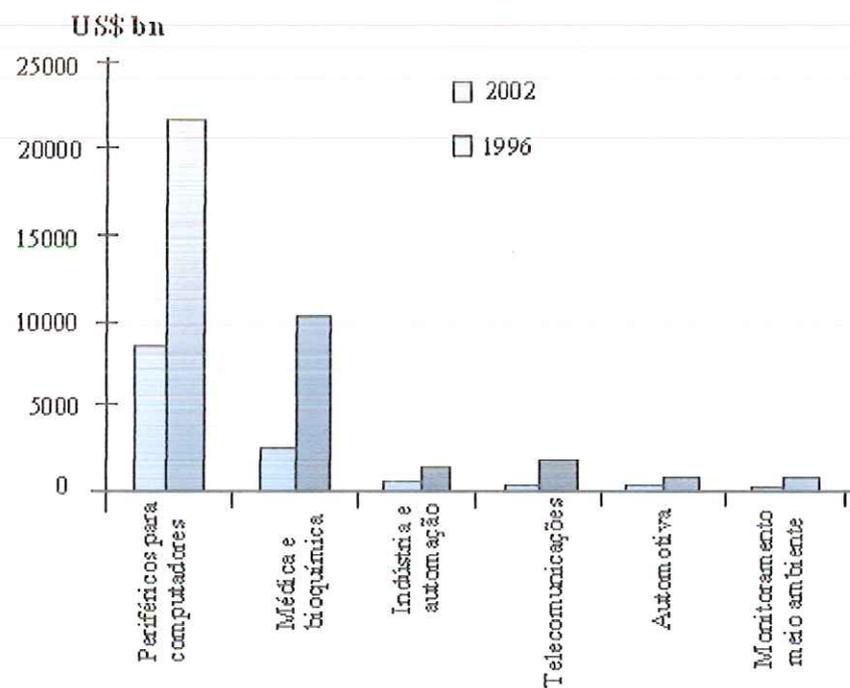


FIGURA 1.1 – Prognóstico do mercado de microssistemas (NEXUS MARKET ANALYSIS, 1997 apud CORBETT et al., 2000).

As predições apresentadas no gráfico da FIGURA 1.1 foram aplicadas somente a seis setores principais do mercado. Combinando os dados, o mercado mundial de microsistemas rendeu cerca de aproximadamente US\$ 14 bilhões em 1996. Prevendo um crescimento de 18% ao ano, este mercado deve ter rendido, em 2002, uma soma em torno de US\$ 38 bilhões. Com este crescimento e a expectativa de novas aplicações, tanto em áreas comerciais quanto governamentais, a nanotecnologia vem despertando grande interesse, o que tem incentivado numerosas pesquisas, como por exemplo, a origem e desenvolvimento de sistemas microeletromecânicos (MEMS) (BRYSEK, 1996).

Uma outra linha de pesquisa relacionada à nanotecnologia é a usinagem de ultraprecisão, que pode ser definida como uma tecnologia usada para a produção de peças ópticas, eletrônicas e mecânicas com nível de precisão submicrométrico e, em alguns casos, nanométrico, que abrange a usinagem química, transferência de energia, retificação e torneamento de ultraprecisão (SILVA, 1999).

O torneamento de ultraprecisão pode ser definido como o processo que emprega uma ferramenta de diamante monocristalino em uma máquina-ferramenta com elevada rigidez e controle com alto nível de repetitividade e resolução de posicionamento (JASINEVICIUS, 1998).

Dentro da usinagem de ultraprecisão, uma área de crescente interesse é a usinagem de materiais frágeis (por exemplo, vidros ópticos, cerâmicas e materiais cristalinos para microeletrônica e optoeletrônica, como silício, germânio, antimoneto de índio, arseneto de gálio, entre outros), onde diversos estudos vêm sendo realizados para 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.

Apesar de diferir dinamicamente e geometricamente do torneamento de ultraprecisão, o riscamento e a endentação de materiais frágeis têm sido amplamente usados para demonstrar a possibilidade de remoção dúctil em materiais frágeis (SILVA, 2003). Um dos primeiros trabalhos nesse sentido foi o publicado por TAYLOR (1949) apud MIZUNO (1993), o qual trata do riscamento em vidro óptico. Desde então, diversos centros de pesquisa no mundo têm trabalhado no sentido de determinar condições ótimas de retirada de material na usinagem de materiais frágeis, permitindo o surgimento de modelos matemáticos, assim como melhor entendimento dos fenômenos físicos, químicos e metalúrgicos envolvidos no processo (por exemplo, BIFANO; DOW & SCATTERGOOD (1988), BLACKLEY & SCATTERGOOD (1991), CHAO (1991), JASINEVICIUS; PIZANI & DUDUCH (2000) entre outros).

Uma das tecnologias de suporte para a usinagem de ultraprecisão é a metrologia. Instrumentos de medição de rugosidade, circularidade e planicidade têm sido desenvolvidos

para permitir a análise da topografia de superfícies com precisão submicrométrica, o que, por sua vez, tem estimulado avanços na usinagem de precisão. Além disso, cabe destacar o desenvolvimento de LASER interferométrico de alta resolução, que possibilita medições de distâncias superiores a 40 m com resolução de 2,5 nm ou menor (SOMMARGREN, 1987 e WUERZ & QUENELLE, 1983), o que permite que esta técnica possa ser aplicada no posicionamento em máquinas e instrumentos de alta precisão. O uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia de força atômica (MFA) tem possibilitado a observação de topografias na ordem atômica. Tais progressos permitem pesquisas e desenvolvimentos em processos de ultraprecisão para fabricação de componentes com precisão nanométrica.

Na medida que as características metrológicas e de acabamento tornam-se mais críticas, o desempenho da máquina-ferramenta cresce em importância. Desta forma, para que se obtenha o desempenho desejado de máquinas de usinagem destinadas à fabricação de componentes de elevada precisão de forma e rugosidade na faixa de 10 nm Ra (por exemplo, moldes para lentes, discos de memória para computador, lentes e espelhos para sistemas ópticos) é necessário melhorar o desempenho dos vários subsistemas que compõem a máquina-ferramenta, procurando estruturar a máquina de forma a tornar mínimos os fatores que prejudicam os resultados (DOWN; MILLER & FALTER, 1991, HARA; MOTONISHI & IOSHIDA, 1990 e IKAWA et al., 1991). Por exemplo, para a obtenção de espelhos para sistemas ópticos são necessários movimentos com resolução de 0,01  $\mu\text{m}$  livres de folga, num curso aproximado de 1 a 2 mm para cargas entre 20 a 2000 N (LANGENBECK, 1992).

Em geral, a forma das peças usinadas é determinada pela posição relativa entre a ferramenta de corte e a peça durante o processo de usinagem. Dessa forma, para alcançar melhores resultados na usinagem, a posição relativa entre a peça e a ferramenta de corte deve ser controlada com compatível grau de precisão, resolução e repetitividade.

Nos estudos referentes à obtenção do modo dúctil de corte na usinagem de materiais frágeis há duas exigências principais com relação às máquinas-ferramenta. Uma é a precisão de movimento e outra é o controle entre a ferramenta e a peça, justamente devido à necessidade de usar condições especiais de profundidade e/ou espessura de corte (SILVA, 2003). Portanto, o posicionamento entre a ferramenta e a peça deve ser o mais preciso (repetitividade e exatidão) e estável (alta rigidez estática e dinâmica) possível, incentivando muitos pesquisadores a estudar o desenvolvimento de máquinas-ferramenta e posicionadores de precisão (MCKEOWN et al., 1990).

À problemática do controle de posicionamento de alta resolução, soma-se a necessidade de corrigir erros sistemáticos e atenuar distúrbios presentes no processo de corte. No campo da usinagem de ultraprecisão são usadas pequenas profundidades de corte, juntamente com tolerâncias

justas de forma de peças complexas, evidenciando-se a correlação existente entre os erros de seguimento (desvio de trajetória) e a topografia superficial resultante, como mostrado na FIGURA 1.2.

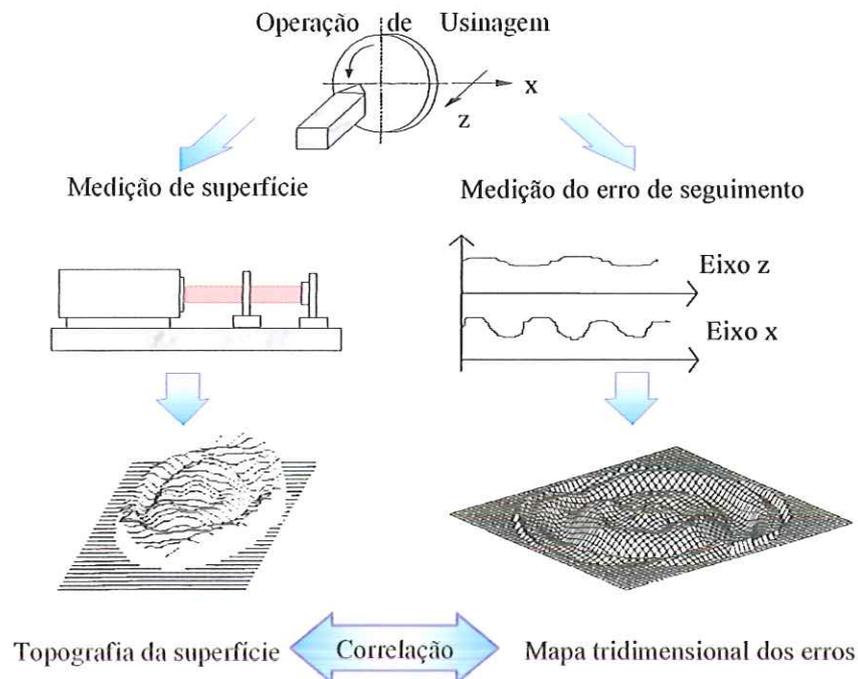


FIGURA 1.2 – Correlação entre os desvios de trajetória e a topografia da peça (WECK & BISPINK, 1992).

O tipo de problema apresentado na FIGURA 1.2 pode ser minimizado, por exemplo, pela correção diretamente na ponta cortante, por meio de controle em tempo real da posição da ferramenta via sinal de deslocamento obtido por um sensor de posição e, acionando diretamente um porta-ferramenta antes e/ou durante o processo, no caso de torneamento (PATTERSON & MAGRAB, 1985 e KHONO, 1989). De forma análoga, pode-se alterar a posição relativa ferramenta/peça pela movimentação da própria peça, como por exemplo, num processo de retificação (MCKEOWN et al., 1990). Essa técnica pode ser igualmente usada para a obtenção de formas complexas, as quais dificilmente poderiam ser efetuadas com métodos tradicionais, aumentando assim, a flexibilidade do processo.

A necessidade de deslocamentos de alta precisão não faz parte apenas dos processos de usinagem de ultraprecisão. Sistemas de posicionamento de alta precisão são fundamentais em diversos instrumentos de medição e sistemas para montagens ópticas, dentre os quais podem-se destacar os instrumentos de medição de textura superficial (mecânicos ou ópticos), sistemas

ópticos de informática, entre outros (ITAO, 1993, TANIGUCHI, 1996 e HOLMES; HOCKEN & TRUMPET, 1997).

Um exemplo clássico são os microscópios eletrônicos de varredura, os quais necessitam de sistemas de posicionamento com resoluções da ordem nanométrica sob cursos amplos e velocidades de aproximação relativamente altas (SUKUTA; OGAWA & UEDA, 1993 apud RUBIO, 2000). Nesses sistemas, o posicionador pode ser usado para movimentar tanto o sistema de leitura (apalpador), quanto à amostra em estudo (PICOTTO & PISANI, 1997). Outro exemplo que mostra a necessidade de sistemas de posicionamento submicrométricos é o módulo de posicionamento dos cabeçotes de leitura/gravação em sistemas ópticos de armazenamento de dados, cuja largura de banda do servossistema deve estar em torno de 5 kHz (ITAO, 1993).

Com relação ao controle e/ou medição da posição e forma de uma superfície, usam-se frequentemente sistemas de medições unidirecionais. Neste trabalho, faz-se uso de um novo conceito para resolução deste tipo de problema, a saber, a “tecnologia de processamento digital de imagem”, a qual permite a análise de dimensões no espaço, criando o conceito de medição multidirecional sem contato (AI, 1996). Para obter elevado nível de precisão na medição de deslocamentos angulares, há necessidade de sistemas de medição com elevado desempenho, sendo em sua maioria baseados no princípio da interferometria a LASER (PORTMAN & PERCHANSKY, 2001), já que todo sistema de medição deve ter como referência algum padrão. Nesse sentido, o comprimento de onda de luz é uma das mais estáveis referências que existem (SLOCUM, 1992).

A técnica de processamento digital de imagens permite dispor de uma ferramenta computacional capaz de auxiliar no desenvolvimento de um algoritmo de identificação e controle que permita corrigir desvios de posicionamento por meio da análise de padrões gráficos, gerando sinais de comando para modificação da posição relativa ferramenta/peça, com o intuito de alcançar a geometria desejada.

Uma análise mais aprofundada do problema a ser solucionado conduz ao campo da inteligência artificial. Neste sentido, técnicas não convencionais baseadas no conhecimento, como redes neurais e lógica difusa, apresentam-se como soluções mais promissoras para o desenvolvimento deste projeto.

Neste sentido, propõe-se neste trabalho prosseguir no desenvolvimento de um posicionador angular para identificação de posição baseado em reconhecimento de imagens, usando como sistema de medição o interferômetro de Fizeau, tendo como classificador de imagem um algoritmo baseado em redes neurais artificiais. Cabe aqui destacar o princípio de funcionamento mecânico do MAR, o qual já foi devidamente estudado por MONTANARI (1999), sendo que é composto, basicamente, por uma base rígida (inferior) e uma base flexível

(superior). Essas partes são perfeitamente solidárias, sendo que o movimento angular (tipo plataforma de *Stewart*) da mesa superior é originado pelo movimento linear de atuadores piezelétricos que estão fixados à mesa inferior. Os elementos constituintes geram um sistema de microposicionamento angular de alta rigidez e ampla largura de banda, capaz de posicionar uma superfície com resolução inferior a  $4.10^{-5}$  graus, tal que este sistema posicionador será encarregado de modificar a posição relativa ferramenta/peça durante a usinagem de ultraprecisão. A FIGURA 1.3 mostra um esquema do sistema proposto.

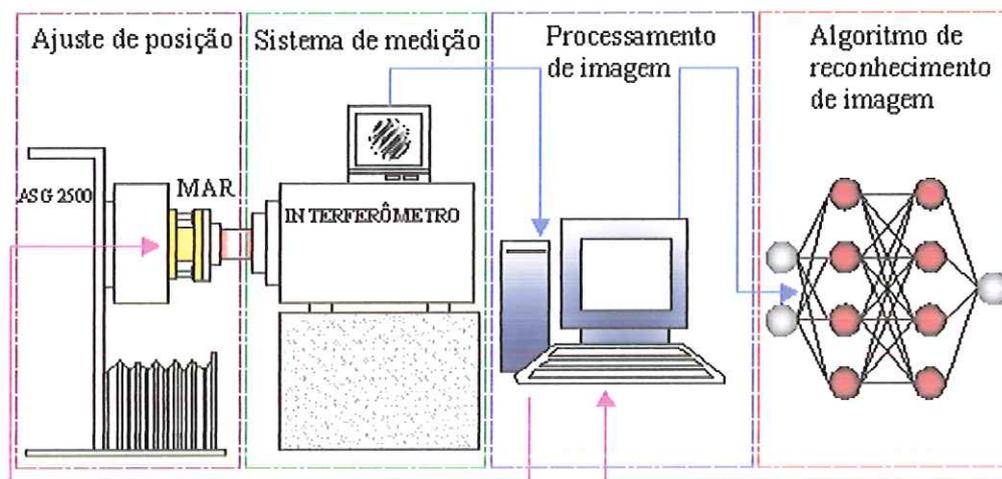


FIGURA 1.3 – Esquema que caracteriza o sistema do trabalho proposto.

De maneira geral, como pode ser observado pela FIGURA 1.3, o interferômetro faz a leitura da superfície a ser usinada e mostra as franjas interferométricas, uma placa de aquisição de imagens faz a captura dessas franjas e as transformam em entradas das redes neurais artificiais, que têm como função o reconhecimento e identificação da posição do microposicionador angular rotativo (MAR), assim, pela saída da rede neural, é possível fazer o controle da posição do MAR durante a usinagem.

Neste sentido, pode-se afirmar que a principal contribuição deste trabalho baseia-se na tentativa de aplicação de novas tecnologias, a saber, sistemas de reconhecimento de imagem e redes neurais baseadas nos Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen, a projetos de ultraprecisão. A metodologia contempla a análise por comparação de *pixels* e significância de imagens.

## 1.2. Justificativa

Em virtude da necessidade de acompanhar a tecnologia mundial empregada na construção de máquinas-ferramenta e sistemas posicionadores de ultraprecisão será desenvolvido um microposicionador angular, que possibilita o posicionamento da peça durante a usinagem de ultraprecisão, facilita o *set up* inicial entre a ferramenta e a peça e permite o torneamento de peças com geometrias diferenciadas. Com este desenvolvimento, ampliam-se os conhecimentos referentes ao projeto e fabricação de máquinas, instrumentos e componentes de precisão, além da introdução das técnicas de reconhecimento de imagem e redes neurais aplicadas a projetos de ultraprecisão. Somente por meio da experiência prática consegue-se verificar as reais dificuldades e limitações da aplicação das técnicas e conceitos, as quais, associadas ao conhecimento teórico do assunto, permitem identificar possíveis soluções que venham efetivamente contribuir com o desenvolvimento da área.

## 1.3. Objetivos

Dentre os objetivos que norteiam este trabalho, pode ser citado, como proposta inicial, o desenvolvimento de um sistema microposicionador angular rotativo, realizado no Laboratório de Engenharia de Precisão da EESC-USP, que permite o posicionamento de ferramenta e/ou peças na usinagem de ultraprecisão e gerar superfícies não rotacionais durante o torneamento.

Com o intuito de verificar a funcionalidade do sistema mecânico proposto para o microposicionamento angular, são feitas avaliações a respeito de suas características estáticas (verificar a formação de um plano na parte superior do MAR quando acionado um ou dois atuadores) e dinâmicas (verificar frequências naturais do sistema), usando um método de modelagem matemática, baseado em elementos finitos. Juntamente ao estudo do comportamento do microposicionador, faz-se necessário encontrar um meio de fixar as peças a serem usinadas, pois o MAR não oferece nenhum mecanismo para esta finalidade, então será projetada e construída uma placa de vácuo que será acoplada ao MAR e permitirá a fixação das peças a serem usinadas.

Um dos objetivos específicos de maior relevância é validar o uso do processamento de imagem como ferramenta capaz de auxiliar na identificação de posicionamento. Esse processamento de imagem consiste, inicialmente, na digitalização da imagem produzida por meio de um interferômetro LASER de Fizeau. A alternativa do LASER fornece maiores facilidades de montagem, seguindo o princípio de Abbé, além de ter como característica principal, alta resolução (31,6 nm,  $\frac{\lambda}{20}$  com  $\lambda = 632$  nm) (WYKO® 6000, 1989), e ainda,

apresenta um sistema de medição com estrutura metrológica independente, minimizando as influências das variações de carga (interferômetro) sobre a base da máquina, já que do ponto de vista da engenharia de precisão todos os materiais estão sujeitos a distorções, as quais, muitas vezes, podem superar as tolerâncias admitidas (DUDUCH et al., 2004). Em sua maioria, as distorções são produtos de cargas estáticas e dinâmicas que atuam sobre a estrutura da máquina (SLOCUM, 1992).

Além disso, este trabalho visa avaliar o uso das técnicas de inteligência artificial como ferramenta para o desenvolvimento de um algoritmo de identificação de imagens, baseado no conhecimento, que emprega como elemento multi-sensor, imagens interferométricas, representando posição. O desafio aqui foi procurar oferecer, em um ambiente de processamento de imagens, a possibilidade de uso de uma técnica computacional, a de Redes Neurais Artificiais (RNA), mais precisamente dos Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen (SOM – do inglês *Self-Organizing Maps*) (KOHONEN, 2001), como uma ferramenta para identificação de posição na ordem micrométrica.

Finalmente, deve-se salientar a possibilidade de avaliar o desempenho e as limitantes do sistema de controle, permitindo que sejam discutidas alterações no sentido de torná-lo técnica e economicamente consistente.

#### 1.4. Organização da Tese

Dados os objetivos deste trabalho consideram-se, além deste capítulo introdutório, o desenvolvimento de mais quatro capítulos com a seguinte estrutura:

Capítulo 2 – **Revisão bibliográfica** – apresenta uma introdução a respeito de sistemas de posicionamento de ultraprecisão, reconhecimento de imagens e, ainda, reúne definições e aplicações de sistemas ópticos interferométricos.

Capítulo 3 – **Metodologia**: mostra as características físicas do microposicionador angular rotativo e o procedimento experimental usado.

Capítulo 4 – **Resultados e discussões**: apresenta a análise estática e dinâmica do microposicionador usando elementos finitos e adaptações para fixação da peça a ser usinada, além dos testes experimentais e as simulações numéricas. São também tecidas discussões relativas ao desempenho da técnica usada, bem como a respeito do processamento de imagens.

Capítulo 5 – **Conclusões e sugestões para trabalhos futuros**: são apresentadas conclusões quanto à finalização do trabalho desenvolvido e feitas sugestões para trabalhos futuros.

## *Capítulo 2*

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1. Introdução**

Com a modernização e automatização de sistemas mecânicos, aumentou o uso da visão computacional para verificar e controlar o seu funcionamento, por meio de imagens. Diversas técnicas baseadas em conceitos de inteligência artificial, tais como redes neurais e lógica nebulosa têm sido usadas para auxiliar no reconhecimento e caracterização de imagens provenientes desses sistemas. Dentro da mecânica de precisão, propõe-se o uso dessas técnicas inteligentes para reconhecer imagens interferométricas. Nesse trabalho, as imagens interferométricas são responsáveis pela indicação da posição do sistema de microposicionamento angular proposto ou, no seu efeito, analisar a topografia da superfície a ele fixada (peça). Diante da diversidade de tópicos relacionados nesse trabalho, consta neste capítulo, uma revisão bibliográfica dos principais temas a serem abordados, os quais são: sistemas de posicionamento de ultraprecisão, reconhecimento de imagens e interferometria.

#### **2.2. Sistemas de Posicionamento de Ultraprecisão**

Sistemas de posicionamento de ultraprecisão devem possuir três características principais:

- Alta rigidez;
- Baixo atrito;
- Baixa inércia.

Essas características devem ser aliadas a sistemas de ajustagem e correção de erros já que não se deve tentar aumentar a precisão da máquina aumentando ao máximo a precisão de cada elemento, pois os custos tornariam a execução do projeto inviável (PURQUERIO et al., 1994).

Basicamente, um sistema de posicionamento tem como objetivo movimentar um objeto ao longo de uma trajetória pré-determinada até uma posição desejada, em geral por meio de energia mecânica. Ou seja, os sistemas posicionadores são construídos com o propósito de estabelecer posições relativas entre elementos de um mesmo sistema. É necessário o entendimento dos elementos constituintes de um posicionador para entender o seu funcionamento. MONTANARI (1999), RUBIO (2000) e BURATO (2003) apresentam uma revisão a respeito destes elementos, a saber: guias de movimento, transmissões mecânicas, acionamento e sensores de medição.

Para realizar este movimento, faz-se necessária a aplicação de sistemas de microposicionamento servocontrolados, que permitam baixas amplitudes de movimento e seguimento de altas frequências de acionamento. Um dos componentes básicos destes sistemas de microposicionamento é o elemento motor, que realiza a conversão do sinal elétrico em energia mecânica de movimento. Este componente eletro-mecânico, denominado de atuador, é o que transfere ao microposicionador as melhores características de rigidez e rapidez de resposta. Na sua grande maioria são fabricados em tecnologia de estado sólido (RUBIO; DUDUCH & PORTO, 1996).

O projeto de um sistema posicionador é efetuado de tal modo que ele se comporte, tanto quanto possível, como um corpo rígido, isto é, com um número de restrições suficientes para garantir movimento apenas nas direções desejadas. Neste sentido, existem sistemas de posicionamento que possuem movimentos de translação e/ou rotação, podendo apresentar um ou mais graus de liberdade (ASANO & GOTO, 1991).

A busca por sistemas posicionadores cada vez mais precisos tornou necessária a construção de equipamentos de melhor qualidade e a elaboração de novos métodos para a identificação e minimização dos erros de posicionamento, causados em sua maioria pela presença de fatores perturbadores de origem interna ou externa aos equipamentos. Essa minimização pode ser obtida pela otimização dos elementos que compõem os sistemas posicionadores ou pela compensação de erros, fazendo uso de atuadores de alta repetitividade, resolução e rapidez de resposta de posicionamento, além de alta rigidez quando comparados aos equipamentos convencionais (WATANABE, 1992).

Diversos autores estão atentos quanto à resolução do problema do controle da posição relativa ferramenta/peça em processos de usinagem de alta precisão. Soluções variam desde a inclusão de microposicionadores em máquinas já existentes até a concepção e desenvolvimento

de novas máquinas aplicando as mais modernas tecnologias e avançados conceitos de projeto, como por exemplo, em CORBETT et al. (1999) e WECK & DAY (2002).

O controle pode ser conseguido pela correção do movimento diretamente na ponta cortante da ferramenta em tempo real, via sinal de posição, obtido por meio de sensor de posição que aciona diretamente um módulo microposicionador que, por sua vez, desloca um porta-ferramenta à superfície da peça a ser usinada, quando a peça estiver sobre um mecanismo que permita tal controle, antes e/ou durante o processo (RUBIO, 2000).

Um exemplo clássico de controle de posição da ferramenta é apresentado por FALTER & DOWN (1987) onde se mostra o desenvolvimento de uma máquina-ferramenta de torneamento com diamante com alta rigidez, cuja posição da ferramenta é ajustada por um atuador piezelétrico na direção vertical (axial).

GEE; MCCANDLISH & PUTTICK (1989) usaram um torno com ferramenta de ponta única de diamante para investigar mecanismos de usinagem de materiais frágeis. Neste trabalho, a topografia da peça a ser usinada foi monitorada por meio de um interferômetro de Fizeau e, ao mesmo tempo, a posição da ferramenta foi controlada por meio de um LASER interferométrico.

Outro exemplo é encontrado em HARA; MOTONISHI & IOSHIDA (1990) que buscaram uma nova estratégia de microusinagem com alta rigidez e resolução, controlando a posição da ferramenta com um atuador piezelétrico e monitorando a posição relativa entre o atuador e a peça por meio de um sensor capacitivo.

MORIYAMA (1991) apud MIZUNO (1993) apresentou um gerador de superfícies anesféricas com alto grau de precisão. É uma máquina de *fly cutting* onde a profundidade de corte da ferramenta é controlada por um atuador piezelétrico.

KANIZAR et al. (1996) apresentaram resultados experimentais que confirmam a necessidade do uso de microposicionadores controlados em malha fechada, no caso, um sistema de porta-ferramenta com material magnetoestrutivo, Terfenol-D<sup>®</sup> (uma liga composta por ferro, térbio e disprosio), que funciona como um motor linear, durante a usinagem de ultraprecisão.

RUBIO (2000) propôs um sistema de porta-ferramenta com atuador magnetoestrutivo, para atuar em tempo real, durante a usinagem de ultraprecisão.

NAKAO & DORNFELD (2003) usaram um microatuador magnetoestrutivo para controlar a posição da ferramenta durante a usinagem de ultraprecisão. Um sensor de emissão acústica foi fixado ao porta-ferramenta e o sinal recebido foi capturado e usado como sinal de realimentação do microatuador, com o intuito de melhorar a precisão de usinagem. Por meio deste sistema, os valores obtidos de RMS (rugosidade média quadrática) e desvio padrão dos erros de usinagem foram 0,089  $\mu\text{m}$  e 0,087  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Isso representa uma redução

de 20% com relação ao uso do sistema de controle convencional. Tais erros de usinagem podem ser atribuídos, principalmente, à deformação estrutural da máquina-ferramenta ou à ferramenta de diamante e/ou à peça a ser fabricada.

Em grande parte dos casos discutidos na literatura, a posição da ferramenta é monitorada em relação a um ponto de referência na estrutura da máquina, entretanto, em alguns casos, como a máquina desenvolvida por GEE; MCCANDLISH & PUTTICK (1989), a posição da peça é o elemento a ser monitorado. KHONO et al. (1989) analisam um sistema de controle para medir a superfície de referência de uma peça e mostram a eficácia do monitoramento e controle da posição da peça.

De forma análoga, pode-se alterar a posição relativa ferramenta/peça por meio da movimentação da própria peça, como no exemplo apresentado por McKEOWN et al. (1990) para um processo de retificação.

Como visto nos parágrafos anteriores há diversos trabalhos que mostram o uso de posicionadores que permitem correções de erros de posição. Como citado anteriormente, para a usinagem de ultraprecisão é necessário que esses posicionadores forneçam alta resolução e repetitividade de posicionamento, assim como disponibilidade de controle da trajetória, sistemas metrológicos com resolução, repetitividade e velocidades compatíveis para atuação em tempo real, também é necessário que possuam alta rigidez e frequência de ressonância superior àquelas obtidas quando o sistema estiver em operação (durante a usinagem).

Dentro deste conceito de desenvolvimento, KIKUIRI et al. (1988) apud MIZUNO (1993) apresentaram um posicionador angular usando um sistema de alavanca para posicionamento de substratos (*wafers* – semicondutores para fabricação de circuitos integrados). Embora fornecendo resolução de 0,3 graus, a rigidez e o comportamento dinâmico não se mostraram satisfatórios para usinagem de ultraprecisão.

YONEZAWA et al. (1990) apud JESUS (1999) mostraram ensaios realizados em uma mesa de posicionamento de alta precisão e alta velocidade, que possuía dois mecanismos de acionamento complementares e dupla malha de controle. Um LASER interferométrico, cuja resolução era de 5 nm, foi usado para obter realimentação de posição no sistema de controle e um *encoder* foi acoplado ao motor de modo que, a velocidade angular pudesse ser usada para compensação de atrito.

Já ZHONG & NAKAGAWA (1992) mostraram uma mesa de posicionamento angular com três graus de liberdade, isto é, movimento na direção axial e inclinação em torno de dois eixos perpendiculares, com resolução de 10 nm, para experimentos de retificação, especificamente para obtenção de superfícies não planas. A mesa era apoiada em três pontos por

molas espirais que eram acionadas por três atuadores piezelétricos e seu controle foi feito com base na teoria de controle  $H_\infty$ .

Por sua vez, MIZUNO (1993) propôs um posicionador com três graus de liberdade, que possuía três atuadores piezelétricos. O sistema de controle de posição empregava sensores de fibras ópticas.

TOMITA; KOYANAGAWA & SATOH (1994) desenvolveram um posicionador angular com estrutura paralela com seis graus de liberdade de posicionamento e resolução de 10 nm. Entretanto, não foi possível controlar a posição da peça com o eixo-árvore em movimento, devido a sua baixa rigidez e largura de banda.

LEE & GWEON (2000) estudaram um sistema de microposicionamento angular com três graus de liberdade (um deslocamento linear e dois angulares) que usava três atuadores eletromagnéticos e mancais aerostáticos. O sistema foi montado sobre outro plano de movimento que possuía três graus de liberdade, resultando num sistema com seis graus de liberdade.

No intuito de alcançar resoluções de posicionamento submicrométricas e com rapidez de resposta suficientemente alta (compatível com a necessidade), vários pesquisadores têm optado por soluções que usam diversas geometrias, tipos de acionamento, sensores de posicionamento e algoritmos de controle em máquinas-ferramenta de alta precisão e/ou equipamentos de medição como, por exemplo, o microscópio eletrônico de varredura.

Nesse trabalho, as imagens interferométricas são responsáveis pela indicação da posição do sistema de microposicionamento angular proposto ou, no seu efeito, analisar a topografia da superfície a ele fixada (peça), para isso faz-se necessário o reconhecimento e processamento dessas imagens. Portanto, a seguir é apresentada uma revisão a respeito de reconhecimento e processamento de imagens.

### 2.3. Reconhecimento de Imagens

Desde a antigüidade, o homem tem procurado descrever matematicamente sistemas reais para ajudar a entendê-los e, assim, resolver problemas relacionados a eles. O problema de desenvolver modelos matemáticos de processos ou sistemas reais usando apenas dados observados é de fundamental importância não só para o meio acadêmico, mas também para o meio industrial. Apesar da crescente sofisticação de tais modelos, a antiga idéia de representar

um sistema real por meio de seu análogo matemático permanece ainda um desafio não totalmente resolvido.

Genericamente falando, modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda maneiras de desenvolver e implementar modelos matemáticos de sistemas ou processos reais, a partir dos dados observados (AGUIRE, 2000). Segundo BARRETO (2003) uma das formas mais comuns de obter tais modelos é por meio de modelagem fenomenológica também conhecida por modelagem física do processo ou, ainda, modelagem caixa branca. Nesse caso, faz-se necessário conhecer a fundo as relações matemáticas que descrevem os fenômenos envolvidos. Frequentemente, não é viável seguir esse procedimento de modelagem, devido ao alto grau de conhecimento e tempo gasto no equacionamento de todos os fenômenos de interesse, principalmente para sistemas complexos (não lineares e/ou variantes no tempo).

Outra forma de obter modelos matemáticos é a identificação de sistemas que, ao contrário da modelagem caixa branca, desenvolve técnicas que usam pouco ou nenhum conhecimento prévio dos sistemas em estudo. Tais métodos são usualmente referidos como identificação caixa preta ou modelagem empírica (BARRETO, 2003). Nesse caso, o tipo do modelo, os requisitos e suposições necessárias para sua aplicação e as técnicas usadas para sua validação são bastante distintas daqueles baseados na modelagem fenomenológica. Técnicas de identificação de sistemas, em geral, são bastante usadas na obtenção de modelos para sistemas complexos.

Recentemente, vários autores têm sugerido a aplicação de redes neurais artificiais (RNA) (NARENDRA & PARTHASARATHY, 1990, HUNT et al., 1992, SJÖBERG et al., 1995; AGUIRE, 2000, NASCIMENTO & YONEYAMA, 2000, NORGDARD et al., 2000; BARRETO, 2003 entre outros). Seu emprego justifica-se em parte pelo fato de certas arquiteturas de redes neurais, tais como perceptron multicamadas (MLP, do inglês *Multilayer Perceptron*) e redes de função de base radial (RBF, do inglês *radial basis functions*) ambas de treinamento supervisionado, poderem representar com precisão arbitrária qualquer mapeamento não-linear entre a entrada e a saída de um sistema. Tais redes podem ser treinadas para descrever a dinâmica do processo em ampla faixa de operação, provendo assim sua representação fiel, sobre a qual pode-se projetar e desenvolver várias estratégias de controle.

Neste trabalho, a identificação de sistemas está relacionada com o reconhecimento de imagens interferométricas. Devido à grande dificuldade de modelagem matemática da posição e quantidade de franjas, optou-se por fazer a identificação empregando a análise de imagens, ou seja, capturar a imagem, processá-la e compará-la com uma base de dados contendo outras imagens (padrão). De maneira geral, a análise de imagens tem como objetivo produzir descrições, tais como forma, quantidade, posição e tamanho na análise de eventos, peças ou

lotes, entre outras. Aplicações de análise de imagens são numerosas e diversas, sendo válida também para sistemas de posicionamento.

Para melhor entendimento a respeito da técnica de reconhecimento de imagens, bem como as técnicas de processamento de imagens, faz-se necessário realizar uma sucinta revisão bibliográfica sobre imagem, visão computacional, processamento de padrões e processamento de imagens.

### 2.3.1. Imagem

Atualmente, diversas áreas têm usado procedimentos de reconhecimento de padrões e análise de imagens. Áreas como processamento de informações escritas e documentação têm usado análise de imagens para reconhecimento de caracteres e documentos. Na área médica, tem-se a identificação e diagnóstico automático de tumores, contagem de células do sangue e sistemas de visualização. Na indústria, a inspeção automática é uma das principais aplicações. Na área de segurança, tem-se a identificação de pessoas por meio de impressões digitais, reconhecimento da face, da íris e do formato da mão. Em aplicações militares, é aplicada na identificação de alvos táticos, interpretação de imagens de satélites etc. Em robótica diversos sistemas de visão e reconhecimento de padrões têm sido desenvolvidos, seja para aplicações de exploração em lugares perigosos para seres humanos, como em outros planetas e em usinas nucleares, seja para auxílio a deficientes físicos, sistemas de visão de auxílio à dirigibilidade de automóveis, aviões, entre outros. Outras áreas de aplicação são: realidade virtual, entretenimento, astronomia etc.

Depois do extraordinário desenvolvimento da automação em meados dos anos 70 e com os avanços computacionais tais como alta velocidade de processamento, alta resolução de vídeo e linguagens computacionais mais eficientes para processamento de dados, as técnicas de processamento de imagem têm sido introduzidas em várias linhas de produção. A TABELA 2.1 mostra os diversos campos onde podem ser empregadas tais técnicas (HATA, 1993). As principais vantagens dessas técnicas são: objetividade, suportar ambientes robustos e apresentar alta repetitividade (SCHALKOFF, 1989). A sua principal desvantagem é limitar-se à programação computacional pré-definida, não tendo inteligência própria.

TABELA 2.1 – Aplicações de técnicas de processamento de imagens em linhas de produção (HATA, 1993).

Montagem	Posicionamento 2-D e 3-D
Inspeção	Detecção de defeitos
	Posição
	Forma
	Risco
	Rachadura
Monitoramento	Qualidade de imagens
	Partículas estranhas
	Orientação
	Contagem

### 2.3.2. Formação da Imagem

Uma imagem natural, na forma mais comum, origina-se a partir da emissão ou reflexão de raios de luz que são percebidos pelos olhos, capturados por uma película sensível (filme) ou por elementos fotos sensíveis de uma câmera. Essa imagem depende da “quantidade de luz” incidente sobre a cena e da parcela que é refletida sobre o elemento sensível. Uma imagem natural, perceptível pela visão humana, caracteriza-se por um conjunto contínuo de radiações a partir do vermelho, passando pelo amarelo até o violeta (BAXES, 1994).

Do ponto de vista matemático, pode-se definir uma imagem como uma função contínua  $f(x, y)$ , bidimensional, definida numa certa região, onde para qualquer par  $(x, y)$  existe um valor  $f$  proporcional à intensidade do brilho da imagem naquele ponto. As coordenadas espaciais  $(x, y)$  localizam qualquer ponto pertencente à imagem em questão. Para a maioria das imagens, a região de definição é um subconjunto limitado do plano, e os valores assumidos pela função são números reais limitados e não-negativos (imagens contínuas ou analógicas) (ROSENFELD & KAK, 1982).

Como os computadores não manipulam dados analógicos, é necessário converter uma imagem contínua em sua forma digital. Teoricamente, isso pode ser feito pela multiplicação da imagem contínua  $f(x, y)$  por uma função delta de Dirac bidimensional,  $\Delta(x, y)$  (FIGURA 2.1).

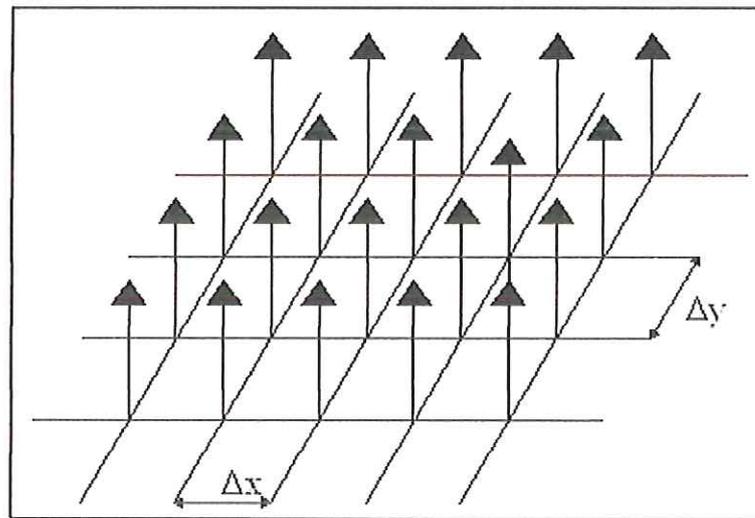


FIGURA 2.1 – Função (x, y).

O termo imagem digital refere-se a uma imagem que pode ser discretizada (composta por pontos discretos) quanto às suas coordenadas espaciais e quanto à intensidade de seu brilho. Cada ponto possui um tom de cinza ou uma intensidade de brilho e, de um ponto a outro, não existe variação contínua dessas propriedades. Logo, uma imagem digital pode ser considerada *uma matriz cujos índices das linhas e colunas identificam um ponto dentro da imagem e o valor do elemento da matriz que identifica o nível de intensidade luminosa naquele ponto* (GONZALEZ & WOODS, 1993).

Todo sistema de processamento de imagem digital pode ser representado por um diagrama de blocos contendo, normalmente, três elementos principais, como mostrado na FIGURA 2.2.

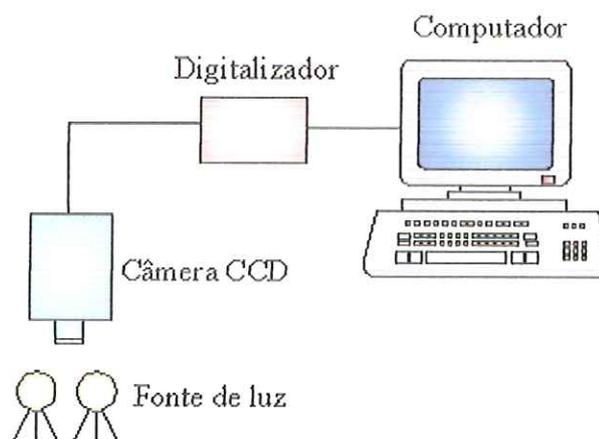


FIGURA 2.2 – Sistema de visão artificial.

A aquisição de imagens (por exemplo, executada por câmera CCD (*Charge Coupled Device*)) é a conversão da cena numa representação digital que pode ser processada por um computador e ser efetuada por um sistema de sensores especialmente projetado para captar uma cena e prover sua representação digital. Essa aquisição pode envolver a conversão de outros meios, tais como, televisão e filmes gravados em fitas.

Na etapa de aquisição de dados, os objetos a serem classificados devem ser capturados por sensores de imagens, os quais produzem modelos de imagens com algumas simplificações com relação às imagens reais: são discretos, bidimensionais, limitados em extensão e em número de cores ou níveis de cinza.

A exibição da imagem é a geração de um produto de saída que possa ser visto por um observador humano por meio temporário (monitor de vídeo, por exemplo) ou permanente (filme), todos numa forma analógica, convertida a partir de dados digitais.

O processamento de imagem fornece a digitalização da imagem para produzir o resultado desejado, desde sua intensificação para a exibição melhorada do detalhe de uma cena até o processamento de várias imagens constituintes.

No processo de discretização, a imagem é quadriculada por uma grade (do inglês *grid*) regular. Cada *pixel* (célula) (do inglês *picture element*) dessa grade é descrito por um par de coordenadas  $(x, y)$  relativas a um referencial posicionado no canto superior esquerdo da imagem. A FIGURA 2.3 mostra uma grade usada para discretização de uma imagem.

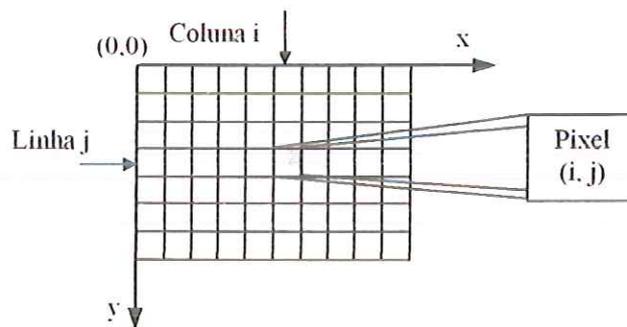


FIGURA 2.3 – Grade usada para discretização da imagem em uma matriz de *pixels*, cada um associado a uma coordenada  $(i, j)$ .

Os índices linha e coluna identificam um ponto na imagem e seu correspondente valor indica o nível de cinza. Desta forma, a imagem pode ser descrita como uma matriz, onde cada elemento está associado a um *pixel*.

Numa imagem preta e branca, as cores são substituídas por uma escala de cinza. Nesta escala, todas as parcelas primárias assumem o mesmo valor, originando os vários tons de cinza. Quando o número de níveis de cinza é igual a dois (geralmente tem-se os níveis: 0 e 1), a imagem é conhecida como binária. Em aplicações de análise de imagens, imagens binárias têm grande importância, pois possuem uma classe de algoritmos relacionados, bem conhecidos e de fácil processamento para extração de propriedades (*features*) geométricas e topológicas dos objetos (JAIN; KASTURI & SCHUNCK, 1995 e ZENZO; CINQUE & LEVIALDI, 1996). Existem algoritmos simplificados para obtenção de posições, coordenadas, identificação de regiões, linhas e pontos em imagens binárias (SCHALKOFF, 1989). A binarização auxilia no dimensionamento de regiões e cria a separação entre os elementos em estudo e o fundo da imagem.

Para operar a binarização de uma imagem é necessário estabelecer o limiar de binarização, ou seja, o valor para o qual a imagem é dividida em duas propriedades: *pixels* com valor acima ou igual ao limiar e *pixels* com valor abaixo desse limiar. O limiar faz papel de “divisor de águas”. Abaixo dele, os *pixels* terão valor 0 – cor preta, acima, valor 1 – cor branca. Normalmente, os sistemas podem ser programados para definir automaticamente esse limiar.

A escolha do número de *bits* por *pixel* a serem digitalizados num sistema de aquisição de imagem – quantização em níveis de cinza ou cores – está relacionada com a taxa de transferência de dados e com a sua capacidade de armazenamento. Quanto mais *bits* por *pixel*, maior será o tempo de transmissão até o aparelho de exibição da imagem (caso das espaçonaves interplanetárias), e maior será a quantidade de memória necessária para armazenar a imagem.

Já para determinar a menor resolução espacial detectável por um sistema digital, em particular, leva-se em conta a óptica do sistema de aquisição de imagem e a frequência de amostragem com que se discretiza uma imagem analógica de distribuição contínua.

A FIGURA 2.4 exemplifica uma mesma imagem com quantização (intensidade de cinza) e resolução espacial (número de *pixels*) variada, mostrando a importância de ambas na qualidade da imagem. A resolução define o detalhamento da imagem. Quanto maior for a resolução melhor será a aproximação da imagem digital da imagem real. O nível de quantização corresponde à precisão numérica que a representação do tom de cinza possui na imagem digital. Essa precisão numérica está relacionada ao espaço destinado à informação. Esse espaço é medido em *bits* e a informação perfeita da tonalidade real teria infinitos *bits*.

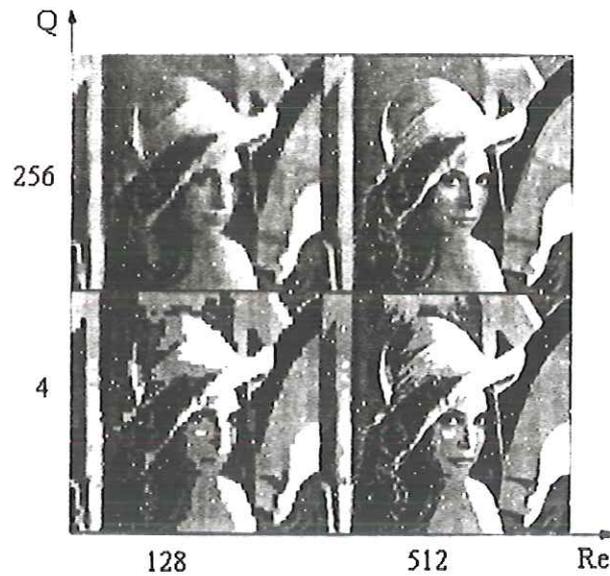


FIGURA 2.4 – Importância da resolução (Re) e da quantização (Q) na qualidade da imagem. As imagens superiores foram quantizadas com 256 níveis de cinza, enquanto as inferiores foram quantizadas com 4 níveis. As imagens da esquerda foram amostradas com 128 pontos, enquanto as da direita foram amostradas com 512 pontos (CARVALHO et al., 2003).

O uso de altas resoluções justifica-se nos casos em que a precisão das medidas ou o nível de apresentação é um fator exigido. Em contrapartida, as exigências de memória e esforço computacional são diretamente proporcionais ao quadrado da resolução.

### 2.3.3. Visão Computacional

A visão humana parece ser caracterizada por uma hierarquia de processos. Tais processos são consideravelmente influenciados por fatores cognitivos (ROCHA, 2000). Seres humanos são claramente capazes de reconhecer objetos sem a necessidade de um rigoroso alinhamento da imagem da retina, sem necessidade de comparar *pixel* por *pixel* enquanto tomam suas decisões. Uma comparação mais global de atributos como textura, forma e analogias são baseadas em conhecimento, como ilustrado na FIGURA 2.5.

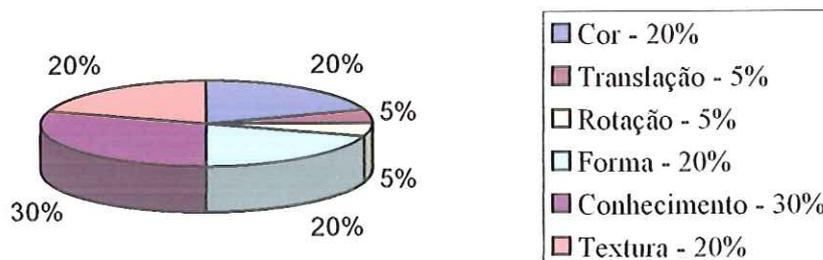


FIGURA 2.5 – Classificação humana de padrões.

Já a visão computacional, que visa duplicar eletronicamente o efeito da visão humana em perceber e compreender uma imagem, inicia-se apenas com uma matriz de valores numéricos, pela qual deverá entender a imagem e da qual deverá extrair informações. GOMES & VELHO (1994) apud ROCHA (2000) afirmam que visão computacional tem como objetivo interpretar, a partir de uma imagem, informações geométricas, topológicas ou físicas sobre a cena que deu origem à imagem. A visão computacional procura extrair informações contidas numa imagem com o objetivo de classificá-las, caracterizá-las e/ou reconstruí-las. COSTA (1996) afirma que visão computacional é a área de inteligência artificial envolvida na extração de informações de imagens, com a intenção de identificar e classificar objetos e padrões nela contidos, obtendo representações de níveis mais altos para o uso do homem ou de máquinas.

Segundo KELLER (1995) visão computacional é o estudo de teorias e algoritmos para automação de processos de percepção visual. Para tanto, é necessário executar várias tarefas, a saber: remoção de ruídos; suavizar ou realçar o contraste (baixo nível de visão); segmentar imagens para isolar objetos e regiões e descrever, reconhecer as imagens segmentadas (nível intermediário de visão) e, finalmente, interpretar a cena (alto nível de visão).

A visão computacional adapta-se melhor em medições a altas velocidades de atributos quantitativos num ambiente estruturado. Como exemplo, pode-se citar as inspeções de componentes microeletrônicos, cuja repetição levaria os humanos a erros conseqüentes de fadiga.

Outras características da visão computacional são (CARVALHO et al., 2003):

- Medições sem necessidade de contato – úteis em peças frágeis ou contamináveis pelo toque;
- Baixa relação custo/benefício dos equipamentos envolvidos;

- Geração contínua de novas tecnologias tanto em hardware quanto em software;
- Estabilidade do fluxo de aplicações.

ROCHA (2000) e JAIN, KASTURI & SCHUNCK (1995) definem, resumidamente, visão pela seguinte expressão:

**Visão = Interpretação (geometria) + Análise (medida) + Reconhecimento**

Sendo um campo multidisciplinar, a visão computacional requer experiências em diversas áreas de conhecimentos, abrangendo áreas da óptica, eletrônica, matemática, fotografia, engenharia computacional e aspectos da visão perceptual humana. A união de todos esses fatores introduz dificuldades aos pesquisadores desse campo.

No contexto relacionado à automação de processos industriais, pode-se dividir a área da visão computacional em duas sub-áreas (claramente relacionadas): processamento de imagens e reconhecimento de padrões. O primeiro trata, principalmente, com operações nas imagens e ajuda a melhorar sua "qualidade", ou enfatizar aspectos de importância particular, tendo como objetivo principal criar um modelo real fazendo uso de imagens, obtendo informações da cena a partir de sua projeção bidimensional. O segundo está relacionado com a identificação ou interpretação das imagens; ele ajuda a extrair informação (em alto nível) sobre o que a imagem tenta comunicar.

#### **2.3.4. Reconhecimento de Padrões**

Segundo KOHNO (1996), reconhecimento de padrões é a tecnologia de análise de informação de uma figura usando computadores digitais. Embora seja uma tecnologia altamente especializada e que requer elevados recursos financeiros, os rápidos avanços em computadores digitais em conjunto com os desenvolvimentos da tecnologia de reconhecimento de padrões têm permitido seu uso em diversas áreas, além de pesquisas laboratoriais, a saber, automação industrial (inspeção de circuitos impressos, inspeção de partes de máquinas, processamento de imagem e visão por computador); processamento de documentos (máquinas de leitura para cegos, leitores de códigos de barras); sistemas médicos (contagem de células no sangue, detecção de tumores em imagens de Raios-X, caracterização de tecidos usando ultra-sons, interpretação de eletrocardiogramas e diagnóstico médico); segurança (reconhecimento de voz,

identificação de impressões digitais e reconhecimento de faces); sensoriamento remoto (previsão da evolução de culturas, planejamento de uso de terras, monitoração ambiental, meteorologia, mapas topográficos e exploração mineira); aplicações na agricultura (direcionamento de equipamento, inspeção de produtos e ordenação e empacotamento de produtos) e aplicações científicas (interpretação de ondas sísmicas para previsão de terremotos e análise de composição molecular através de imagens de microscópio eletrônico).

O reconhecimento de padrões tem como objetivo classificar padrões de interesse dentro de um número de categorias, tipos ou classes. Os objetos podem ser letras impressas ou caracteres, células biológicas, componentes industriais, objetos coloridos etc. Portanto, inicia-se com uma imagem transforma-se-a dentro de uma descrição abstrata e atribui-se-lhe determinada classe. O relacionamento entre reconhecimento de padrões e processamento de imagens é fundamental porque é possível transformar uma imagem de tal modo que o problema da classificação torne-se fácil para um sistema de visão computacional.

Num sistema de visão computacional, o reconhecimento de padrões tem como função a extração de informações de determinada imagem ou a classificação de seu conteúdo, podendo ser dividido em duas abordagens, a saber, classificação de padrões e reconhecimento sintático.

A classificação de padrões normalmente faz uso de abordagens estatísticas para implementação do classificador, o qual é fundamentado em rigorosa base probabilística, assumindo que a estrutura e distribuição dos dados no espaço do problema sejam bem conhecidas. A construção dos classificadores baseia-se na conversão da probabilidade, *a priori*, das classes dos padrões de treinamento em medidas de probabilidade condicionada e, *a posteriori*, de um dado padrão pertencer a dada classe de treinamento.

O reconhecimento sintático baseia-se no fato de que inter-relacionamentos ou interconexões de características fornecem importantes informações estruturais que podem ser usadas na descrição dos padrões e em sua classificação (VASCONCELOS, 1995).

#### 2.3.4.1. Métodos para Reconhecimento de Padrões

Segundo TRONCO (1999) os sistemas de reconhecimento de padrões apresentam normalmente três fases:

- Treinamento: onde o sistema aprende a discriminar as classes apresentando exemplos representativos das classes padrões;

- Teste: onde um conjunto de padrões não vistos na etapa de treinamento é apresentado, de tal maneira que a capacidade de generalização (derivação correta de classes) do sistema é avaliada;
- Execução: onde tarefas práticas de reconhecimento são realizadas pelo sistema.

TRONCO (1999) mostra ampla revisão a respeito dos métodos usados para a realização da tarefa de reconhecimento de padrões. Os principais métodos envolvem:

- Métodos estatísticos – empregam teoremas de Bayes para o cálculo da probabilidade das classes de objetos, assumindo conhecimento prévio da distribuição das variáveis usadas na classificação.
- Métodos usando redes neurais – cada neurônio artificial executa um certo número de operações simples e transmite seus resultados aos neurônios vizinhos, com os quais possui conexão.
- Método do vizinho mais próximo – usa o conceito de distância entre a instância de classe conhecida e os padrões previamente aprendidos (COSTA, 1996).
- Métodos usando lógica difusa – fontes de informação são identificadas (atributos, informação contextual etc.) e uma medida difusa é gerada para cada classe de padrão, usando uma medida subjetivamente gerada ou estimada dos dados de treinamento ou de valores de todos os subconjuntos das fontes de informação. Um exemplo de classificador usando lógica difusa pode ser visto em KELLER et al. (1994).
- Métodos usando algoritmos genéticos – buscam simular um processo biológico natural. MARTINS (1994) apud TRONCO (1999) apresenta descrição de tais conceitos, além de seu emprego em conjunto com redes neurais artificiais para tarefas de reconhecimento de padrões.

### 2.3.5. Processamento de Imagens

Segundo BAXES (1994) os primeiros passos significativos em termos de processamento digital de imagens foram dados no início da década de 60. A Agência Espacial Americana (NASA – *National Aeronautics and Space Administration*) estava imersa no desafio do século XX, o programa Apollo e a conquista da lua. A sonda espacial Ranger 7 foi pioneira em fornecer milhares de imagens da superfície da lua. Essas imagens eram produzidas e transmitidas à Terra por meio de sinais analógicos. O Laboratório de Propulsão a Jato da NASA – Pasadena – Califórnia – criou as condições para que as imagens, depois de digitalizadas,

sofressem intervenção para corrigir a geometria e as distorções usando grandes *mainframes*. O processamento das fotos da Ranger 7 introduziu os computadores no mundo da imagem digital. A partir de 1980, a difusão de sistemas de visão computacional com o processamento de imagens, foi generalizada. São inúmeras aplicações em áreas como a pesquisa biológica (DNA), previsão meteorológica, sensoriamento remoto, medicina, engenharia, entre outras.

Atualmente, o processamento de imagens é usado em áreas do conhecimento humano para resolver inúmeros problemas, que, normalmente, requerem métodos capazes de melhorar a informação visual para análise e interpretação humana ou a percepção automática por máquinas.

O grande interesse no uso de sistemas de processamento de imagem é poder trabalhar em tempo real. Segundo FAGETH; ALLEN & JÄGER (1996) uma definição geral de processamento em tempo real é: *“O tempo de resposta de um sistema é pequeno se comparado ao tempo de mudanças no sistema, incluindo o tempo computacional”*.

Quando se trata de imagens há interesse ou em alterar sua aparência ou em extrair algum tipo de informação. Há, portanto, necessidade de processá-las. Para isso, podem ser empregadas diversas técnicas (GONZALEZ & WOODS, 1993), oriundas das mais diversas áreas (matemática, estatística, psicologia, engenharia etc.). Quaisquer medidas obtidas por sinais podem ser usadas como base para comparação. Por exemplo, pode-se comparar distribuição de amplitudes, valores médios, variâncias, funções de correlação e correlação cruzada, entre outros (FAGETH; ALLEN & JÄGER, 1996). Esse processamento é comumente apresentado e realizado em etapas, onde em cada uma delas deseja-se resolver algum tipo de problema.

Um sistema de processamento de imagens pode ser dividido em diversos componentes independentes, como mostrados na FIGURA 2.6. O processo inicia com uma imagem de entrada que, depois de processada, produz uma imagem de saída (CASTLEMAN, 1996 e JAIN; KASTURI & SCHUNCK, 1995). O retângulo em azul indica as partes encontradas atualmente nos sistemas de processamento de imagens comercializados. O poder do processamento está associado à potencialidade do processador gráfico e à capacidade de estocagem de imagens na memória principal. A organização desta memória pode variar segundo a resolução ou a necessidade de armazenamento da quantidade de imagens.

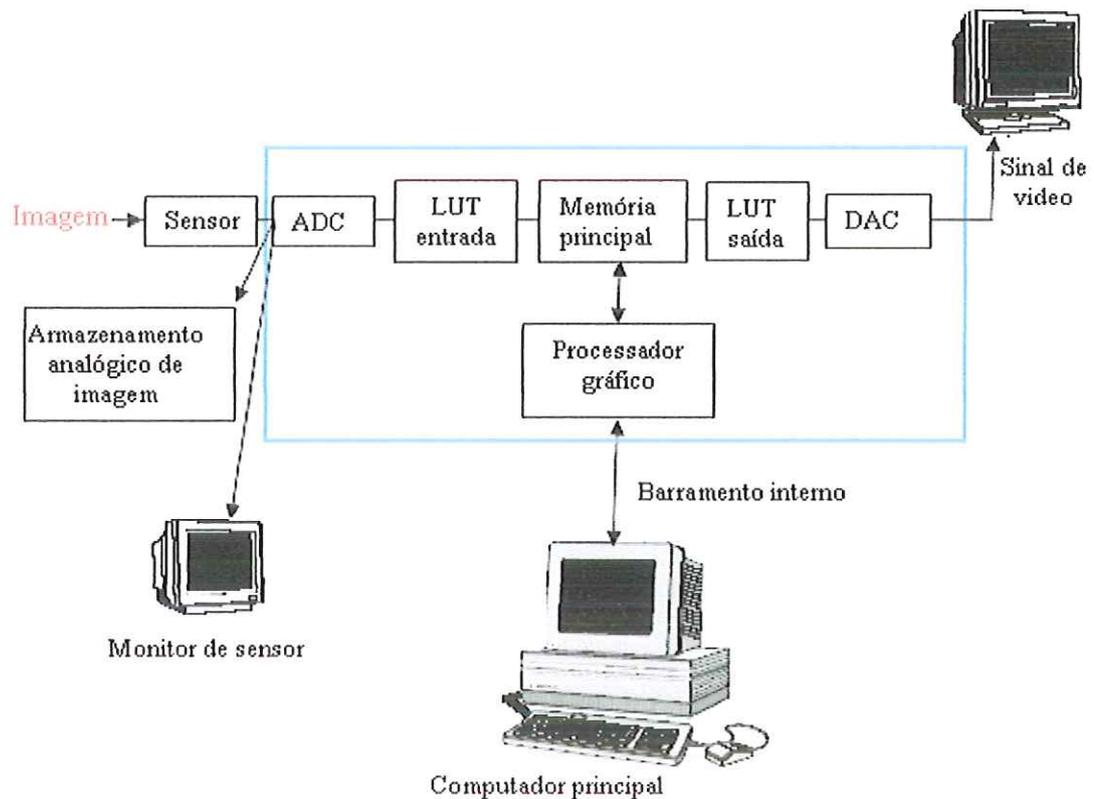


FIGURA 2.6 – Diagrama em blocos de um sistema genérico de processamento de imagens (ALBUQUERQUE & ALBUQUERQUE, 2003).

O módulo de entrada é constituído por uma câmara que captura a imagem real. Essa câmara envia a informação sob a forma de sinal analógico de vídeo a um conversor analógico digital. A imagem é então representada na forma digital. Alguns exemplos de módulos de aquisição são: as câmeras, como as de tubo (Vidicon) e as CCD, que nada mais são que sensores que recebem luz através de lentes e as convertem em sinais elétricos (CARVALHO et al., 2003), os *scanners* e alguns sensores (como sistemas de infravermelho, mapeamento magnético de uma superfície, sensoriamento de radares etc). Os campos de aplicação de sensores CCD são variados. Podem ser usados na inspeção radiográfica com imagens, na neutronografia de superfícies de compósitos de aeronaves, na tomografia de nêutrons em reator de pesquisa com baixa potência, em teste de dureza, ou ainda, em testes visuais à distância no interior de vaso de pressão, entre outros (CARVALHO et al., 2003).

O sinal de vídeo gerado pelo dispositivo de aquisição é convertido em sinal discreto pelo conversor A/D (analógico/digital). Este conversor é um dispositivo de conversão especial para sinais de vídeo, onde a aquisição é realizada segundo a padronização do sinal de vídeo (linha a linha). Após a conversão da imagem pelo módulo de conversão analógico-digital, cada intensidade indexa uma tabela de conversão. Esta tabela é conhecida como *look-up-table* ou

simplesmente LUT. As LUT são na realidade, memórias, que possibilitam modificar as intensidades adquiridas por valores pré-programados. Por exemplo, configurar uma LUT com uma função específica e corrigir, em tempo real, o contraste de uma imagem que está sendo adquirida pelo ADC (conversor analógico/digital). A imagem digital é, em seguida, armazenada em uma memória principal de acesso exclusivo de um processador gráfico. Em alguns casos, por questões de custos, ele pode mesmo não existir, deixando todo o processamento para o processador principal no computador de controle.

### 2.3.6. Processamento Digital de Imagens

O processamento digital de imagens tem como requisitos passos de pré-processamento em cada aplicação específica. Durante o processo de aquisição, diversos erros internos e externos ao processo degradam a qualidade da imagem, afetando consequentemente a fidelidade dos dados obtidos pela análise subsequente. Por meio do processamento digital, novas imagens são obtidas, usando diversas técnicas, as quais minimizam tais erros e melhoram a qualidade das imagens originalmente obtidas.

A FIGURA 2.7, por exemplo, ilustra uma imagem degradada (FIGURA 2.7(a)) e uma nova imagem (FIGURA 2.7(b)) com remoção do borrão.

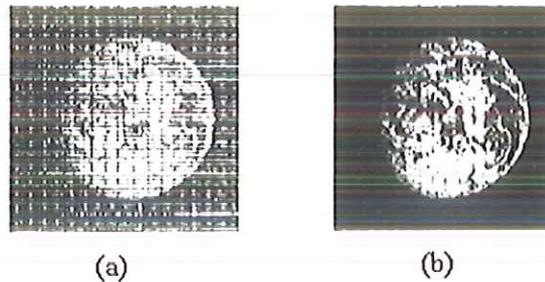


FIGURA 2.7 – Exemplo de remoção do borrão da imagem de um objeto em movimento.

O processamento digital de imagens envolve uma série de conceitos que incluem o estudo da estrutura do olho humano; o estudo de transformadas de imagens, como a Transformada de Fourier e outras transformadas separáveis de imagens; técnicas de realce, como filtragem e uso de máscaras, cujo propósito é processar a imagem de modo que o resultado seja mais apropriado para uma aplicação que a imagem original; restauração de imagens, como técnicas de filtragem inversa, Filtro de Wiener (filtro do mínimo médio quadrático), restauração interativa e interpolação de níveis de cinza, cujo propósito é reconstruir ou recuperar uma imagem

degradada; compressão de imagens, como compressão livre de erro e com perdas, cujo propósito é reduzir a quantidade de dados necessária para representar uma imagem digital; segmentação de imagens, como detecção de bordas, de pontos, de linhas e descontinuidade, cujo propósito é divisão da imagem em partes para sua análise; reconhecimento e interpretação como, por exemplo, técnicas de análise baseada em conhecimento e redes neurais.

As duas classes principais de processos são: radiométricos, onde os valores de níveis de cinza dos pontos da imagem são alterados, sem modificação da geometria e geométricos, onde a geometria da imagem é alterada, mantendo-se o máximo possível os valores dos níveis de cinza (JAIN; KASTURI & SCHUNCK, 1995 e ROSENFELD & KAK, 1982). Algoritmos de processamento de imagens são igualmente úteis nos primeiros estágios (processamento de baixo-nível) de um sistema de visão computacional, envolvendo tarefas como:

- Realçar imagens (aumentar contraste, realçar bordas);
- Compressão de imagens (para melhor armazenamento e transporte);
- Restauração de imagens (filtragem de ruídos, borrimento de imagens);
- Extração de características das imagens (*features*).

Processamento de imagem está relacionado com a manipulação de *pixels* de uma imagem de entrada, produzindo outros *pixels* na imagem de saída, de tal forma que tal processamento represente modificações favoráveis na imagem original.

O objetivo do processamento não é encontrar um método geral de processamento dos dados da imagem, mas encontrar o melhor meio de ajustar os erros enquanto esses dados são comparados. Existem vários métodos de processamento, dentre os quais podem ser citados:

- Comparação *pixel* por *pixel*;
- Função de correlação;
- Pré-processamento usando estatística;
- Pré-processamento FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*).

O propósito da abordagem adotada está na habilidade de reconhecer padrões de imagens dentro de um sinal ou medir a similaridade ou correspondência de duas ou mais funções aproximando parâmetros significativos de todos os dados da imagem. Em muitas situações essas funções são corrompidas pela adição de ruído e/ou funções contendo informações significativas que não são essenciais à classificação do processo. Em muitos dos problemas ocorridos na realidade, é possível somente a classificação após o pré-processamento de dados.

A comparação dos métodos de pré-processamento introduzidos, segundo FAGETH, ALLEN & JÄGER (1996), é mostrada na TABELA 2.2.

TABELA 2.2 – Comparação de métodos de pré-processamento.

Método	Compatibilidade em tempo real?	Quantidade de dados para o processo	Quantidade de dados para a classificação	Esforço de Hardware	Comparação inteligente
<i>Pixel por pixel</i>	Sim	Muito baixo	Muito baixo	Muito baixo	Ruim
Função por correlação	Sim <sup>a</sup>	Alto	Baixo	Alto	Regular
Estatístico	Sim	Baixo	Baixo	Baixo	Boa
FFT	Sim	Muito alto	Alto <sup>b</sup>	Muito alto	Muito boa

<sup>a</sup> – em geral não para a imagem toda, somente para padrões menores que 256 Bytes

<sup>b</sup> – pode ser reduzido sem usar todo o espectro

### 2.3.7. Abordagens de alguns Conceitos em Processamento de Imagens

A seguir são abordadas algumas definições básicas para melhor compreensão das técnicas de processamento de imagens:

Modificações na escala de cinza – são transformações radiométricas que desenvolvem operações pontuais, ou seja, além do novo valor do *pixel* depender somente de seu valor antigo, as suas relações espaciais (localização original dos *pixels*) são mantidas. Uma importante aplicação dessas transformações é realçar os detalhes visuais da imagem.

Transformação dos níveis de cinza – mapeia diretamente os níveis de cinza de uma imagem aplicando uma função de transformação (ROSENFELD & KAK, 1992) ou consultando tabelas (ROCHA, 2000).

Região de Interesse (ROI – *Region of Interest* ou AOI – *Area of Interest*) – é a região definida automaticamente a partir de parâmetros obtidos na própria imagem (ou por um usuário) onde o processamento está totalmente concentrado. Pode-se, por exemplo, definir uma região de interesse onde é sabido por antecedência que a iluminação de fundo é constante ou foi corrigida. Normalmente, nas técnicas de processamento de imagens sempre são encontrados problemas no tratamento das bordas da imagem. A criação de regiões de interesse faz com que apareçam também problemas nas bordas das regiões de interesse. A solução desse problema é completamente dependente do problema ao qual o processamento de imagens está associado.

Histograma – uma das ferramentas mais simples e úteis em processamento de imagens é o histograma dos níveis de cinza da imagem. O histograma de uma imagem consiste na contagem de *pixels* que fazem parte de uma determinada classe, estabelecendo a frequência de cada classe e representando, graficamente, a distribuição de frequências. O histograma é uma ferramenta muito usada para definir o limiar (preto/branco) adequado para uma imagem.

A FIGURA 2.8 mostra um exemplo de uma imagem e seu histograma. No caso, a imagem é constituída por grãos de arroz e o histograma mostra a porcentagem de *pixels* em cada nível de cinza.

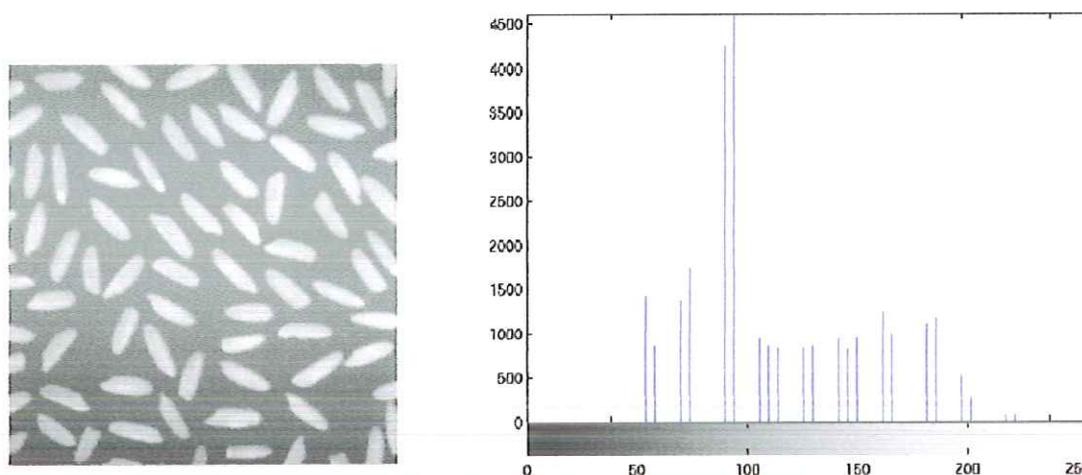


FIGURA 2.8 – Imagem de grãos de arroz e seu histograma (MATLAB<sup>®</sup> 6.5, 2002).

Remoção de ruídos e resíduos – em uma imagem pode-se considerar ruído qualquer alteração ou modificação indesejável nos valores dos *pixels*. Resíduos são *pixels* que não fazem parte do objeto ou região de interesse. Os ruídos e resíduos podem ser extraídos ou reduzidos usando técnicas de filtragem (CASTLEMAN, 1996). Entre os diversos tipos de técnicas de filtragem, normalmente a escolha do filtro adequado depende de alguns fatores, tais como, o tipo de ruído ou resíduo apresentado, a qualidade de filtragem desejada etc.

Filtro da mediana – um dos filtros estatísticos mais simples, chamado filtro da mediana, consiste na substituição de cada *pixel* da imagem por valor mediano de todos os *pixels* de uma região selecionada de  $(x, y)$ . Essa região de *pixels* pode ser selecionada através de uma janela de  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$  ou qualquer quantidade desejada de *pixels*.

Morfologia matemática – é uma abordagem baseada na forma, onde as operações morfológicas simplificam a imagem preservando as características essenciais e eliminando os

dados irrelevantes. Os dois conjuntos básicos de transformações morfológicas são: erosão e dilatação.

Segmentação – é um processo que consiste em dividir ou segmentar adequadamente uma imagem digital em regiões, segmentos ou objetos disjuntos (CASTLEMAN, 1996), que de forma intuitiva, possuem certas características ou estruturas em comum (RUSS, 1995).

Limiarização ou *threshold* – é uma das mais importantes abordagens da segmentação de imagens (GONZALEZ & WOODS, 1993), é uma técnica de análise por região, particularmente útil para imagens que contêm objetos sobre um fundo contrastante. Sua implementação computacional geralmente é simples e nunca falha para separar regiões fechadas distintas (CASTLEMAN, 1996).

Reconhecimento – é a parte do processamento que vai classificar os objetos a partir de informações encontradas na imagem, geralmente tendo como apoio uma base de conhecimento previamente estabelecida (GUYON, 1991). Esta fase é normalmente aplicada após uma fase de segmentação e parametrização da imagem. A fase de parametrização identifica e calcula parâmetros dos objetos segmentados. Um exemplo de parâmetros pertinentes a um objeto é o seu perímetro ou sua área (RASURE et al., 1990).

Crescimento de região – aplicável em imagens binárias, o algoritmo da segmentação usa a técnica de crescimento da região. Inicia-se escolhendo um *pixel* arbitrário, chamado de *pixel* semente e compara todos os seus *pixels* vizinhos, um a um, agrupando-os de acordo com determinada similaridade, formando uma região crescente. Quando o processo de crescimento da região se estabiliza, pode-se escolher outro *pixel* semente e o processo se repete até obter a segmentação de um ou mais objetos de interesse.

Perseguição de contornos – bordas em imagens são mudanças acentuadas entre valores de níveis de cinza entre duas regiões relativamente uniformes, ou seja, podem ser consideradas bordas as regiões entre dois objetos distintos. Quando os *pixels* das bordas são ligados delimitando um objeto, forma-se o chamado contorno do objeto (JAIN; KASTURI & SCHUNCK, 1995). Existem diversas técnicas para extração de contornos. Uma dessas técnicas é o de perseguição de contorno, que consiste em fazer uma varredura dos *pixels* em todas as direções seguindo um único contorno por vez.

### 2.3.8. Reconhecimento e Caracterização

Tem sido dedicado considerável esforço à solução do problema de reconhecimento e caracterização de objetos presentes numa imagem. Até a década de 70, predominou o uso de técnicas ópticas de processamento (CASASANT & PSALTIS, 1976). A partir do início dos anos 80, com os avanços verificados na microeletrônica e no desenvolvimento de arquiteturas paralelas de processamento, as técnicas digitais passaram a ser mais empregadas. Além disso, a necessidade de trabalhar em tempo real, tanto em identificação de sistemas quanto em controle têm levado diversos pesquisadores a estudar os sistemas digitais de imagem e técnicas computacionais inteligentes. Atualmente, o amadurecimento das técnicas computacionais inteligentes, como Sistemas Especialistas, Lógica Nebulosa, Redes Neurais e Algoritmos Genéticos, tem permitido novas abordagens para esse problema, neste sentido, existem diversas pesquisas direcionadas à solução do problema de reconhecimento de imagem e caracterização de objetos.

A seleção dos classificadores que possuem conhecimento e inteligência para associar imagens e padrões são fundamentais. Muitas tarefas de análise de padrões e processamento de imagens são computacionalmente intensas, particularmente para aplicações em tempo real, pois é necessário considerar a velocidade de aproximação para implementação dos algoritmos de processamento.

Em geral, segundo FAGETH; ALLEN & JÄGER (1996), as técnicas de classificação são:

- Memória associativa;
- Sistemas inteligentes;
- Redes neurais;
- Lógica nebulosa.

São usados alguns critérios para selecionar os classificadores em sistemas que trabalham em tempo real:

- Possibilidade de implementação;
- Estabilidade e fidedignidade dos resultados;
- Transparência da evolução dos resultados;
- Habilidade de representar o conhecimento humano no sistema computacional;
- Habilidade de usar a linguagem “natural” para representar o conhecimento;

- Habilidade de estender e/ou modificar o conhecimento representado pelos classificadores;
- Viabilidade de técnicas de otimização.

A seleção dos classificadores é sempre um problema e difere de aplicação para aplicação. A pessoa que o selecionará deve ter em mente, muito bem definido, o objetivo da ação em relação ao que ela deseja da imagem. Por exemplo, saber se deseja classificar padrões que não mostram erros característicos ou que mostram modelos destes erros.

A complexidade do problema de reconhecimento e de classificação de imagens, que dificilmente pode ser abordado em termos algorítmicos, tem tornado o uso das técnicas inteligentes cada vez mais freqüente, especialmente as Redes Neurais Artificiais e a Lógica Nebulosa, já que fazem uso metafórico dos conceitos, princípios e mecanismos fundamentais dos sistemas naturais, procurando capturar, tanto na teoria como na prática, os algoritmos encontrados na natureza.

Modelos Nebulosos (*Fuzzy Models*) (YAGER & FILEV, 1994) e Redes Neurais Artificiais (RNA) (HAYKIN, 1999) são duas classes de modelos não-lineares que nos últimos anos têm sido amplamente usadas em diversos campos da ciência. Isso se deve, principalmente, à estrutura genérica desses modelos, que permite sua aplicação em ampla variedade de problemas. Mais especificamente, os modelos nebulosos e as redes neurais são aproximadores universais (HAYKIN, 1999 e KOSKO 1992), ou seja, são capazes de aproximar com precisão arbitrária qualquer mapeamento contínuo definido sobre um domínio compacto.

A diferença fundamental entre modelos nebulosos e redes neurais está relacionada com a interpretabilidade das estruturas. Segundo CAMPELLO & AMARAL (1999), as redes neurais são modelos classificados como “caixa-preta” devido às dificuldades encontradas em extrair informações e conhecimento a respeito dos sistemas modelados, bem como em inserir nos modelos, informações disponíveis, *a priori*, a respeito desses sistemas. Sob um ponto de vista simplista, as RNA podem ser encaradas como classificadores que recebem estímulos de entrada e geram respostas, de acordo com o conhecimento adquirido no processo de aprendizado. A propriedade mais importante de uma RNA é sua habilidade de aprender a partir de seu ambiente e com isso melhorar seu desempenho ao longo do tempo. Isso é feito por meio de um processo iterativo de ajustes aplicado a seus pesos sinápticos e *thresholds* (*bias*), o treinamento.

Os modelos nebulosos, no entanto, são constituídos a partir de conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*) (ZADEH, 1965) aos quais são atribuídos rótulos lingüísticos. Esses rótulos são geralmente relacionados por meio de regras “SE-ENTÃO” nebulosas, que determinam os mapeamentos entre entradas e saídas dos modelos. Esse tipo de regra torna os modelos transparentes, isto é,

semanticamente claros, permitindo a inserção e extração de conhecimento a respeito dos sistemas que se deseja modelar.

Optou-se por usar, neste trabalho, a técnica de redes neurais, mais precisamente dos Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen (KOHONEN, 2001), para identificação de imagens. Os motivos que levaram a essa escolha foram:

- Bom desempenho na solução de problemas – usada em reconhecimento e processamento de imagens (visão de máquinas, transmissão de imagens, imagens médicas e sensoriamento remoto), identificação de sistemas, controle de processos, estudos de sinais acústicos, etc;
- Podem ser usados atributos binários indicando ausência ou presença de certas características ou até mesmo cor (branco e preto) (KOHONEN, 2001);
- Desnecessário o pré-processamento de dados (KOHONEN, 2001);
- Capacidade de adaptação – uma RNA é treinada para atuar em um determinado ambiente e pode ser facilmente adaptada para abranger mudanças ocorridas nesse ambiente;
- Suposição inicial desnecessária – dispensa a necessidade de regressões estatísticas para encontrar parâmetros de um suposto modelo de comportamento. A suposição do modelo fica a cargo das conexões e neurônios da RNA;
- Algoritmo muito robusto comparado a outros modelos neurais (KOHONEN, 2001);
- Tolerância a falhas – capacidade de funcionar mesmo que alguns neurônios ou conexões sejam perdidos e/ou danificados;
- Com o avanço em tecnologias de *hardware*, existem componentes com funções voltadas a sistemas com implementações para redes neurais, o que traz velocidade adicional à computação neural.

Desde o seu surgimento, em 1982, o Mapa Auto-Organizável vem sendo aplicado numa ampla variedade de problemas de engenharia, medicina etc. Destacam-se as potencialidades de visualização de dados multivariados, análise de agrupamentos, mineração de dados, descoberta de conhecimento e compressão de dados (KOHONEN, 2001). Na área de imagens, SUKHASWAMI & PUJARI (1996) propuseram um método para restaurar geometricamente imagens com defeitos ou aberrações e BANARSE; FRANCE & DULLER (2000) investigaram o uso desses modelos neurais em problemas de classificação de imagens e reconhecimento de caligrafias. COPPINI; DICIOTTI & VALLI (2003) trabalharam com *pixels* de imagens médicas armazenadas para confrontar com novas imagens usando redes auto-organizáveis.

Ainda, foram investigados modelos com arquitetura paralela visando aplicações em tempo real como MAILACHALAM & SRIKANTHAN (2002) com aplicações em processamento de vídeo e SRIVASTAVA; SINGH & SHARMA (2003) que estimaram o grau de insegurança em sistemas de gestão de energia.

O grande número de artigos publicados recentemente comprova a importância dessas técnicas em aplicações industriais nas mais diversas áreas.

Uma breve descrição sobre RNA pode ser encontrada no Apêndice I. A seguir, encontra-se uma revisão bibliográfica sobre definições e aplicações de sistemas ópticos interferométricos, conceitos de interferometria, bem como informações a respeito de medição de planicidade por meio do interferômetro de Fizeau.

## **2.4. Métodos Ópticos Aplicados a Reconhecimento de Imagens**

Neste trabalho de pesquisa serão usadas imagens obtidas a partir de métodos ópticos, como difração, espalhamento de luz, interferometria, holografia etc. De modo a caracterizar tais imagens, isto é, fazer o reconhecimento, são usadas técnicas inteligentes como redes neurais, lógica nebulosa e algoritmos genéticos. Os métodos ópticos fazem uso do comprimento de onda de luz, cujo padrão de medida é um dos mais estáveis que existem (SLOCUM, 1992). Por este motivo, os sistemas ópticos em metrologia e em sistemas de posicionamento de ultraprecisão têm muita relevância.

Quando se trata de análise durante a usinagem, existem alguns trabalhos que fazem uso de interferômetros, a fim de verificar a forma e a superfície da peça, como por exemplo, NOMURA et al. (1992). Entretanto, tais trabalhos estão relacionados somente com a análise automática de franjas. Não existe tratamento especial das imagens, tampouco o uso de técnicas inteligentes para controlar ou identificar a posição da superfície da peça.

A proposta deste trabalho está relacionada com o processamento das imagens interferométricas (interferômetro LASER de Fizeau) obtidas, que indicam posição e forma, e a identificação por meio de redes neurais artificiais.

A fim de entender os motivos que levaram à escolha do sistema proposto, bem como o princípio de funcionamento do interferômetro de Fizeau e a captura das franjas interferométricas, são apresentados a seguir, métodos ópticos e conceitos sobre interferometria.

### 2.4.1. Métodos Ópticos

Técnicas ópticas são aplicadas em diversos campos da pesquisa (SCRUBY & DRAIN, 1990, MONCHALIN, 1986 e PAPOULIS, 1968) e da engenharia de precisão (WILLIAMS, 1993). Elas são usadas em medições de deslocamento, deformação, planicidade, esfericidade, rugosidade, vibração, visualização de campo acústico, comportamento mecânico e deficiência em MEMS (VAN SPENGEN; PUERS; MERTENS & DE WOLF, 2004). Além dessas aplicações e tantas outras não citadas, pode-se referir ao uso de técnicas ópticas aplicadas no controle de posicionamento *in-process* em máquinas-ferramenta (KOHNO, 1996).

A luz como meio de medição proporciona uma série de vantagens. A total ausência de contato entre o mensurado e o sistema de medição resulta em uma técnica de medição não invasiva, em que não ocorrem perturbações no mensurando provocadas pela presença do sistema de medição. Outro aspecto positivo é a velocidade de medição que, literalmente, ocorre na “velocidade da luz”, tornando possível medições extremamente rápidas e, também, a medição de peças em movimento. Os excelentes níveis de incerteza presentes, principalmente nos métodos interferométricos, produzem resultados excepcionais do ponto de vista metrológico (ALBERTAZZI; SOUSA & PEZZOTA, 2004).

Os métodos ópticos de medição podem ser técnicas interferométricas ou não-interferométricas. As técnicas interferométricas baseiam-se na medição da fase do padrão de interferência da onda de luz LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) (SCRUBY & DRAIN, 1990) e as técnicas não-interferométricas baseiam-se na medição de deslocamento e variação da intensidade da luz refletida pela superfície analisada (SCRUBY & DRAIN, 1990).

### 2.4.2. Interferometria

A interferometria tem como base o princípio físico da interferência, isto é, a superposição de ondas de luz de comprimentos e amplitudes idênticos. Duas ondas de mesma fase são somadas, gerando a interferência máxima. O interferômetro (instrumento de medição que usa o princípio da interferência) divide um feixe de luz coerente em dois, formando um feixe de referência e outro em feixe de teste. O norte-americano Albert A. Michelson (1852 – 1931) foi o primeiro físico a introduzir a interferometria como ferramenta de medida, sua idéia de dividir um feixe de luz em um feixe de referência e outro de medição é usada nos modernos interferômetros a LASER (DUDUCH, 1993). No Apêndice II encontra-se o desenvolvimento

matemático do fenômeno de interferência baseado no princípio de funcionamento do *interferômetro de Michelson*.

Os sistemas interferométricos LASER não apresentam muitas facilidades em relação à instalação do equipamento, mas sua construção modular o torna adaptável em muitos testes. Devido à facilidade de manuseá-lo e a poderosa capacidade de analisar franjas interferométricas, ele é essencial em testes *in-process* e testes de qualidade de produto (KAROW, 1993).

### 2.4.3. Interferômetro de Fizeau

O interferômetro óptico de Fizeau é tipicamente usado para medir planicidade de superfícies reflexivas ou semi-reflexivas (RASTOGI, 1997 e KAROW, 1993). Esta técnica não é usada somente na medição de deslocamentos pela contagem de franjas de um interferograma, mas também, vale-se da análise do perfil (visualmente) ou por computador. A FIGURA 2.9 mostra um esquema do interferômetro de Fizeau.

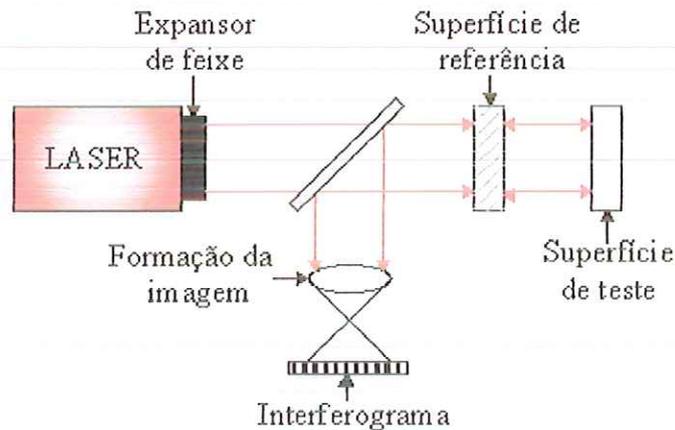


FIGURA 2.9 – Interferômetro de Fizeau (SLOCUM, 1992).

O interferômetro de Fizeau possui arquitetura simples embora permita efeitos diferentes (devido à refração do ar). Ele pode ser aplicado para monitoramento do movimento da peça, isto é, o número e orientação das franjas mostram a magnitude e a direção da inclinação da superfície, assim como o desalinhamento entre eixos é observado pela mudança da direção das franjas. Ele também pode ser usado para monitorar a posição da ferramenta em máquinas-ferramenta (GEE; MCCANDLISH & PUTTICK, 1989).

Quando a superfície em teste está perfeitamente plana e paralela com o plano óptico, os dois feixes de luz são perfeitamente superpostos, resultando em um padrão de interferência de intensidade uniforme, ou seja, não são observadas franjas. Se a superfície está plana, porém ligeiramente inclinada em relação ao plano óptico, são observadas uma família de franjas (FIGURA 2.10). Os espaçamentos das franjas são proporcionais à inclinação da superfície em relação ao plano óptico e a mudança de direção de acordo com a posição angular, dando a impressão que as franjas se movimentam (DUDUCH, 1993).

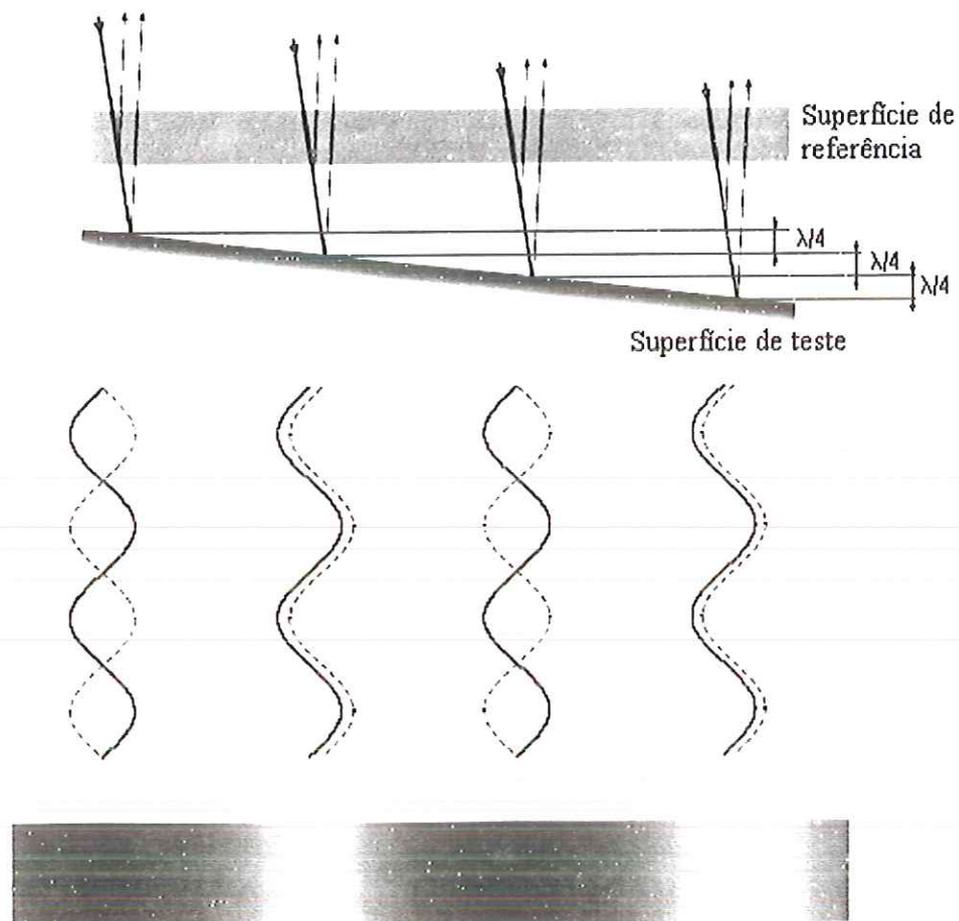


FIGURA 2.10 – Formação de franjas no interferômetro de Fizeau.

Na FIGURA 2.10 as duas superfícies (teste e referência) são ajustadas uma em relação à outra, havendo uma distância entre elas. A luz incide no plano e é parcialmente refletida, originando as franjas interferométricas. Verifica-se que no ápice da cunha, onde a diferença de trajetória é nula, ocorre interferência destrutiva, isto é, extinção completa, se a amplitude da onda de referência é igual a da onda que volta da superfície de teste. Isso ocorre porque os dois raios são interferentes, isto é, o raio refletido da película para o ar sofre uma inversão de fase e o

outro raio, não. No ápice, a borda da franja é escura. A uma certa distância do ápice, tal que a espessura da película seja  $\lambda/4$ , haverá brilho. Onde a espessura for igual a  $\lambda/2$  será escuro, e assim por diante.

O interferômetro de Fizeau é mais usado para verificar os seguintes itens:

- Medir a planicidade de superfícies reflexivas, tais como vidros polidos, quartzo, semicondutores, metais, superfícies com acabamento de precisão;
- Medir o paralelismo de planos polidos;
- Determinar o alcance óptico de placas e prismas;
- Examinar a qualidade da superfície óptica;
- Verificar se a superfície é côncava ou convexa.

Como neste trabalho o interferômetro é usado para medir planicidade e posicionamento angular, cabe explicar como é o princípio de funcionamento para este caso. Também são feitas algumas notações a respeito do uso do interferômetro de Fizeau no alinhamento de peças no eixo-árvore durante a usinagem.

#### 2.4.3.1. Medição de Planicidade

Quando um interferômetro mede a forma de uma superfície, um conjunto de lentes expande o feixe LASER, o suficiente para iluminar, imediatamente, toda a superfície. Quando mede a planicidade de uma superfície, o número de franjas resultantes está intrinsecamente ligado à inclinação da superfície de teste com relação à superfície de referência. No entanto, a formação de franjas acontece de maneira suave, isto é, existe uma transição gradual do claro para escuro, de acordo com a diferença de caminho óptico, como pode ser observado na FIGURA 2.11.

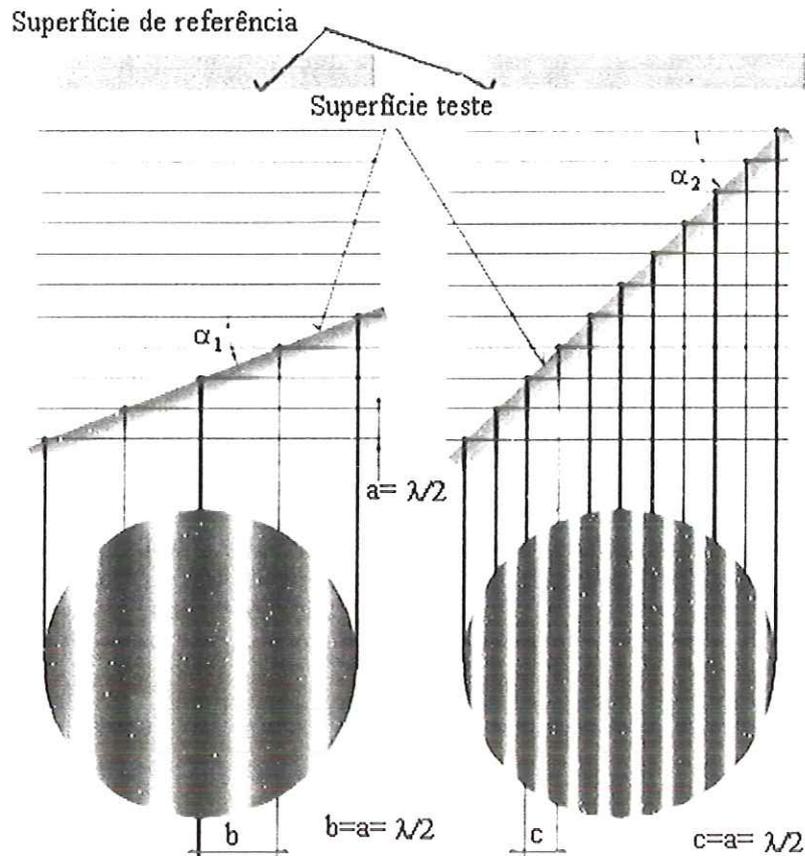


FIGURA 2.11 – Influência da inclinação da superfície de teste na formação de franjas.

Uma franja de interferência interconecta pontos da superfície de teste a igual distância da superfície de referência. A diferença de altura da franja seguinte é  $\frac{\lambda}{2}$  (mais o caminho de volta, torna-se  $2\frac{\lambda}{2}$ ). A distância entre as franjas varia em função do ajuste do ângulo entre a superfície de referência e a superfície de teste. Ainda analisando a FIGURA 2.11, nota-se que quanto mais inclinada estiver a superfície de teste, maior será o número de franjas, então se pode afirmar que a distância entre as franjas está relacionada com o ângulo de inclinação da superfície de referência e superfície de teste.

Quando há alto índice de reflexão sobre a superfície a ser medida é necessário colocar um atenuador entre a superfície de teste e a superfície a ser analisada. O uso de atenuador também é recomendável para análises automáticas de franjas.

O interferômetro de Fizeau também pode ser usado no *set-up* e calibração de máquinas de precisão, como também, no controle de processos (DUDUCH, 1993), isto é, auxilia no monitoramento da geometria de superfícies de peças e desalinhamento entre eixos, no caso de torneamento, entre o eixo-árvore e a peça a ser usinada. Para isso, o eixo óptico do interferômetro de Fizeau deve ser montado alinhado, coaxialmente, com o eixo-árvore da

máquina; e a peça a ser usinada dever estar, também, alinhada (com o eixo-árvore e eixo óptico).

Quando o eixo óptico não está perfeitamente alinhado com o eixo-árvore, é obtido um interferograma com uma série de franjas retilíneas e paralelas, igualmente espaçadas. Segundo DUDUCH (1993), esses padrões de franjas (retilíneas, paralelas e igualmente espaçadas) são independentes da posição angular do eixo-árvore. Neste mesmo trabalho pode ser encontrado um estudo completo a respeito do número e orientação de franjas interferométricas em relação à posição do carro porta-ferramenta num torno vertical de ultraprecisão. A FIGURA 2.12 mostra alguns padrões de franjas originados da rotação de peças planas. Por meio da FIGURA 2.12(a) verifica-se que não existem franjas quando o eixo-árvore, a peça (plana) sobre o eixo-árvore e o eixo óptico estão perfeitamente alinhados. Contudo, se há desalinhamento entre o eixo-árvore e o eixo óptico, há o aparecimento de franjas com as mesmas características (espaçamento, orientação e tipo) e, pode ser que elas apareçam rotacionadas como mostra a FIGURA 2.12(b), (c) e (d). Isso significa que o número e orientação das franjas mostram a magnitude e direção da inclinação da superfície a ser usinada. O desalinhamento entre eixos é observado pela mudança de direção (rotação) das franjas (MIZUNO, 1993).

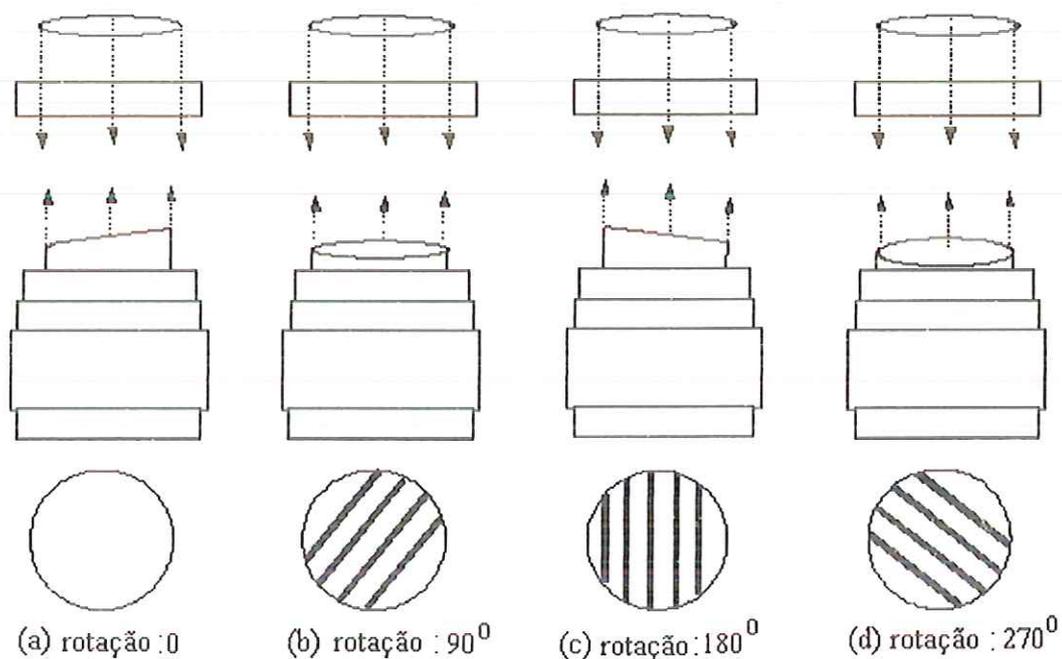


FIGURA 2.12 – Padrões de franjas para rotação de peças planas.

Dentro desse contexto, NOMURA et al. (1992) fizeram um arranjo experimental que consistia numa máquina-ferramenta de precisão da Boley®, Alemanha, e um interferômetro de

Fizeau, com o intuito de medir a forma da peça durante o processo de usinagem. A máquina-ferramenta e o interferômetro foram colocados numa mesma base, com o eixo óptico do interferômetro alinhado com o eixo-árvore da máquina, como mostra a FIGURA 2.13. Por meio deste experimento, pôde-se constatar que os padrões de franjas interferométricas não dependem da mudança de rotação do eixo-árvore da máquina.

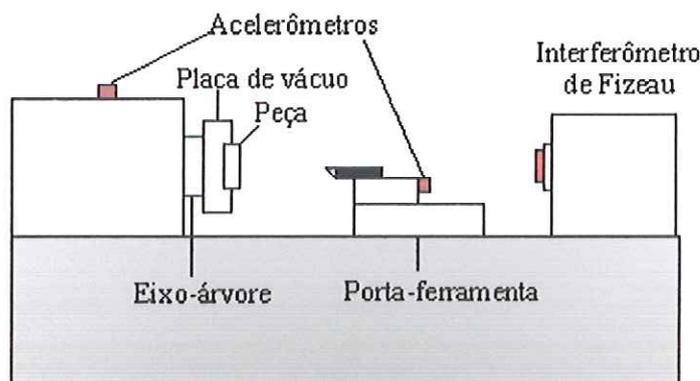


FIGURA 2.13 – Interferômetro de Fizeau numa máquina-ferramenta de ultraprecisão (NOMURA et al., 1992).

O principal obstáculo para obtenção de medidas em movimento é a vibração da estrutura, cujas conseqüências são confundir ou distorcer os padrões de franjas obtidos. Mas se for um movimento periódico, como em muitas estruturas inteligentes, basta sincronizar o sinal emitido (LASER) com o sinal do movimento. Podem ser feitas várias medidas como amplitude, fase e freqüência de diversos sinais obtidos permitindo a descrição de toda a ação do movimento tanto de atuação quanto de deformação (ZECCHINO, NOVAK & SCHMIT, 2003).

#### 2.4.4. Processamento Digital de Padrões de Franjas

Técnicas para a análise de padrões de franjas são tão antigas quanto os métodos interferométricos, mas até os anos 80 as rotinas para análise de padrões de franjas para testes ópticos, análise de tensão experimental e teste não-destrutivos eram feitos manualmente. No entanto, atualmente, existem vários métodos computacionais para análise de padrões de franjas. Esses métodos são extremamente necessários para o rápido processamento da informação, bem como ajuda na redução do trabalho do responsável pela análise das superfícies.

A inserção do processamento digital de imagens nas técnicas ópticas de medição provocou uma revolução na metrologia óptica. O conceito de que para medir usando uma técnica óptica é necessário confiar nos aspectos subjetivos da avaliação de um operador treinado, freqüentemente submetido à fadiga visual por fixar-se muito tempo na imagem de uma ocular, faz parte do passado. Atualmente, a ação de um operador de um sistema óptico de medição limita-se a apertar um botão e aguardar alguns segundos para receber um relatório de medição que aponta quais parâmetros estão dentro das especificações e oferece gráficos tridimensionais que revelam, com grande riqueza de detalhes, características da peça medida (HUNTLEY, 2000).

Antes do desenvolvimento da técnica da medida de fase (PMI, do inglês *Phase Measure Interferometry*), cuja característica principal consiste em analisar franjas por meio de computador e eliminar as ambigüidades de interpretação e medir com exatidão pequenas variações na altura superficial, técnicas baseadas na intensidade eram as únicas ferramentas do processamento de imagens disponíveis para a análise automática de franjas dos interferogramas (YATAGAI, 1993). Tais interferogramas são resultados de uma varredura de posição, detectadas por uma câmera CCD, e processadas em computadores digitais, a fim de obter um mapeamento da superfície com resolução nanométrica (KOHNO, 1996). Esta classe de técnicas constitui um elemento vital quando se trata de análise de franjas. Métodos de intensidade são, algumas vezes, a única técnica viável na análise de franjas para interferogramas que tenham sido resgatados de registros fotográficos de experiências anteriores ou que tenham sido obtidos de interferômetros no qual é impossível ou impraticável produzir técnicas de medidas de fase, por exemplo, em alguns hologramas de tempo médio e interferogramas de granulados ópticos (*speckles*) (MELÃO, 1998). Há também alguns exemplos importantes de sistemas de análise de franjas onde a repetitividade natural da medida significa que um simples método baseado na intensidade seja suficiente para realizar a análise.

Os padrões de franjas gerados por técnicas interferométricas têm sido usados extensivamente em vários campos de medidas ópticas. Os procedimentos de análise de franjas incluem detecção do pico da franja e determinação da ordem da franja que são tediosos e consomem tempo. Pesquisas em análise de franjas automática e a técnica de medida de fase são importantes em aplicações práticas das técnicas interferométricas.

O princípio básico de métodos em metrologia consiste da iluminação do objeto pela projeção de padrões de franjas sobre a superfície de teste ou pela superposição (interferência) de campos de luz representando diferentes estados do objeto (franjas). As quantidades de interesse: coordenadas, deslocamentos, índice de refração e outros parâmetros são codificados na escala do período da franja. A técnica de análise automática de franjas tem-se tornado muito usual em muitas aplicações industriais e em metrologia óptica. Para extrair informações das imagens dos

interferogramas com alta resolução são usadas placas de memórias e detectores de imagens juntamente com microprocessadores e computadores.

Para se ter total vantagem da precisão disponível num teste interferométrico, interferogramas devem ser analisados por um computador. O maior problema é resgatar os dados de um interferograma dentro do computador sem perder a precisão contida nele (BRUNING, 1978).

Na década de 60, técnicas usando comparadores ópticos foram desenvolvidas para medida da posição do centro de franjas interferométricas que eram enviadas para análise computacional. Na década de 70, técnicas velozes de gráficos e sistemas de vídeos conectados a computadores foram desenvolvidas para determinar o centro das franjas.

Infelizmente, há três graves problemas com essas técnicas de digitalização de franjas. Primeiro, a precisão da posição de medida do centro das franjas é geralmente menor que a desejada. Geralmente, um erro da ordem de grandeza de  $\frac{1}{10}$  da franja está presente na medida do centro da franja, onde o interferômetro deveria ter uma precisão uma ordem de magnitude maior. Segundo, na maioria dos casos, os dados não são suficientes para obtenção do centro das franjas. De fato, para aumentar a densidade dos dados, mais franjas podem ser geradas introduzindo uma deflexão no interferograma, embora obtenham mais pontos, a precisão é reduzida por causa da incapacidade de medir a localização dos centros das franjas. Terceiro, na maioria das aplicações, é desejável analisar dados das franjas numa grade quadrada uniforme. Com dados obtidos somente na localização dos centros das franjas, é necessário usar algumas formas de interpolação para obter uma grade quadrada de pontos dos dados do centro das franjas. Na verdade, o processo de interpolação pode introduzir erros nos resultados.

Deve-se ressaltar, no entanto, que todos os métodos computacionais existentes para análise automática de franjas, têm como base matemática, muitos cálculos, que serão apresentados a seguir, levando em consideração todos os parâmetros ópticos necessários para uma boa avaliação dos resultados obtidos (franjas interferométricas).

#### **2.4.5. Análise de Franjas**

É sabido que a característica principal de sistemas interferométricos é produzir franjas interferométricas em suas saídas. As franjas geralmente podem ser fotodetectadas e eletronicamente contadas ou interpoladas (ROAD, 1984).

A interpretação dos padrões de franjas resultantes de medidas interferométricas nem sempre é fácil e às vezes leva a resultados divergentes. Uma análise de padrões básicos de franjas pode ser extremamente esclarecedora.

Se a superfície for plana, o padrão de interferência é constituído por franjas retilíneas e igualmente espaçadas como mostra a FIGURA 2.14.

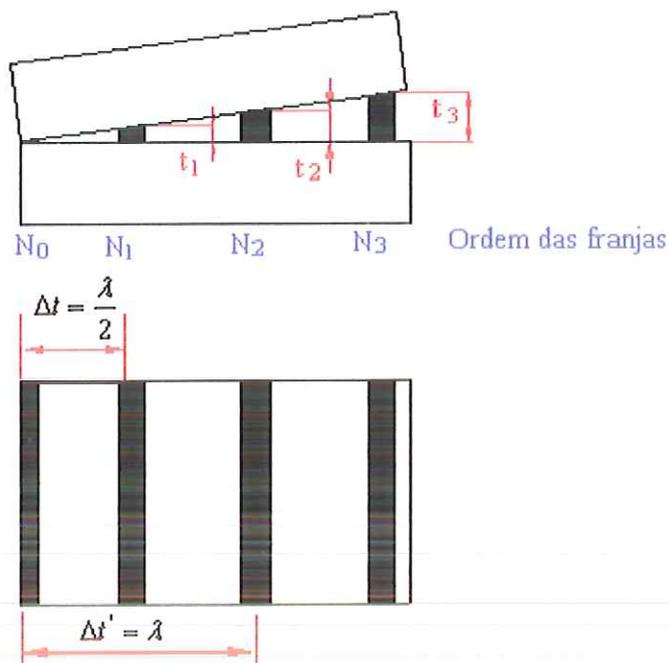


FIGURA 2.14 – Franjas retilíneas.

As franjas escuras são formadas quando a diferença do caminho óptico ( $OPD = 2t_N$ ), é (FIGURA 2.14):

$$t_N = \frac{N(\lambda)}{2} \quad (2.1)$$

Onde  $N = 0, 1, 2, 3, \dots$  e  $N$  é a ordem das franjas, que é sempre um número inteiro positivo. Analisando a FIGURA 2.14 e a eq. (2.1) pode-se chegar às seguintes conclusões (eq. (2.2. e (2.3))):

$$\Delta t = t_1 - t_0 = (1)\left(\frac{\lambda}{2}\right) - (0)\left(\frac{\lambda}{2}\right) = \frac{\lambda}{2} \quad (2.2)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = (2)\left(\frac{\lambda}{2}\right) - (1)\left(\frac{\lambda}{2}\right) = \lambda \quad (2.3)$$

Isto é, a distância entre duas franjas escuras é  $\frac{\lambda}{2}$  e a diferença entre quaisquer duas franjas adjacentes é  $\lambda$ . Estas informações são fundamentais para análises de franjas.

Franjas claras são formadas quando a diferença do caminho óptico ( $OPD = 2t_N$ ), é (FIGURA 2.14) e podem ser determinadas pela eq. (2.4):

$$t_N = N\left(\frac{\lambda}{4}\right) \quad (2.4)$$

Onde  $N = 0, 1, 2, 3, \dots$  é a ordem das franjas claras, que é sempre um número inteiro ímpar. As equações para análise de franjas claras são iguais às equações para a análise de franjas escuras (eq. (2.1)). No entanto, elas são válidas somente para o ângulo de incidência normal ou próximo da normal.

Se o ângulo de incidência for inclinado em relação a normal, a relação como mostrada pela eq. (2.5) pode ser aplicada (SMITH, 1974 apud KAROW 1993):

$$OPD = 2nt \cos \alpha \quad (2.5)$$

Onde:

$n$  = índice de refração do ar ( $n = 1$ );

$t$  = espessura física do filme de ar;

$\alpha$  = ângulo de incidência com relação a normal

Quando a superfície é levemente convexa, forma-se uma película delgada de ar entre as superfícies, originando franjas circulares. O número de franjas é também conhecido como o

número de anéis (ver ISO 10110-5<sup>\*</sup>). O desenvolvimento dessas franjas é graficamente representado pela FIGURA 2.15.

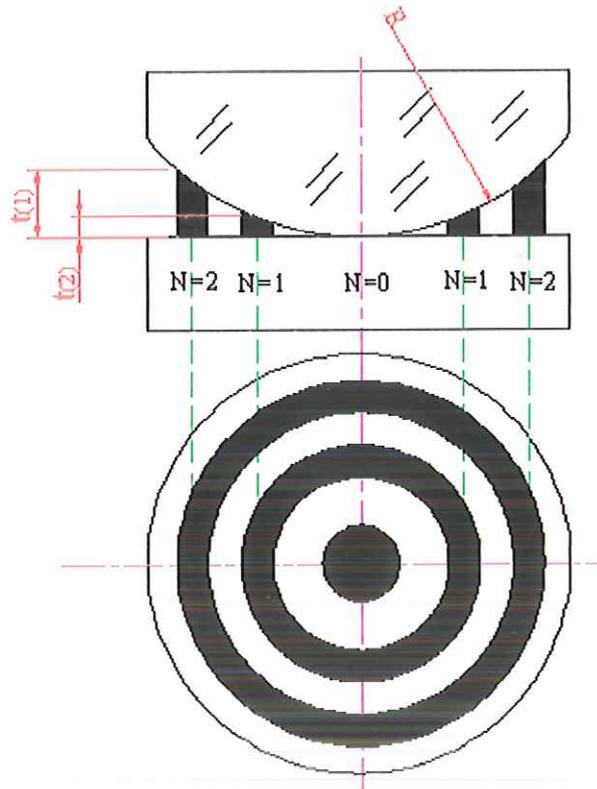


FIGURA 2.15 – Franjas circulares.

Como pode ser visto na FIGURA 2.15, a espessura é muito pequena na superfície de contato, aumentando gradualmente em direção à borda. Os lugares geométricos dos pontos de igual espessura são círculos concêntricos ao ponto de contato (SEARS & ZEMANSKY, 1977).

A relação geométrica pode ser matematicamente desenvolvida usando o raio de curvatura aproximado  $\left(s = \frac{d^2}{8R}\right)$ , chegando na eq. (2.6).

$$t_N = \frac{(D_N)^2}{8R} \quad (2.6)$$

<sup>\*</sup>ISO 10110-5 – Norma sobre óptica e instrumentos ópticos – preparação de desenhos para elementos e sistemas ópticos. Parte 5: fornece regras para indicação de tolerâncias de forma da superfície.

Onde  $D$  é o diâmetro da franja e  $R$  é o raio de curvatura da superfície esférica. Isto somente é verdade para superfícies levemente esféricas que são testadas em relação a uma superfície de teste plana. Existem outras equações para condições onde a superfície esférica é colocada contra uma outra superfície esférica que tenha raio de curvatura diferente daquela que será testada.

De acordo com as eq. (2.1) (franjas escuras) e eq. (2.6) (franjas circulares), resulta uma outra relação para franjas escuras (eq. (2.7)), que permite o cálculo para todos os parâmetros ópticos.

$$N\left(\frac{\lambda}{2}\right) = \frac{(D_N)^2}{8R} \quad (2.7)$$

Resolvendo a eq. (2.7), em função de seus componentes, obtêm-se três equações muito usadas (eq. (2.8), (2.9) e (2.10)):

$$\text{Diâmetro de franjas de ordem } N: D_N = \frac{2}{N\lambda R} \quad (2.8)$$

$$\text{Raio de curvatura: } R = \frac{(D_N)^2}{4N\lambda} \quad (2.9)$$

$$\text{Número de franjas: } N = \frac{(D_N)^2}{4R\lambda} \quad (2.10)$$

Muitas vezes, as franjas não aparecem nem de forma retilínea, nem perfeitamente circulares, tampouco concêntricas. As irregularidades superficiais são os motivos que levam ao aparecimento dessas formas diferentes.

As irregularidades superficiais estão mais relacionadas à formação da imagem que aos desvios de curvatura. Existem muitos tipos de irregularidades. A FIGURA 2.16 mostra padrões de franjas irregulares.

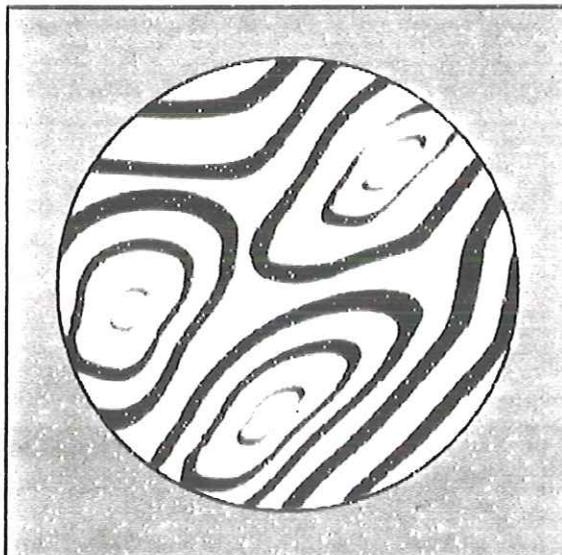


FIGURA 2.16 – Padrão de franjas irregulares.

Eles são facilmente vistos quando a superfície de teste é ligeiramente levantada ou suavemente apertada contra a superfície de referência. Isso causa o movimento das franjas. No entanto, o movimento pode não ser o mesmo para todas as franjas. Com isso, elas podem se sobrepor umas as outras.

Os padrões de franjas circulares, quando sujeitos às irregularidades encontradas com maior frequência, são vistos na FIGURA 2.17. Na FIGURA 2.17(a) os anéis são circulares e concêntricos no centro e podem ser ajustados em suas direções, no entanto, essa avaliação não permite dizer que a superfície seja esférica. Mas pode-se concluir que a superfície é rotacionalmente simétrica. A distância entre anéis é de  $\lambda/2$ , então o desvio de planicidade é de  $N \left[ \frac{\lambda}{2} \right]$ , onde N é o número de anéis. Para favorecer a análise da esfericidade do modelo é necessário incliná-lo. Somente se os anéis permanecerem circulares em quaisquer posições de seus centros, pode-se concluir que a superfície é esférica.

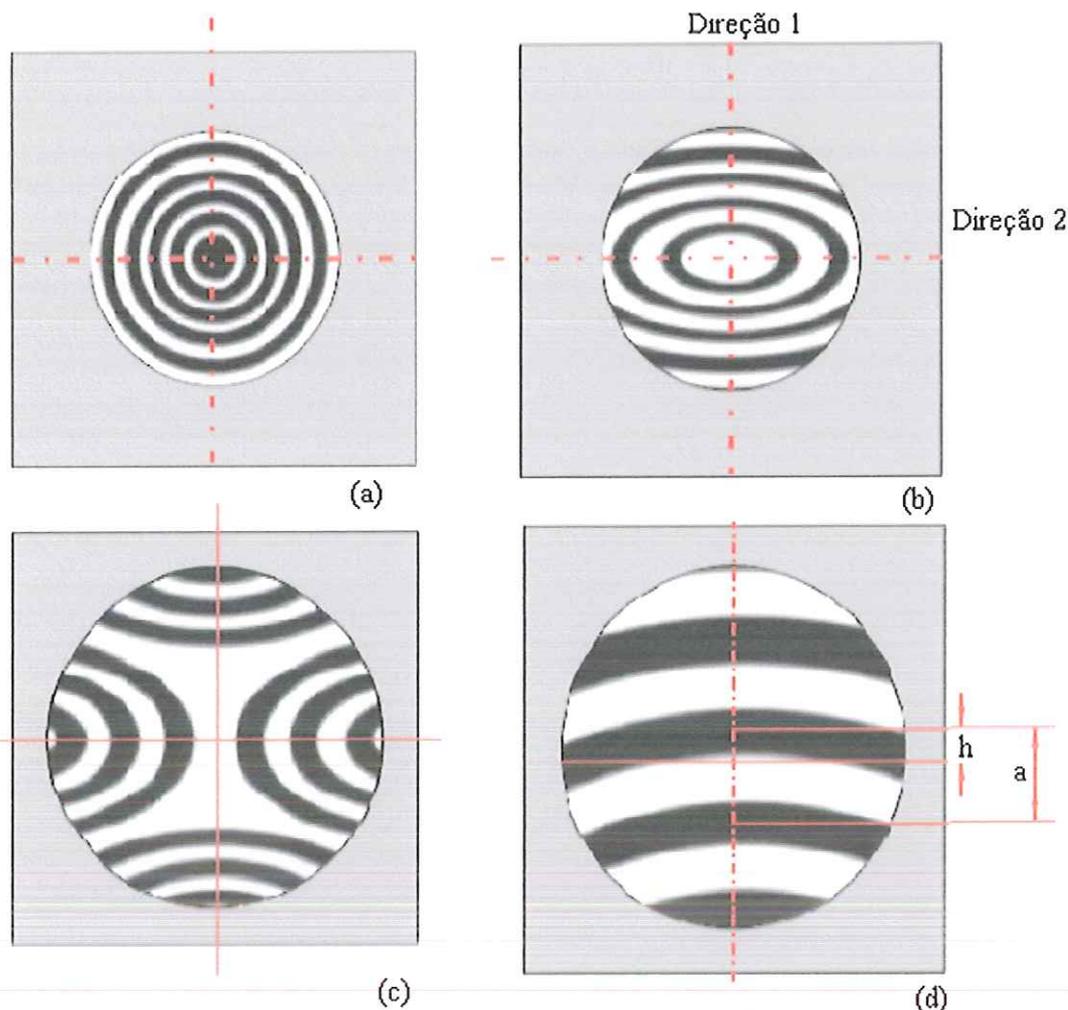


FIGURA 2.17 – Padrões básicos de franjas circulares.

Se as irregularidades forem do tipo oval (FIGURA 2.17(b)) ou do tipo em sela (FIGURA 2.17(c)) o número de anéis (número de franjas) é determinado em duas direções. Uma dessas direções deve ter maior número de franjas.

Com irregularidades do tipo sela é importante notar a inversão do sinal. Quando o modelo é movido em direção ao interferômetro, isto é, por meio de um movimento suave na montagem, algumas franjas se movem voltadas para o centro de curvatura, enquanto outras franjas que estão em outra direção se movem ao contrário.

Se o desvio de planicidade for  $< \lambda/2$ , as franjas não são totalmente fechadas, no entanto, são vistas franjas ligeiramente curvadas (FIGURA 2.17(d)). A técnica usual para especificar o erro de planicidade é determinar a altura  $h$  da franja (FIGURA 2.17(d)) e o espaçamento  $a$  entre franjas. Neste caso, o número de franjas ( $N = h/a$ ), não é um número inteiro. O erro de planicidade é determinado pela eq. (2.11).

$$\Delta p = \frac{1}{2} \frac{h}{a} \lambda \quad (2.11)$$

Onde  $\Delta p$  é o erro de planicidade.

A interpretação dos padrões de franjas resultantes nem sempre é fácil e muitas vezes leva a resultados divergentes. Existem basicamente dois tipos de franjas. As franjas abertas e as franjas fechadas. Pode-se dizer que há franjas regulares e franjas irregulares, estes termos estão intimamente relacionados aos tipos de franjas (KAROW, 1993).

Franjas abertas ocorrem quando a superfície de teste difere da superfície de referência por menos que duas franjas (uma onda). Por isso, essas franjas só podem ser encontradas em superfícies com alta qualidade óptica. A FIGURA 2.18 mostra um exemplo típico.

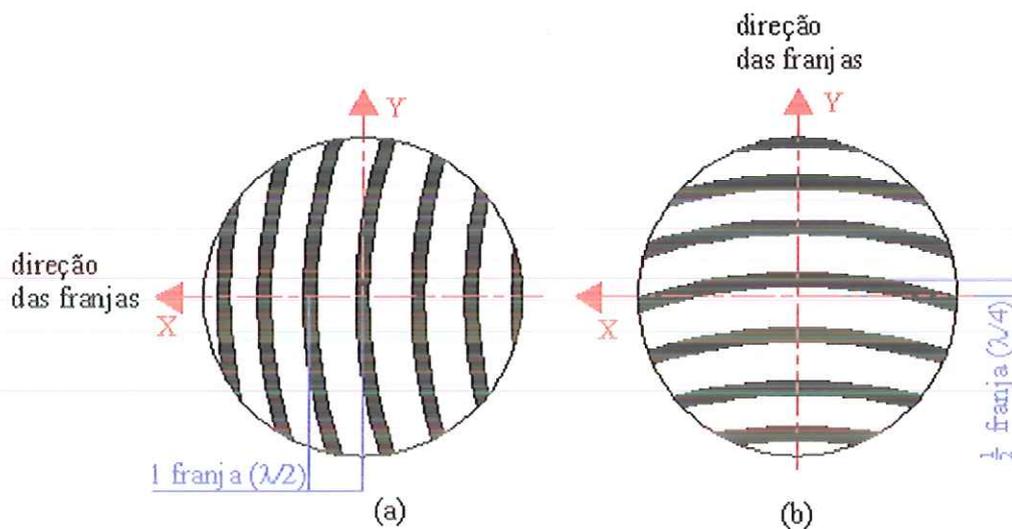


FIGURA 2.18 – Evolução de franjas abertas. (a) Franjas convexas no eixo X; (b)  $\frac{1}{2}$  franja no eixo Y.

A superfície de teste mostra uma franja (FIGURA 2.18(a)) quando as franjas estão orientadas numa direção e quando as franjas são rotacionadas 90 graus (FIGURA 2.18(b)), pode ser vista apenas  $\frac{1}{2}$  franja.

Se o desvio de planicidade for  $> \frac{\lambda}{2}$ , é mais favorável ao estudo, o uso de franjas abertas (FIGURA 2.19), desde que seja fácil a identificação de desvios rotacionais simétricos.

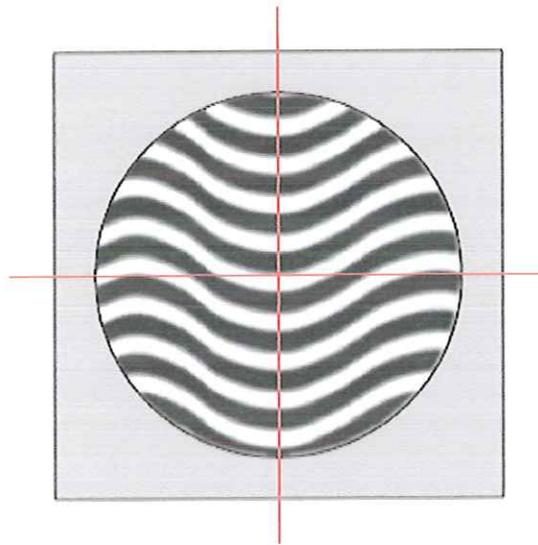


FIGURA 2.19 – Franjas abertas.

A forma da superfície em estudo pode ser determinada pela direção de movimento das franjas, levando em consideração o fato de que as franjas de interferência são curvas de níveis com uma diferença entre elas de  $\lambda/2$  (MÖLLER-WEDEL OPTICAL, 2001). É possível e aceitável que as franjas abertas sejam ajustadas por linhas uniformemente curvilíneas (FIGURA 2.20(a)). O desvio das franjas de interferência deste conjunto de linhas pode ser entendido como uma interferência local. Se o ajuste não for possível, talvez possa ser exequível determinar o desvio de planicidade para uma franja no centro da amostra pela prescrição de uma linha de referência apropriada neste centro, calculando a relação  $h/a$  para vários pontos da franja (FIGURA 2.20(b)).

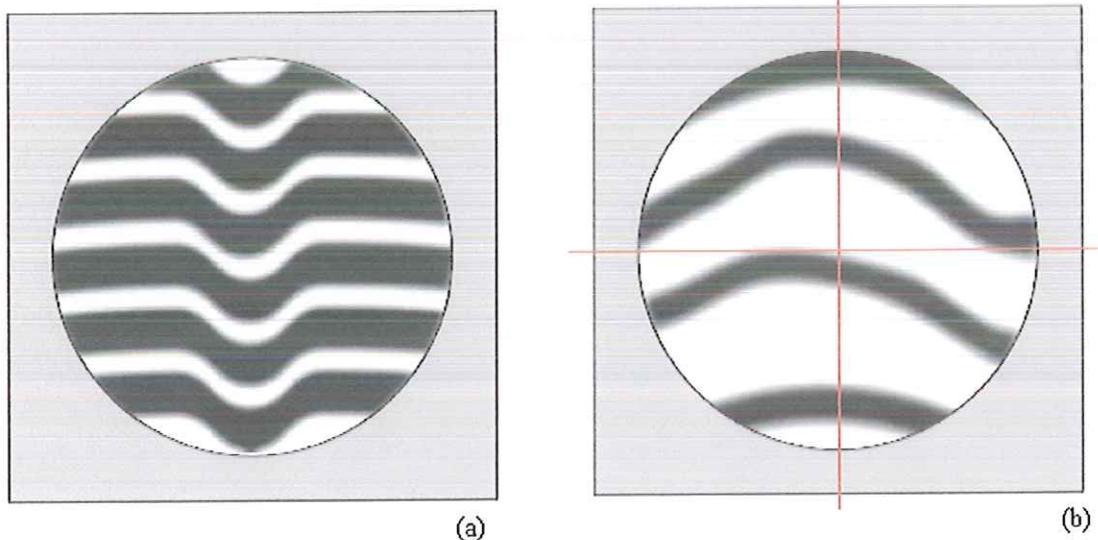


FIGURA 2.20 – Ajuste de franjas.

Se for exigida alta precisão das medidas é aconselhável registrar a forma da superfície em um gráfico, como um diagrama de contorno. A FIGURA 2.21 mostra um caminho para a execução desse trabalho.

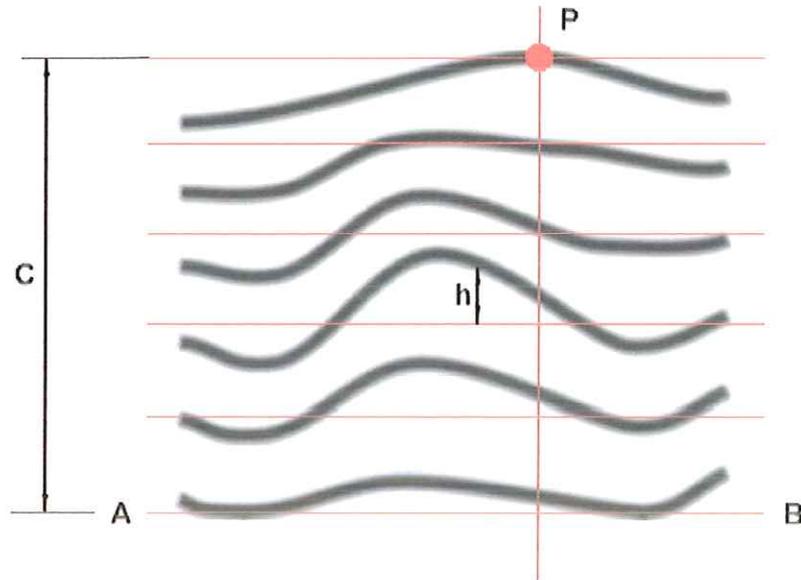


FIGURA 2.21 – Avaliação de padrões de franjas complexos (MÖLLER–WEDEL OPTICAL, 2001).

Inicialmente, é necessário especificar um plano de referência, isto é, traçar uma linha média  $\overline{AB}$  pela última franja (mais baixa) e uma linha paralela a  $\overline{AB}$ , passando pelo ponto  $P$ . O ponto  $P$  é o centro superior da última franja. Em seguida, são traçadas linhas intermediárias, paralelas a  $\overline{AB}$  e distantes  $t = \frac{c}{z}$ , onde  $c$  é a distância entre as linhas exteriores e  $z$  denota o número de intervalos de franjas entre essas linhas. Observando a FIGURA 2.21, por exemplo, verifica-se que  $z$  é igual a cinco. Deste modo, a distância  $t$  corresponde a uma diferença média de altura de  $\frac{\lambda}{2}$  com relação ao plano de referência.

Assim, a eq. (2.12) é usada para determinar o desvio de altura  $\Delta p$  de um ponto da superfície de amostra, quando os padrões de franjas obtidos são complexos.

$$\Delta p = \frac{h}{2t} \lambda \quad (2.12)$$

A direção pela qual as franjas se movem quando uma tensão é aplicada na superfície de teste mostra se esta é côncava ou convexa. Quando as franjas são voltadas na direção de movimento das franjas a superfície é convexa e quando a direção é contrária ao movimento das franjas, a superfície é côncava (KAROW, 1993), como mostra a FIGURA 2.22.

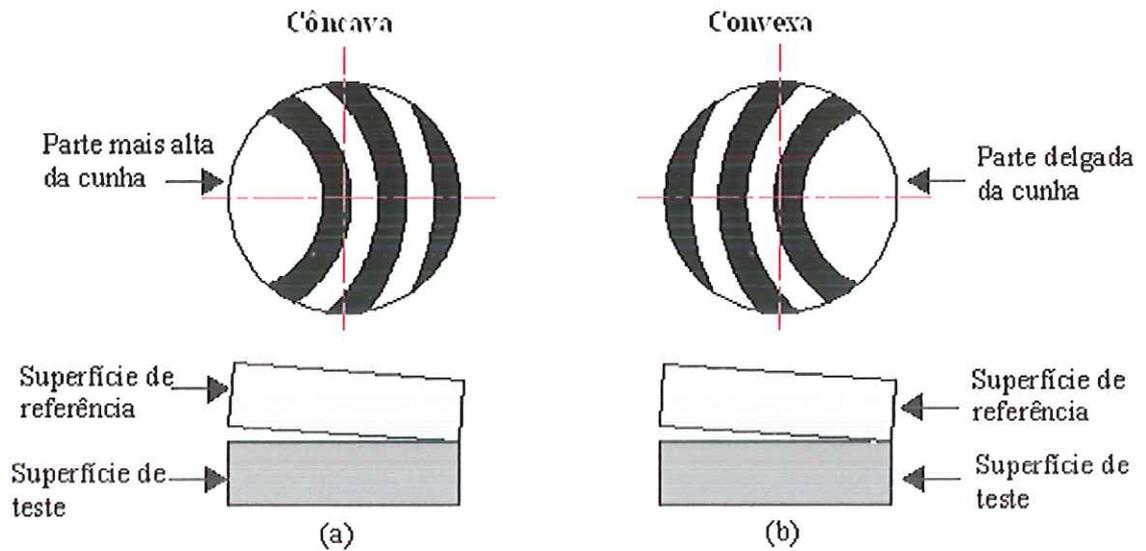


FIGURA 2.22 – Superfícies (a) Côncava e (b) Convexa.

Analisando as franjas interferométricas é possível fazer a medição de planicidade da superfície de teste. No estudo referente ao MAR, trabalha-se com o princípio de medição de planicidade e na determinação de ângulos de inclinação da superfície de teste.

## 2.5. Conclusões Preliminares

O uso de posicionadores em equipamentos de precisão, em particular no posicionamento ferramenta/peça em usinagem de ultraprecisão, se deve principalmente à necessidade de obtenção de rígido controle do perfil a ser usinado. Para chegar ao perfil desejado, os eventuais desvios na posição relativa ferramenta/peça durante a usinagem devem ser, preferencialmente, minimizados e/ou compensados, de forma a se obter sucesso no final do processo.

A técnica de reconhecimento de imagem surge como promissora na área de projeto de ultraprecisão, associando rapidez de processamento à precisão de posicionamento, além da possibilidade de vínculo com técnicas modernas e inteligentes de identificação e controle. Tais técnicas, como redes neurais artificiais apresentam-se como aproximadores universais, capazes

de aproximar com precisão arbitrária qualquer mapeamento contínuo definido sobre um domínio compacto.

O interferômetro de Fizeau pode ser usado como sensor de medição e gerador de imagens, capaz de produzir sinais de entradas referentes à inclinação do sistema analisado. A alternativa do LASER fornece maiores facilidades de montagem, seguindo o princípio de Abbé, além de ter como característica principal, alta resolução ( $31,6 \text{ nm}$ ,  $\lambda/20$  com  $\lambda = 632 \text{ nm}$ ) (WYKO® 6000, 1989), e ainda, apresenta um sistema de medição com estrutura metrológica independente. Esses sinais provenientes do processamento das imagens interferométricas são entradas de um algoritmo baseado em redes neurais artificiais, que por sua vez, pode identificar e/ou controlar sistemas.

Portanto, a associação entre reconhecimento de imagens, redes neurais e uso de métodos ópticos apresenta-se como uma inovação aplicada a projetos de ultraprecisão, em particular, a sistemas de posicionamento de alta precisão.

## Capítulo 3

### METODOLOGIA

#### 3.1. Introdução

Tendo em vista o exposto e revisado nos capítulos anteriores, pode-se agora apresentar e enquadrar a proposta deste trabalho. Sendo que o enfoque principal é o estudo de identificação de posições do sistema microposicionador angular rotativo quando sujeito a movimentos.

Uma avaliação do comportamento estático e dinâmico é extremamente importante em mecanismos que são usados em usinagem de ultraprecisão, pois influenciam diretamente o processo, logo a qualidade da superfície usinada. Por isso, no Capítulo 4, é apresentada uma simulação do sistema, usando elementos finitos. A análise estática mostrará o comportamento da mesa superior, sendo que o objetivo principal é verificar se há formação de um plano quando acionados um ou dois atuadores piezelétricos.

Um dos principais problemas no projeto do MAR é o sistema de fixação. Devem ser feitas adaptações para que ele possa ser fixado à máquina de ultraprecisão ASG-2500 (*Aspheric Surface Generator*), da *Rank Pneumo* (atualmente TAYLOR HOBSON PNEUMO®) do Laboratório de Engenharia de Precisão da EESC-USP e, também, para que as peças a serem usinadas possam ser fixadas no MAR. Tais adaptações podem ser encontradas no Capítulo 4.

Quanto aos testes experimentais, será fundamentado em análise das imagens geradas pelas franjas interferométricas. Por meio destas franjas será possível identificar a posição do MAR. Para tanto, é necessário saber a correspondência entre as imagens geradas e a sua respectiva posição. Essa correspondência foi obtida associando resultados de equações matemáticas às imagens.

### 3.2. Montagem do Sistema para Realização dos Testes

As medidas interferométricas podem ser afetadas por ruídos acústicos e/ou mecânicos. Por isso, o interferômetro de Fizeau usado (WYKO 6000) possui características de *hardware* e *software* que reduzem a sensibilidade a algumas vibrações. Os ruídos mecânicos, usualmente, são transmitidos pela mesa onde o interferômetro está montado, causando vibração nas franjas numa frequência de ordem elevada. A amplitude da vibração depende da intensidade na qual é transmitida ao interferômetro. Por sua vez, os ruídos acústicos são transmitidos pelo ar, causando, algumas vezes, dependendo da frequência, um borrão nas franjas. A amplitude e a duração da vibração dependem do nível e duração do ruído.

A fim de minimizar e/ou eliminar possíveis problemas causados pelas vibrações foram tomados algumas precauções na montagem do interferômetro:

- O interferômetro está sobre uma mesa isolada (possui amortecedores pneumáticos);
- O interferômetro está montado num local distante de máquinas que possam transferir ruídos acústicos que degradam seu desempenho;
- Os cabos elétricos do interferômetro estão isolados;
- O interferômetro está num local que não possui janelas e/ou movimentação de pessoas;
- A temperatura é estável e a umidade é controlada;
- A distância entre o interferômetro e a superfície de teste é pequena (aproximadamente 500 mm). Se a distância fosse grande (maior que 5000 mm), o caminho do LASER deveria ser isolado, com o intuito de minimizar o efeito da turbulência do ar.

A organização da montagem do sistema (MAR mais interferômetro óptico) para realização dos testes ópticos pode ser vista na FIGURA 3.1.

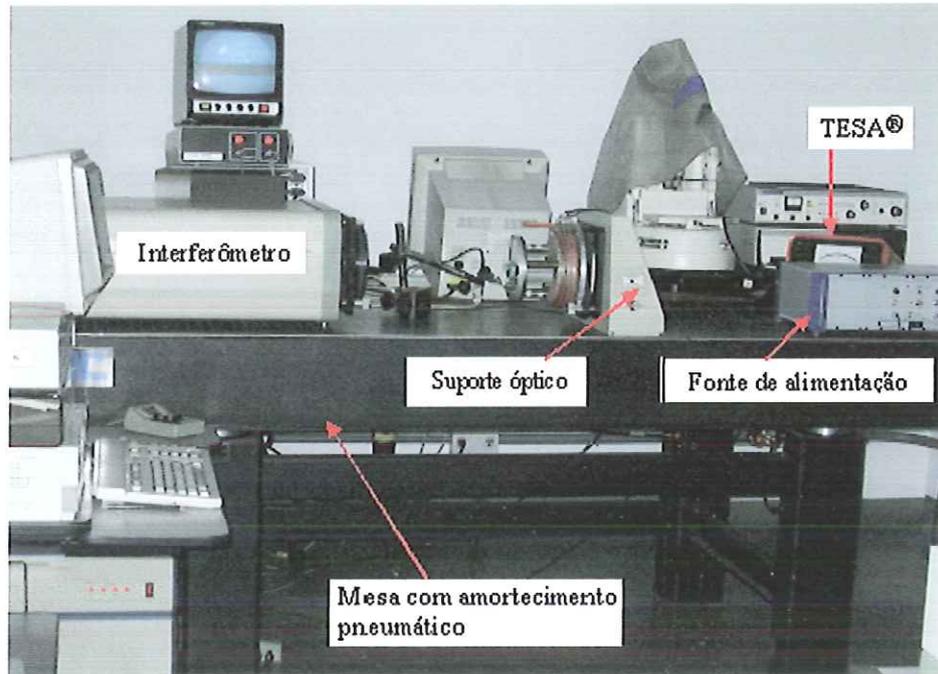


FIGURA 3.1 – Montagem do MAR para os testes com o interferômetro.

Pode-se verificar por meio da FIGURA 3.1 que o MAR foi fixado a um suporte óptico adequado para testes interferométricos. O suporte, por sua vez, foi fixado à mesa que possui amortecimento pneumático, garantindo a estabilidade do MAR e a atenuação de possíveis vibrações.

Antes de iniciar a coleta de dados, por meio do sistema de posicionamento do interferômetro, foi encontrada a posição ideal do MAR, isto é, a posição onde o MAR e o interferômetro de Fizeau estivessem alinhados (FIGURA 3.2).

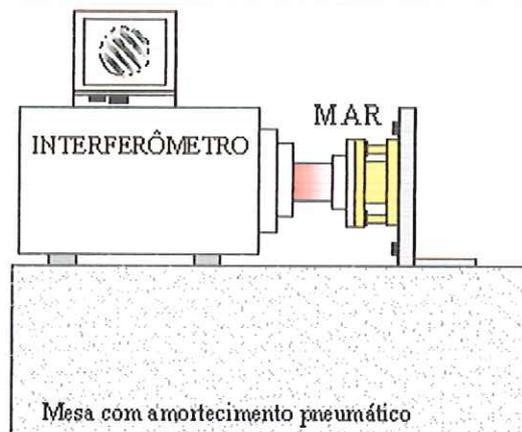


FIGURA 3.2 – Posição inicial do MAR.

O interferômetro possui um sistema de controle remoto que auxilia no alinhamento entre o interferômetro e a superfície de teste. Sendo possível controlar o *zoom*, foco e intensidade do brilho, isto é, ajustar a intensidade do brilho com o mínimo de *pixels* saturados.

A TABELA 3.1 mostra as características do interferômetro de Fizeau usado neste trabalho.

TABELA 3.1 – Características do LASER do interferômetro de Fizeau (WYKO® 6000, 1989).

LASER HeNe	$\lambda = 632 \text{ nm}$
Precisão	$\lambda/100 \text{ rms}$
Repetitividade de pico a vale	$\lambda/100 \text{ nm}$
Resolução	$\lambda/1024 \text{ nm}$
Tempo de aquisição de dados	$< 167 \text{ ms}$
Diâmetro de abertura do feixe de teste	152 mm

O princípio de funcionamento do WYKO 6000 é baseado no princípio da interferometria de mudança de fase. Os dados coletados são limitados pela localização das franjas no momento da interferência. As franjas são produzidas por milhares de pontos, formando uma única imagem.

Para este experimento foi considerado que a parte superior do MAR, quando em movimento, sempre gere um plano. A discussão e resultados sobre a formação de um plano, quando acionado um ou dois atuadores, pode ser encontrada no Capítulo 4.

Para a obtenção das imagens interferométricas aplicou-se tensão nos atuadores piezelétricos (P410.30) da PHYSIK INSTRUMENTE® por meio de uma fonte de alimentação com uma corrente elétrica de 50 mA, causando deslocamentos. As tensões variaram de 0 V a 600 V para o atuador A e de 0 V a 450 V para o atuador B (cujas localizações podem ser vistas na FIGURA 3.7). Dentro desta variação, foram escolhidas algumas tensões.

Os deslocamentos produzem diferentes posições. Tais deslocamentos foram medidos por meio de um sistema de medição composto por um sensor de deslocamento, um instrumento eletrônico para medição linear com indicação analógica (LVDT Tesatronic TTA-20) da TESA®, sendo que este instrumento trabalha com uma frequência portadora de 13 kHz, apresentando, segundo o fabricante, erro máximo na indicação de  $\pm 0,010 \mu\text{m}$  e tempo de estabilização na

saída analógica de 20 ms. A configuração usada para medidas de deslocamento pode ser vista na FIGURA 3.3.

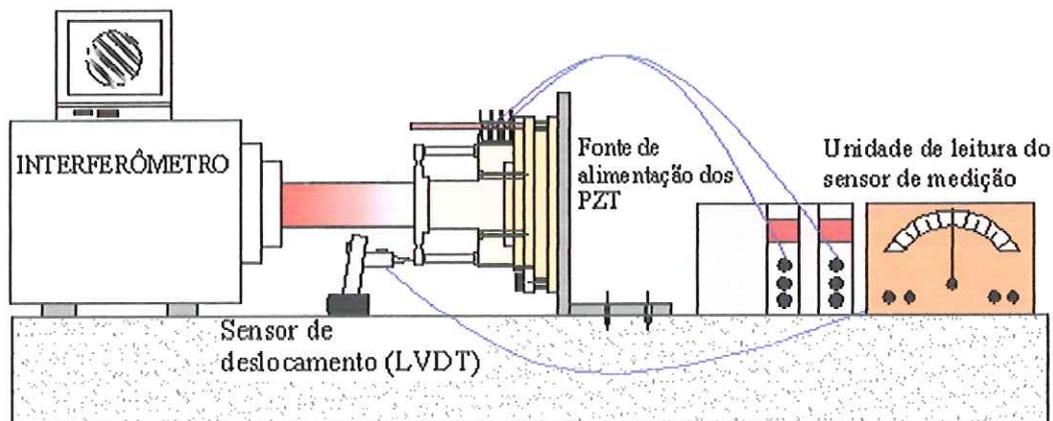


FIGURA 3.3 – Configuração do experimento para medidas de deslocamento.

O sensor de deslocamento foi colocado exatamente sobre o ponto onde há o deslocamento na direção normal dos atuadores. Desse modo, a cada tensão aplicada foi possível obter um valor de deslocamento (medido na unidade de leitura). A cada deslocamento foi obtido um plano, gerando diferentes padrões de franjas interferométricas, os quais são os padrões de franjas a serem analisados. O sistema de aquisição das imagens é mostrado na FIGURA 3.4, onde se pode verificar a presença de um disco de alumínio (diâmetro 150 mm e espessura 20 mm) fixado na própria base flexível do MAR. O objetivo foi garantir a planicidade da superfície a ser deslocada pelos atuadores piezelétricos, assegurando assim, medidas reais que possam exprimir o comportamento do deslocamento do MAR durante o acionamento dos atuadores. Analisando de forma mais criteriosa a FIGURA 3.4, constata-se que há no centro desse disco de alumínio, um disco de vidro (vide FIGURA 3.5).

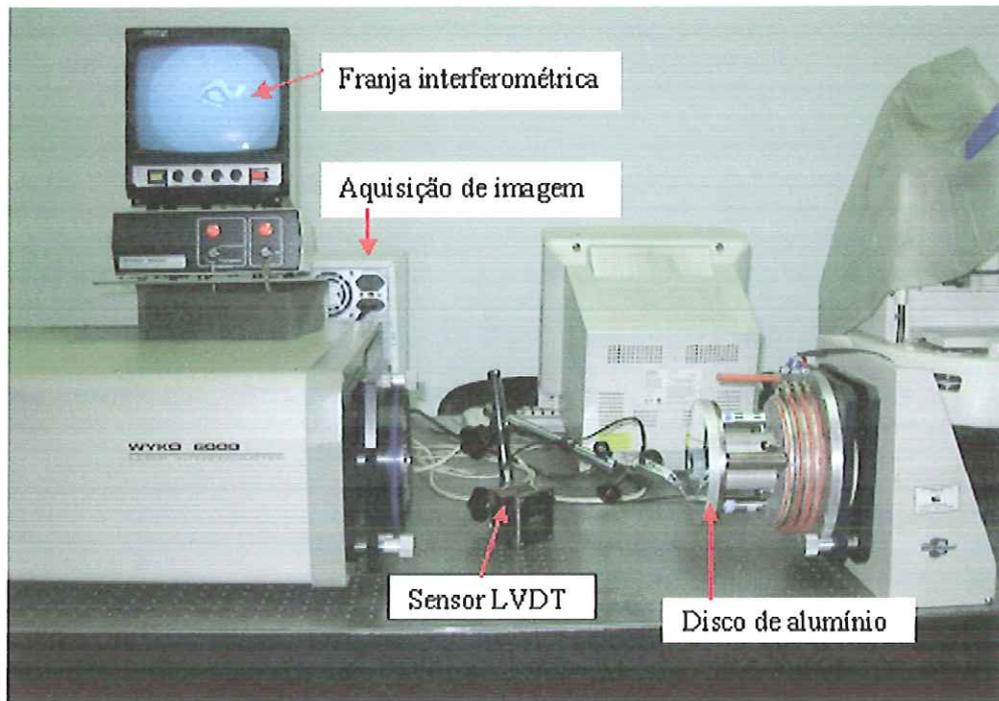


FIGURA 3.4 – Sistema de aquisição de imagens.

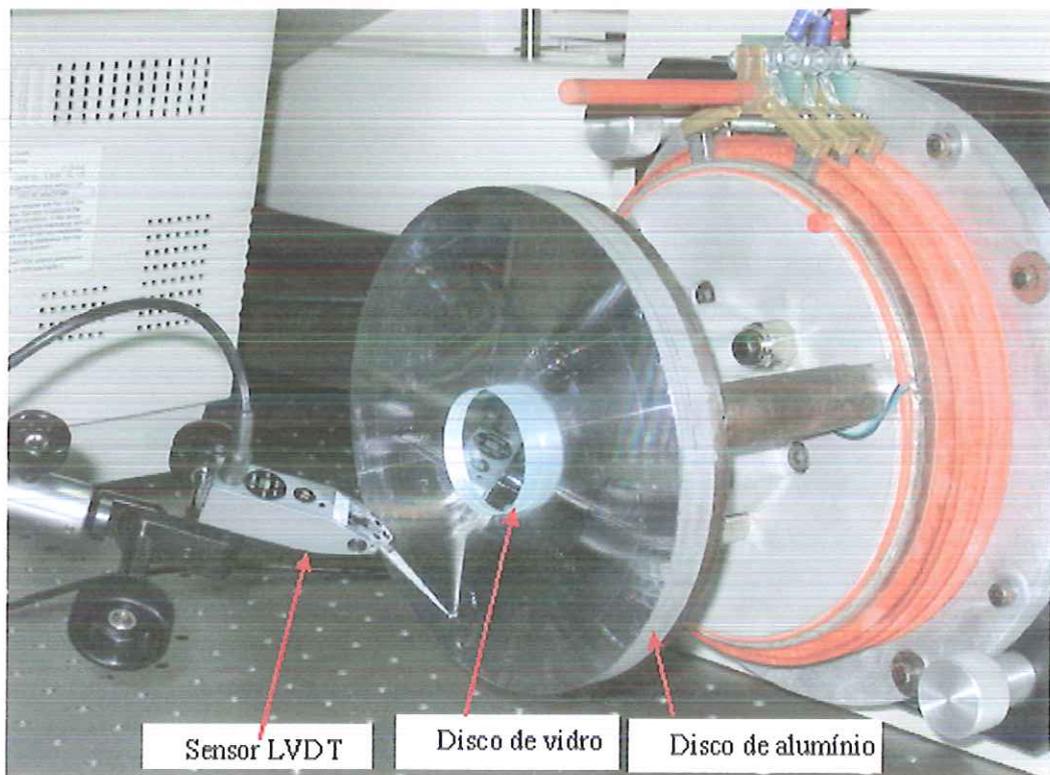


FIGURA 3.5 – Fixação da superfície óptica no MAR.

O disco de vidro mostrado na FIGURA 3.5 é uma superfície óptica ideal polida, usada justamente para avaliação da planicidade do sistema, quando acionado os atuadores piezelétricos. É sobre essa superfície óptica que o feixe LASER será inserido, originando os padrões de franjas interferométricas.

### 3.3. Processo de Aquisição de Imagem

A captura da imagem é efetuada pelo interferômetro a LASER (Fizeau), o qual é constituído por um conjunto de lentes e uma matriz digitalizadora, que a discretiza em um número finito de pontos, cada qual representando um elemento da imagem. Estes pontos (*pixels*) são enviados para uma placa de aquisição de imagens acoplada ao microcomputador, onde são feitos o processamento e reconhecimento. A FIGURA 3.6 representa, esquematicamente, o sistema a ser usado.

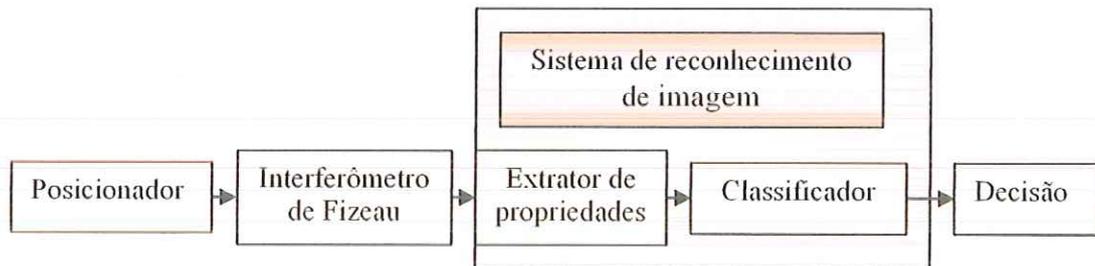


FIGURA 3.6 – Esquema do sistema a ser usado.

De acordo com a FIGURA 3.6 pode-se ter uma idéia de como o sistema funcionará: o interferômetro de Fizeau mostra as franjas interferométricas provenientes da superfície da peça que está sobre o posicionador, logo a imagem obtida pelo interferômetro é transmitida para o microcomputador onde será efetuado o processamento de imagem e, em seguida, um algoritmo baseado em redes neurais irá classificá-la de acordo com os parâmetros exigidos.

As imagens foram capturadas por meio de uma placa (DT – 3155) e *software* (DT – *Active Open Layers*<sup>®</sup>) de aquisição de imagens. Essa placa e *software* estão contidas num microcomputador *Pentium 2*, com um processador MMX e velocidade de 350 MHz e 128 MB de memória RAM, cujo sinal de entrada da placa é proveniente do monitor do interferômetro, onde são vistas as franjas interferométricas, cuja saída de vídeo é comum. O tempo de captura do sinal é considerado imediato, isto é, em tempo real. Foi aplicado um filtro de 60 Hz para atenuar possíveis ruídos provenientes da rede elétrica. Em seguida, foram tratadas e

transformadas em matrizes binárias, as quais são as entradas da rede neural. O processamento de imagens e a simulação da rede neural foram feitos num microcomputador *Pentium 4*, com velocidade de processamento de 2,4 GHz e 512 MB de memória RAM.

### 3.4. Identificação da Variação Angular

A identificação dos ângulos que proporcionam inclinação ao MAR, depois de sabido os deslocamentos nos atuadores piezelétricos, foi realizada aplicando equações cinemáticas ao sistema. Tais equações procedem de um equacionamento algébrico extenso, cujo desenvolvimento das matrizes de transformação homogênea pode ser visto detalhadamente em MONTANARI (1999). A matriz de transformação homogênea pode ser definida para representar a transformação de coordenadas de um sistema de coordenadas relativas para um outro sistema de coordenadas absoluto. Assim, as rotações e translações presentes na cinemática do mecanismo podem ser expressas por meio das matrizes de transformação homogênea de forma a descrever os deslocamentos angulares do posicionador em função dos deslocamentos dos atuadores. O desenvolvimento desse modelo matemático tem como objetivo principal a disponibilidade de uma ferramenta matemática para a síntese e avaliação do MAR, a parte cinemática foi baseada num modelo ideal, ou seja, sem imperfeições geométricas.

Para a obtenção destas equações cinemáticas foi usado o modelo do MAR ilustrado na FIGURA 3.7.

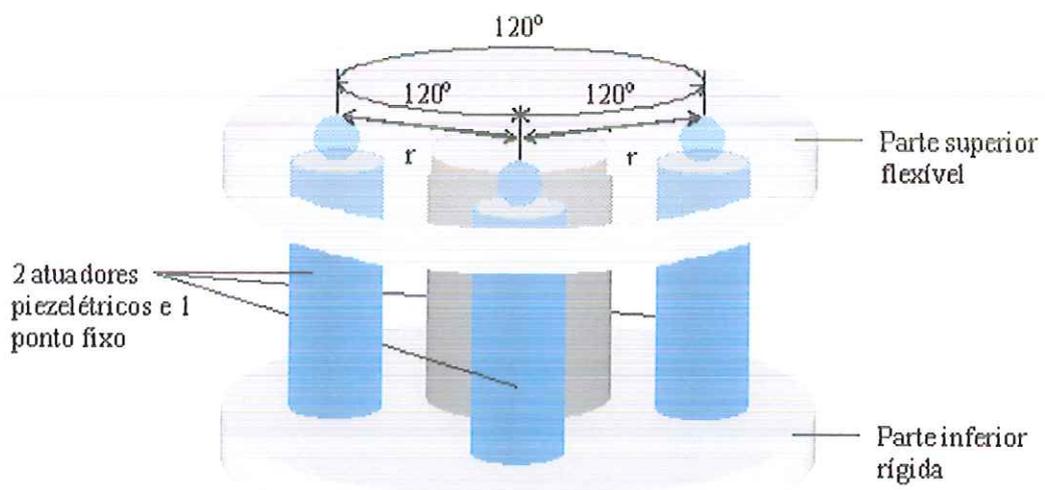


FIGURA 3.7 – Modelo do MAR.

Tal modelo consiste em uma estrutura composta por duas partes (superior e inferior) ligadas por dois atuadores piezelétricos e um ponto fixo, dispostos a 120 graus, a uma distância  $r$  do centro.

De acordo com a FIGURA 3.8, o sistema absoluto de coordenadas **OXYZ** sob o MAR e o ponto **O** (origem) estão no centróide do triângulo equilátero, formado pelos pontos de contato dos três atuadores. O ponto **O** é tomado como ponto de referência a ser controlado.

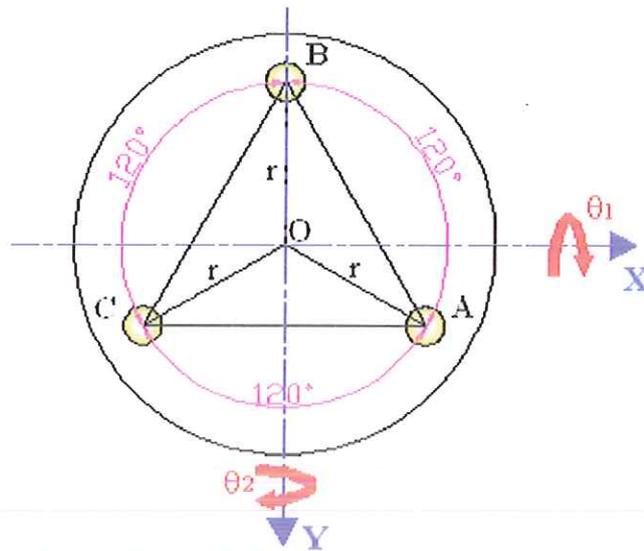


FIGURA 3.8 – Posição do sistema absoluto de coordenadas OXYZ no posicionador e ângulos de rotação em torno de X e Y – vista superior.

Quando o posicionador estiver na posição inicial, isto é, paralelo ao plano XY, coincide com o plano formado pelos atuadores na posição de repouso, como mostra a FIGURA 3.9.

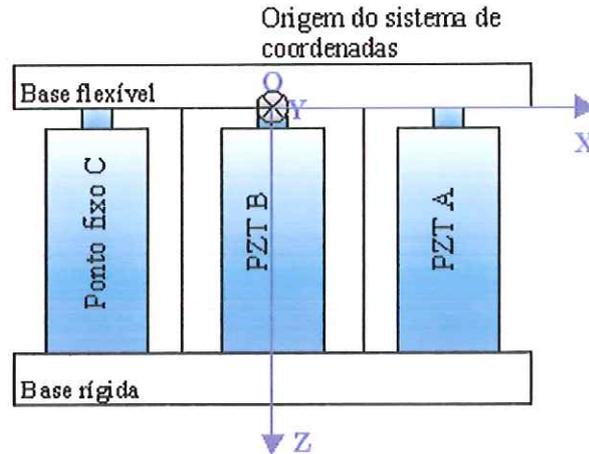


FIGURA 3.9 – Posição do sistema absoluto de coordenadas **OXYZ** do posicionador – vista frontal.

Seja o posicionador colocado em uma posição qualquer a partir de um deslocamento genérico provocado pelos atuadores **A**, **B** e **C**. Após um movimento, os atuadores são deslocados  $dA$ ,  $dB$  e  $dC$ , fazendo com que o posicionador sofra uma translação em **Z**, um giro com relação ao eixo **X** e um giro com relação ao eixo **Y**. Daí, a posição de qualquer ponto sobre o posicionador em relação a sua posição inicial pode ser determinada usando matrizes de transformação homogênea.

Desta forma, a aplicação de matrizes de transformação homogênea para todos os movimentos, resulta num conjunto de equações que relacionam o deslocamento individual de cada atuador e a variação angular desencadeada na plataforma. As equações são dadas pelas eq. (3.1), (3.2) e (3.3):

$$dA = -d - r \cos 60^\circ \operatorname{sen} \theta_1 \cos \theta_2 + r \operatorname{sen} 60^\circ \operatorname{sen} \theta_2 \quad (3.1)$$

$$dB = -d + r \operatorname{sen} \theta_1 \cos \theta_2 \quad (3.2)$$

$$dC = -d - r \cos 60^\circ \operatorname{sen} \theta_1 \cos \theta_2 - r \operatorname{sen} 60^\circ \operatorname{sen} \theta_2 \quad (3.3)$$

\* As eq. (3.1) e (3.3) foram trocadas (uma com relação a outra) se comparadas com as eq. obtidas em MONTANARI (1999). Essa permuta ocorreu somente para facilitar a visualização ao realizar o experimento. Deve-se salientar que essa troca não altera o equacionamento envolvido.

Onde:

$d$  – translação do ponto central do posicionador na direção  $Z$ ;

$r$  – distância do atuador até o centro do MAR;

$\theta_1$  – giro com relação ao eixo  $X$ ;

$\theta_2$  – giro com relação ao eixo  $Y$ ;

$dA, dB, dC$  – deslocamento dos atuadores  $A, B$  e  $C$ , respectivamente.

Portanto, essas equações podem ser usadas para determinar as entradas de controle necessárias  $dA, dB$  e  $dC$  para alcançar determinada posição do MAR, isto é, é possível identificar as rotações e translações presentes na cinemática do sistema posicionador. Pode-se observar que para as equações anteriores existe uma correspondência única das saídas com relação às entradas, por exemplo, para qualquer  $dA, dB, dC$  existe somente uma posição do ponto de controle, ou seja,  $d, \theta_1, \theta_2$  e vice-versa.

De acordo com as equações cinemáticas, observa-se que há necessidade de conhecer a posição do ponto central do atuador ( $O$ ). Para isso, foi colocado um outro sensor de deslocamento na devida posição e foram obtidas as posições.

Depois de conhecidas as posições do MAR, conforme as tensões aplicadas nos atuadores piezelétricos, foram observadas as franjas interferométricas geradas que caracterizam a posição do MAR. Com isso obteve-se um mapeamento do comportamento do MAR, cobrindo amplamente o domínio do problema, permitindo o uso de redes neurais artificiais para identificação do sistema, sendo que para a aplicação e desenvolvimento das redes neurais artificiais procurou-se cumprir os seguintes passos:

#### **(a e b). Coleta de dados e separação em conjuntos**

Os dois primeiros passos do processo de desenvolvimento de redes neurais artificiais foram a coleta de dados relativos ao problema e a sua separação em um conjunto de treinamento e um conjunto de teste. Esta tarefa exige uma análise cuidadosa sobre o problema, a fim de minimizar ambigüidades e erros nos dados. Além disso, foram coletados dados significativos, isto é, para cada tensão atuante, há uma imagem correspondente.

Os dados coletados foram separados em duas categorias: dados de treinamento, que foram usados para o treinamento da rede e dados de teste, que foram usados para verificar sua performance sob condições reais de uso. Além dessa divisão, pôde-se usar também, uma

subdivisão do conjunto de treinamento, criando um conjunto de validação, usado para verificar a eficiência da rede quanto a sua capacidade de generalização durante o treinamento e podendo ser empregado como critério de parada do treinamento. Depois de determinados estes conjuntos, eles foram colocados em ordem aleatória para prevenção de tendências associadas à ordem de apresentação dos dados.

### **(c). Configuração da rede**

O terceiro passo foi a definição da configuração da rede, que foi baseado nos seguintes critérios:

- Seleção do paradigma neural apropriado à aplicação;
- Determinação da topologia da rede a ser usada – o número de unidades de neurônios em cada camada etc;
- Determinação de parâmetros do algoritmo de treinamento e funções de ativação.

### **(d). Treinamento**

O quarto passo foi o treinamento da rede. Nesta fase, seguindo o algoritmo de treinamento escolhido, foram ajustados os pesos das conexões. É importante considerar, nesta fase, alguns aspectos tais como o início da rede, o modo de treinamento e o tempo de treinamento.

Uma boa escolha dos valores iniciais dos pesos da rede pode diminuir o tempo necessário para o treinamento. Normalmente, os valores iniciais dos pesos da rede são números aleatórios uniformemente distribuídos, em um intervalo definido. A escolha errada destes pesos pode levar a uma saturação prematura.

Quanto ao tempo de treinamento, vários fatores podem influenciar a sua duração, porém sempre será necessário usar algum critério de parada. O treinamento será interrompido quando a rede apresentar boa capacidade de generalização e quando a taxa de erro for suficientemente pequena, ou seja, menor que um erro admissível. Assim, foi encontrado um ponto ótimo de parada com erro mínimo e capacidade de generalização máxima.

**(e). Teste**

Finalmente, no quinto passo, foram coletados mais dados para serem usados durante a fase de teste, que determina a performance da rede. Estes dados não foram previamente usados. A performance da rede, medida nesta fase, é uma boa indicação de sua performance real.

Quanto ao tipo de RNA usada, optou-se por uma rede competitiva com aprendizado não supervisionado, isto é, uma rede do tipo auto-organizável. Detalhes são encontrados no Apêndice I e a justificativa da escolha pode ser vista no Capítulo 2.

O próximo capítulo mostra os resultados obtidos e discussões a respeito das simulações e dos testes experimentais realizados.

## **Capítulo 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **4.1. Introdução**

Este capítulo está dividido basicamente em duas partes. A primeira parte mostra o estudo e desenvolvimento para encontrar a melhor configuração geométrica do microposicionador angular rotativo, considerando os conceitos e princípios de projeto de máquinas de precisão, com o intuito de suprir os requisitos necessários de desempenho estático e dinâmico, como por exemplo, formação de um plano quando acionado um ou dois atuadores. Para tanto, foram realizadas simulações usando o método de elementos finitos e, de acordo com o resultados obtidos, foram efetuadas mudanças no protótipo original do MAR. Na segunda parte, constam os resultados relativos aos testes experimentais e às simulações numéricas quanto à possibilidade de uso de imagens interferométricas como meio de identificação da posição do microposicionador angular rotativo. Identificando a posição é possível gerar sinais de comando para modificação da posição relativa ferramenta/peça, alcançando a geometria desejada.

#### **4.2. Microposicionador Angular Rotativo (MAR)**

O MAR foi projetado segundo conceitos e princípios de projeto de precisão com o objetivo de se obter comportamento cinemático dentro dos padrões exigidos (DUDUCH et al., 2004). O projeto (FIGURA 4.1), congrega elementos importantes, que são: a) atuadores piezelétricos, b) apoio cinemático, c) mancal de flexão (mancal de mola) e d) arranjo construtivo do tipo plataforma de *Stewart*. O critério de escolha e sua justificativa encontram-se em MONTANARI et al. (1998) e MONTANARI (1999).

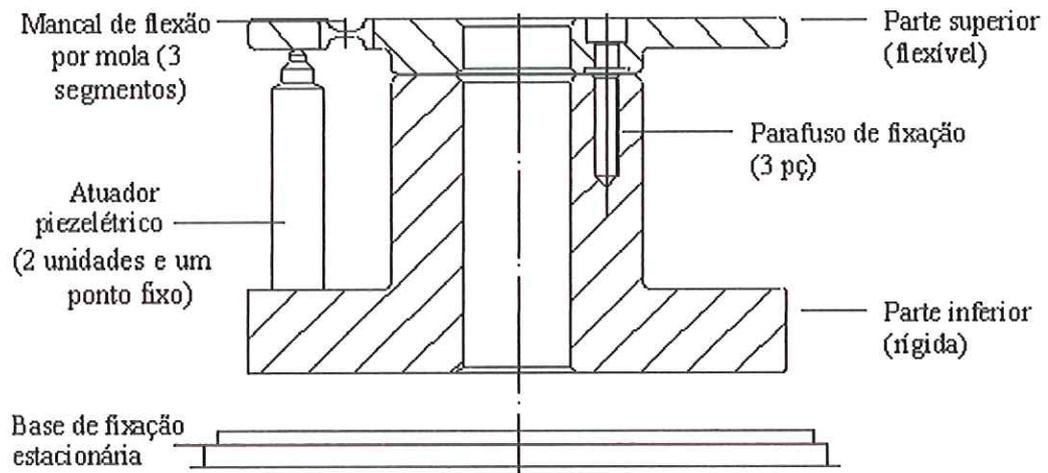


FIGURA 4.1 – Modelo de posicionador para uma base de fixação estacionária.

A FIGURA 4.2(a) mostra o protótipo inicial do MAR. No entanto, estudos referentes à implementação (comportamento do MAR quanto ao deslocamento enquanto o eixo-árvore estiver em movimento) no torno ASG 2500 foram realizados e algumas modificações fizeram-se necessárias (FIGURA 4.2 (b)).

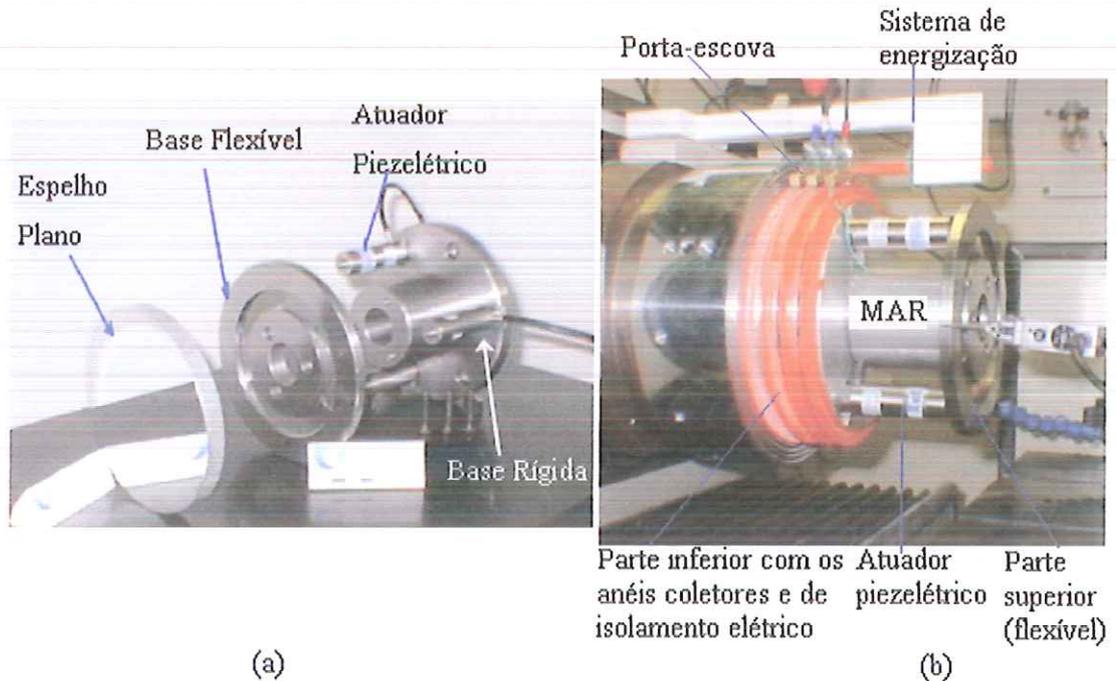


FIGURA 4.2 – Microposicionador angular rotativo.

Conforme FIGURA 4.2, as modificações foram feitas na parte inferior do MAR, onde está concentrado o sistema de energização do MAR. Os resultados referentes a esses testes podem ser encontrados em BURATO (2003), onde pôde-se constatar a funcionalidade do MAR para um sistema rotativo e obtenção do mesmo desempenho com relação a um referencial estático obtido por MONTANARI (1999), ou seja, obteve amplitude de deslocamento da base deformável da MAR em até 30  $\mu\text{m}$ , a uma rotação máxima do eixo-árvore, por motivo de segurança, de 1000 rpm. Validou ainda que, a transmissão da corrente elétrica para os atuadores piezelétricos por meio do sistema de escovas e anéis coletores foi eficiente, bem como o sistema de isolamento elétrico e aterramento de todo o conjunto.

#### 4.2.1. Análises Numéricas

Depois de definida as formas geométricas do MAR, foram feitas as análises numéricas tanto do comportamento estático quanto do comportamento dinâmico. Essas análises contribuíram para assegurar que quando um ou dois atuadores do MAR fossem acionados, um plano fosse gerado na parte superior (flexível), característica desejada do MAR. As análises foram realizadas usando o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF é uma técnica de análise numérica para se obterem soluções aproximadas em uma variedade de problemas de engenharia. Apesar de oferecer soluções aproximadas, em muitos casos é a única maneira que projetistas dispõem para encontrar as respostas que procuram. Embora originalmente desenvolvido para estudar tensões em complexas estruturas aéreas, foi estendido e aplicado ao vasto campo da mecânica do contínuo (contínuo pode ser definido como um corpo de matéria sólida, líquida ou gasosa ou simplesmente uma região do espaço na qual um fenômeno particular está ocorrendo). Devido a essa diversidade e flexibilidade como ferramenta de análise, tem recebido muita atenção em escolas de engenharia e na indústria.

O *software* usado neste trabalho é o ANSYS, que é aplicado em análises estáticas, dinâmicas, fluxo de calor, fluidos, eletromagnetismo e piezeletricidade. O ANSYS é capaz de resolver problemas lineares e não-lineares em engenharia. Essas não-linearidades podem ser originadas do comportamento não-linear de materiais, grandes deformações e condições de contorno de contato (NADER, 2002).

## 4.2.2. Análise Usando o Método dos Elementos Finitos no MAR

### 4.2.2.1. Criação do Modelo

Para iniciar as simulações é necessário definir as condições de trabalho sob as quais o modelo irá operar. Assumem-se, inicialmente, algumas suposições básicas e restrições físicas, tais como:

- a) Modelo ideal do mecanismo, ou seja, os componentes são perfeitamente fabricados e montados;
- b) Os componentes constituintes são infinitamente rígidos (atuadores piezelétricos e ponto fixo), salvo os que possuem flexibilidade fixada, como a parte superior que tem a característica de mancal de flexão;
- c) Assume-se que as partes superior e inferior sejam perfeitamente solidárias;
- d) Os pontos de contato entre a parte superior (flexível) e os atuadores são mantidos por meio de uma esfera que permanece solidária à mesa, tendo o princípio de apoio cinemático;

Para simular a ação dos atuadores piezelétricos devem-se definir deslocamentos na direção  $y$  (direção normal dos atuadores). Estes deslocamentos deverão ser tais que, representem os movimentos reais produzidos pelos atuadores. A FIGURA 4.3 mostra o modelo real apresentando as modificações oriundas do sistema de energização.

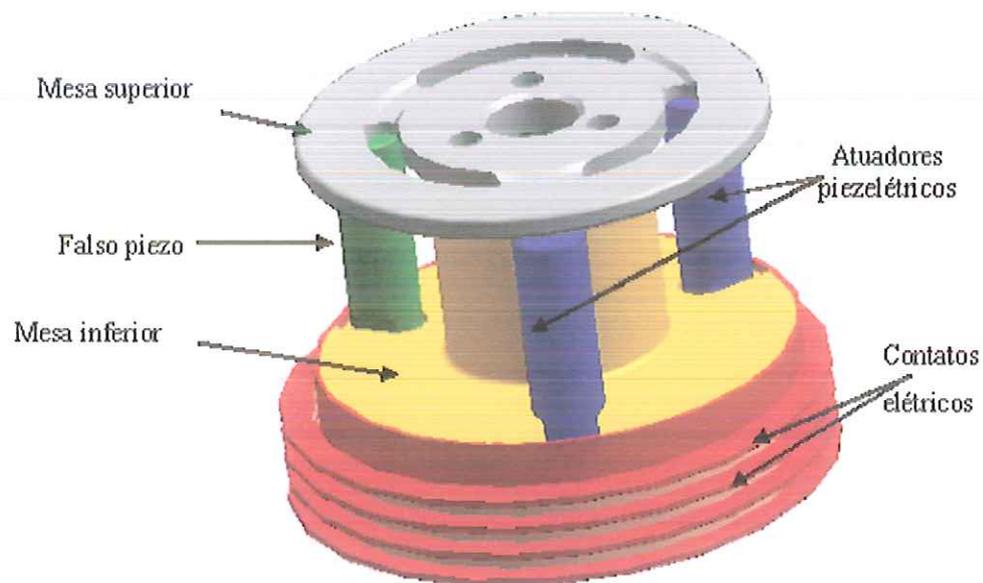


FIGURA 4.3 – Modelo do MAR para análise por meio do MEF.

Geralmente, elementos de máquinas geralmente são pré-dimensionados assumindo uma configuração estática, onde as cargas aplicadas consideradas são as maiores encontradas no caso estático ou dinâmico. O fator dominante no projeto estático é a rigidez, enquanto no projeto dinâmico são a frequência natural e o amortecimento (SLOCUM, 1992). Portanto, a seguir, são apresentadas análises estáticas e dinâmicas do sistema estudado.

#### **4.2.2.2. Análise Estática do MAR**

Como mencionado anteriormente, admitiu-se que os componentes constituintes são infinitamente rígidos, salvo os que possuem flexibilidade fixada (mola) e assume-se que as partes superior e inferior são perfeitamente solidárias. Em vista disso, a construção do modelo em elementos finitos foi facilitada. O fato da adoção de um só bloco tende, indiscutivelmente, a garantir maior rigidez (característica básica e fundamental de toda máquina de precisão) ao sistema, e melhorar o deslocamento real efetivo dos atuadores na parte superior estando suscetível a erros menores do sistema global.

A seguir está a descrição do procedimento e apresentação das simulações do modelo do MAR.

#### **4.2.2.3. Análises Preliminares**

Foram feitas análises em caráter preliminar, de modo a avaliar o comportamento do MAR ao se aplicarem forças nos pontos de apoio dos atuadores. Este comportamento se refere aos deslocamentos e às tensões aplicadas.

Para uma primeira simulação, escolheu-se deslocamentos de 15  $\mu\text{m}$  na região de apoio dos dois atuadores. Com isso pretende-se avaliar o comportamento da mesa superior quanto aos deslocamentos e às tensões. Para todas as simulações, todos os graus de liberdade da mesa inferior foram suprimidos. A FIGURA 4.4 mostra o modelo simplificado usado para as simulações. A diferença de cores é usada para indicar os diferentes materiais usados na construção do protótipo (aço para a mesa superior e alumínio para a mesa inferior).

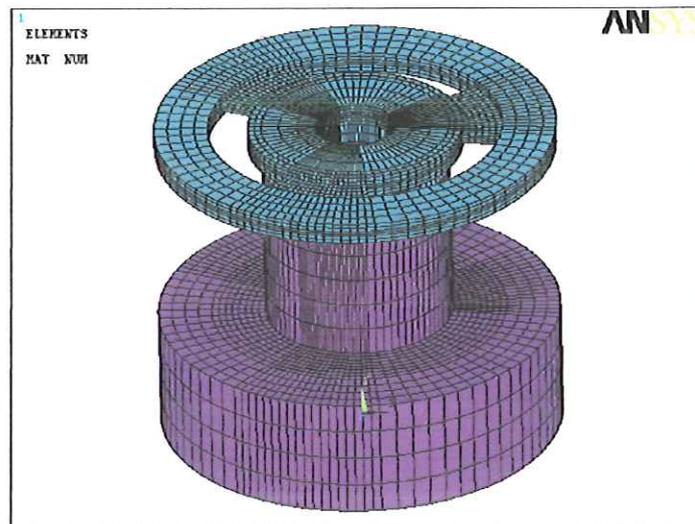


FIGURA 4.4 – Modelo usado nas simulações.

Para a obtenção dos resultados foram realizadas várias simulações. Foram selecionados dois casos limites para que fossem feitas as análises. As considerações serão feitas para cada simulação.

- **Simulação I**

A simulação I foi realizada aplicando, nos dois pontos de apoio dos atuadores, um deslocamento de 15  $\mu\text{m}$  no sentido positivo da direção normal (y) dos atuadores.

Deseja-se inicialmente avaliar o comportamento da mesa superior quanto aos deslocamentos. O gráfico dos vetores de deslocamento dos nós é mostrado na FIGURA 4.5. Como era esperado, os deslocamentos impostos não afetaram em nada a parte inferior do MAR, pois esta peça foi projetada para que nas condições de operação pudesse ser considerada infinitamente rígida. Já na parte superior, a parte anelar apresenta deformação elástica. Para o projeto é importante que esta parte do MAR, não importando se um ou os dois atuadores estejam em funcionamento ao mesmo tempo, mantenha a sua superfície externa a mais plana possível.

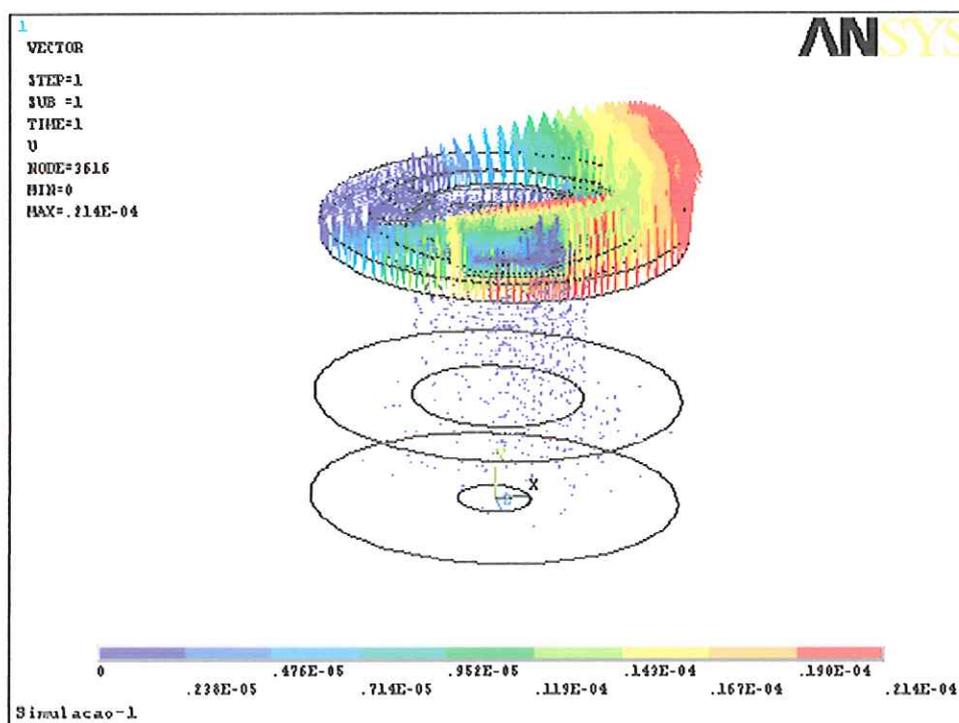


FIGURA 4.5 – Gráfico de deslocamento vetorial na direção y [m].

Para averiguar a planicidade, foram tomados nós superficiais da mesa superior e listadas suas coordenadas e seus respectivos deslocamentos, como mostra a TABELA 4.1.

TABELA 4.1 – Nós escolhidos na simulação I.

Coordenadas dos pontos escolhidos – Simulação I			
Nó	x [mm]	Desl - y [ $\mu$ m]	Z [mm]
16346	-10,4	18,92	74,3
16401	-9,74	16,93	69,3
16418	-9,05	14,93	64,4
16435	-8,35	12,85	59,4
16381	-7,65	10,74	54,5
6491	7,65	3,718	-54,5
6539	8,35	4,218	-59,4
6524	9,05	4,700	-64,4
6509	9,74	5,157	-69,3
6460	10,4	5,587	-74,3

A partir dos dados apresentados na TABELA 4.1, foi construído um gráfico como visto na FIGURA 4.6. Esses pontos foram escolhidos porque estão praticamente sobre o eixo z do referido sistema, já que o *software* de análise retorna todas as posições em relação ao seu sistema global de coordenadas.

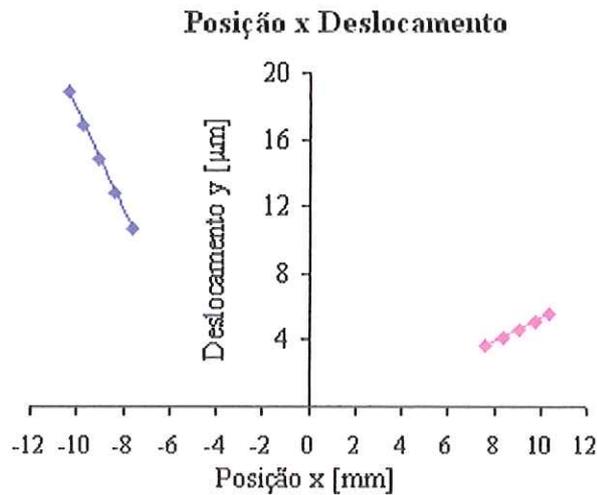


FIGURA 4.6 – Posição versus deformação nos nós (simulação I).

Devido à impossibilidade de selecionar pontos em uma linha contínua (a superfície é um anel com raio externo 75 mm e raio interno 55 mm) foram escolhidos somente 10 pontos, os quais não são suficientes para analisar adequadamente.

Os pontos à direita do gráfico correspondem aos de maior deformação. Pode-se observar que as retas formadas pelos pontos da esquerda e da direita têm coeficientes angulares diferentes e de sinais opostos. Tal comportamento é explicado pela flexão da região anelar da mesa superior, formando uma flecha para baixo.

Estes desvios são muito pequenos, da ordem de décimos de  $\mu\text{m}$ , e causam erros angulares na ordem de milésimos de graus. Outros valores foram analisados (coordenadas), mas os pontos mostrados na TABELA 4.1 foram os que mostraram maiores discrepâncias de resultados.

Outro fator importante para analisar é o comportamento da mesa superior em relação às tensões de Von Mises – critério de falha baseado no cálculo das tensões médias do material comparado à tensão admissível do mesmo material – usado para materiais metálicos. O gráfico de tensões encontra-se na FIGURA 4.7.

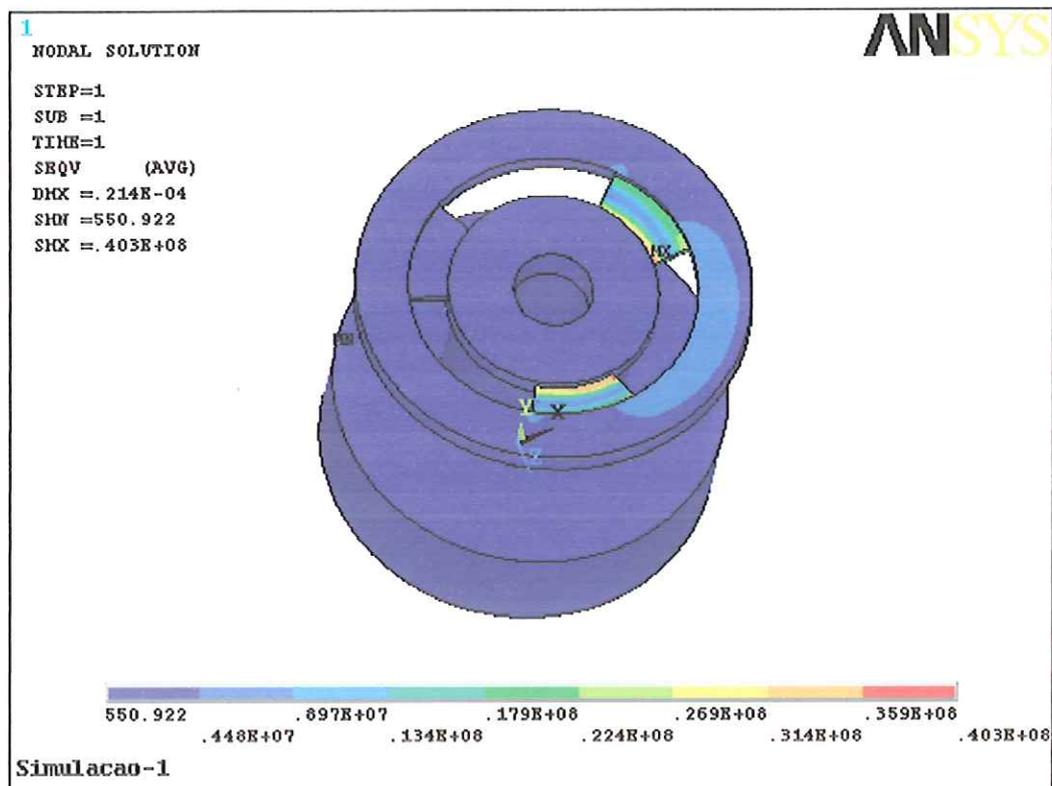


FIGURA 4.7 – Gráfico de tensões de Von Mises (simulação I).

Observando a FIGURA 4.7, pode-se constatar que as tensões se concentraram na região das molas. A tensão máxima é da ordem de 40 MPa. Considerando que o limite de elasticidade do aço do aço 1020 está em torno de 430 MPa, tem-se, para a situação da simulação I, um coeficiente de segurança de 10,75.

#### • Simulação II

A simulação II foi realizada aplicando em um dos pontos de apoio dos atuadores um deslocamento de 15  $\mu\text{m}$  no sentido positivo da direção y, e em outro atuador, o mesmo módulo, a mesma direção e sentido contrário ao deslocamento aplicado no primeiro atuador.

O gráfico dos vetores de deslocamento dos nós é mostrado na FIGURA 4.8, sendo que as observações da simulação I valem na simulação II, para a mesa inferior.

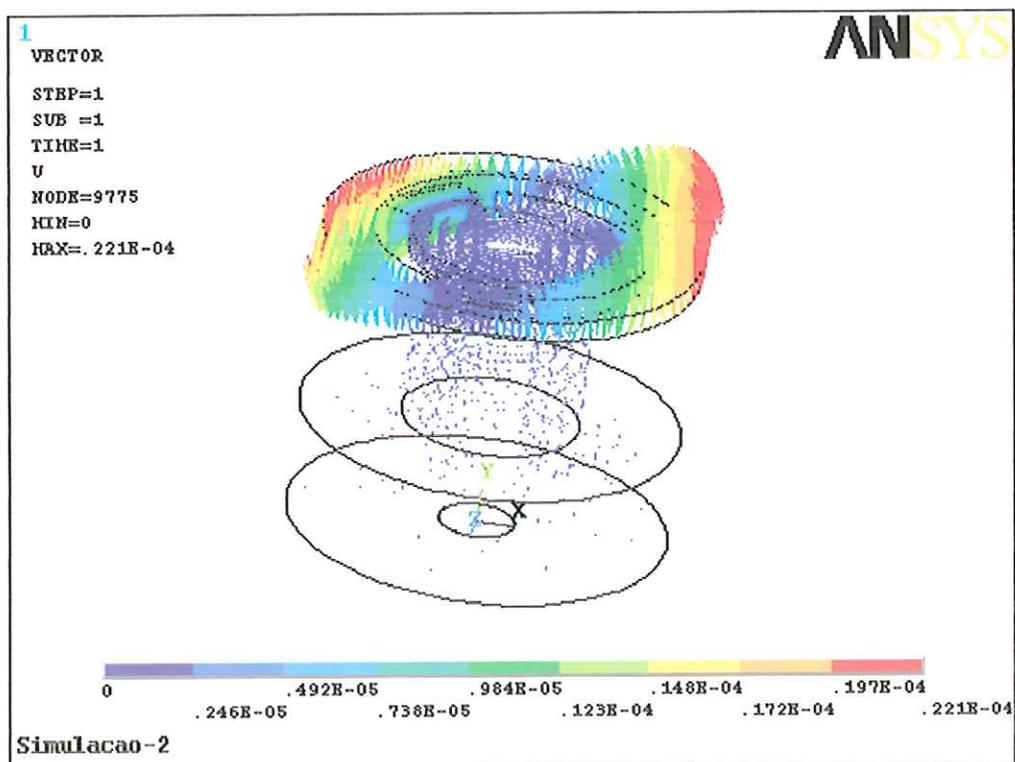


FIGURA 4.8 – Gráfico de deslocamento vetorial na direção y [m].

Como na simulação I, para averiguar se a superfície continuaria plana depois de aplicados os deslocamentos, foram tomados nós superficiais da mesa superior e listados suas coordenadas e deslocamentos como mostra a TABELA 4.2.

TABELA 4.2 – Nós escolhidos na simulação II.

Coordenadas dos pontos escolhidos – Simulação II			
Nó	x [mm]	Desl- y [ $\mu$ m]	Z [mm]
13035	-69,5	-14,09	28,1
13084	-64,9	-12,91	26,2
13099	-60,3	-11,71	24,3
13114	-55,6	-10,5	22,5
13066	-51,0	-9,24	20,6
3662	51,0	12,5	-20,6
3716	55,6	14,8	-22,5
3699	60,3	17,1	-24,3
3682	64,9	19,3	-26,2
3622	69,5	21,5	-28,1

E, a partir dos dados apresentados na TABELA 4.2, foi construído um gráfico como visto na FIGURA 4.9. Esses pontos foram escolhidos porque estão praticamente sobre o eixo z do referido sistema, já que o software de análise retorna todas as posições em relação ao seu sistema global de coordenadas.

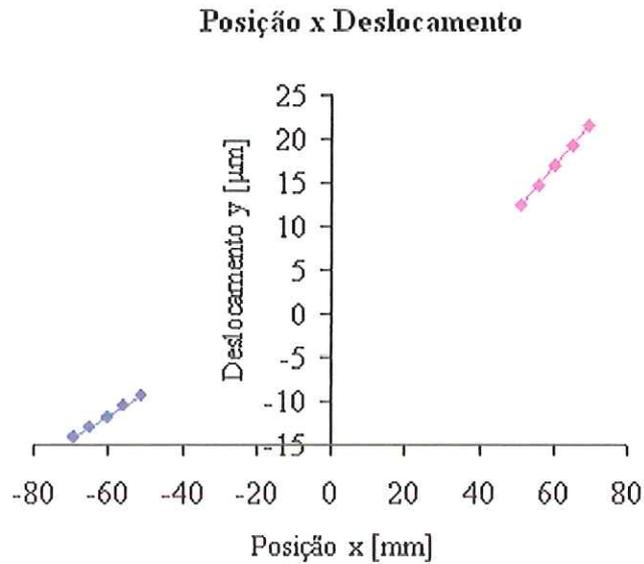


FIGURA 4.9 – Posição versus deslocamento (simulação II).

Analisando o gráfico da FIGURA 4.9, pode-se observar novamente que o anel superior está sendo flexionado, isso explica o fato das curvas, formadas pelos pontos dos lados esquerdo e direito do ponto zero, terem coeficientes angulares diferentes. Para este caso esta flexão é ainda menor que na simulação I, sendo, portanto menores os erros angulares.

Quanto ao comportamento da mesa em relação às tensões, foi estudado o gráfico da FIGURA 4.10.

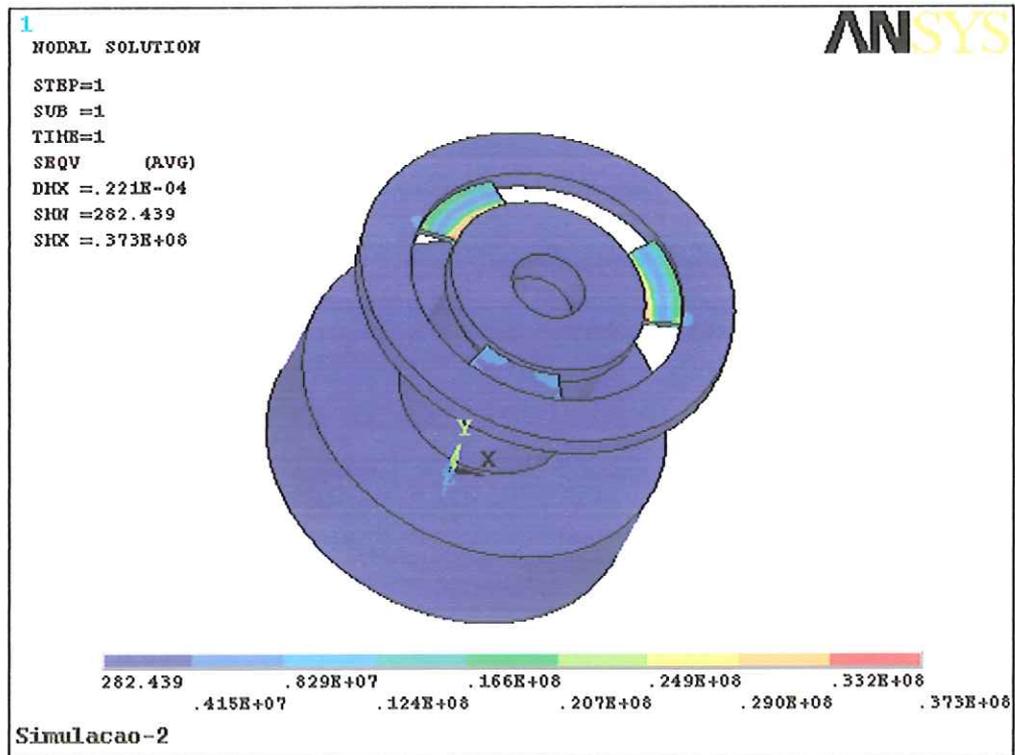


FIGURA 4.10 – Gráfico de tensões de Von Mises (simulação II).

Pode-se observar que as tensões se concentraram na região das molas. Nesta simulação a maior tensão que pode ser observada no gráfico é da ordem de 37,3 MPa. Esta tensão é muito pequena se comparada com o limite de elasticidade do aço 1020, que é da ordem de 430 MPa. Para a simulação II o coeficiente de segurança obtido é da ordem de 11,5.

#### 4.2.3. Identificação dos modos de vibrar do MAR

Qualquer sistema físico pode vibrar. As frequências nas quais ocorrem as vibrações naturais e a forma modal que o sistema vibrante assume (modos de vibração) são propriedades do sistema, e podem ser determinadas analiticamente por meio da análise modal (ANSYS REFERENCE GUIDE, 1998).

As frequências naturais e modos de vibração são parâmetros importantes no projeto de uma estrutura com carregamentos dinâmicos. Os modos de vibrações em componentes estruturais ou sistemas mecânicos podem diminuir a vida do equipamento, e causar falhas prematuras ou antecipadas, geralmente resultando em situações perigosas.

O estudo da análise modal é baseado nas matrizes de massa e rigidez do sistema. A frequência natural (frequência fundamental) dos componentes mecânicos normalmente é muito inferior àquela apresentada pela maioria dos atuadores (PHYSIK INSTRUMENTE, 1992), desta forma, deve-se concentrar esforços no sentido de obter-se a máxima frequência natural do sistema mecânico.

A frequência natural ( $f_n$ ) de um componente mecânico qualquer pode ser modelada como sendo um sistema massa-mola, então a expressão para a frequência natural mecânica ficará em função da rigidez ( $K$ ) e da massa ( $M$ ), conforme a eq. (4.1).

$$f_n = \sqrt{\frac{M}{K}} \quad 4.1)$$

Analisando a eq. (4.1), pode-se concluir que, para aumentar a frequência natural de um componente mecânico, deve-se diminuir a rigidez deste e aumentar a massa o quanto possível.

Estes requisitos podem trazer consigo algumas contradições, por exemplo, o aumento de rigidez pode ser conseguido aumentando-se as dimensões dos componentes, enquanto a diminuição da inércia pode ser conseguida diminuindo-se as dimensões dos componentes. Isso força o estudo de cada caso de forma específica, levando em consideração todos os fatores atenuantes e assim otimizando o resultado (RUBIO, 2000).

Dentre os modos de vibração, os de frequências altas, têm, geralmente, pouca significância para todos os tipos de carregamentos, e por isso são suprimidos dos resultados da análise. Isso é feito para diminuir o trabalho computacional, conseqüentemente diminuindo o tempo de processamento corre-se o risco de perda de precisão. Na simulação do MAR optou-se pela sua execução por dois métodos diferentes, visando com isso verificar a perda de precisão por truncar os cálculos.

Nas configurações da análise modal foi restringido o cálculo dos modos de vibração até os oito primeiros modos, já que os modos de vibração para frequências muito altas podem ser ignorados.

Os métodos de cálculo adotados foram o Método *Subspace* e o Método *Block Lanczos*. Trata-se de dois métodos computacionais de análise modal, onde o *Block Lanczos* apresenta taxa de convergência mais alta, e o Método *Subspace* apresenta maior precisão. A análise modal do Ansys 7<sup>®</sup> é uma análise linear. Quaisquer não linearidades, tais como plasticidade ou elementos de contato são ignorados, mesmo quando definidos. Quanto a isso o MAR não é prejudicado, já que os materiais trabalham em seu regime elástico.

A análise foi feita para vários casos de restrição de graus de liberdade. O caso que obteve piores resultados foi o que a base do MAR estava presa e todos os graus de liberdade da mesa superior foram liberados. A simulação, sob esta condição extrema, será apresentada aqui. Apesar de

O mesmo modelo usado para a análise estática foi usado para análise dinâmica (FIGURA 4.3). O procedimento usado para realizar a análise modal apresenta a seguinte seqüência:

1. Aplicação de restrições;
2. Solução;
3. Expandir os modos de vibração;
4. Análise dos resultados.

Estabelecidas as condições de contorno, as frequências naturais obtidas com os métodos *Block Lanczos* e *Subspace* podem ser encontradas na TABELA 4.3.

TABELA 4.3 – Frequências naturais obtidas (*Block Lanczos* e *Subspace*).

Modo de Vibração	Frequências Naturais [Hz]	
	Método <i>Block Lanczos</i>	Método <i>Subspace</i>
1°	776,32	776,32
2°	869,00	776,34
3°	1149,0	1014,5
4°	1445,7	1445,7
5°	2163,9	1445,7
6°	2327,0	2163,9
7°	2330,7	2330,6
8°	2748,2	2330,7

Analisando os resultados mostrados na TABELA 4.3, observa-se que as frequências naturais obtidas para os dois métodos foram diferentes. Essa diferença pode ser explicada pelo fato do método *Subspace* apresentar maior precisão dos resultados, apesar do método *Block Lanczos* apresentar maior taxa de convergência.

Quanto às frequências naturais obtidas, constata-se que a menor delas corresponde a  $f_0 = 776,32$  Hz. É importante saber o nível de frequência do primeiro modo de vibrar, pois este é o que apresenta maior amplitude, possibilitando a ocorrência de danos em toda a estrutura. Pode-se considerar tal frequência ( $f_0 = 776,32$  Hz) como sendo alta, e, supostamente, distante daquelas a qual o MAR será submetido durante o processo de usinagem, já que neste trabalho o estudo é feito somente levando-se em consideração a frequência de giro da placa. Portanto, o sistema não apresentará maiores perturbações, no que diz respeito a vibrações perigosas e danosas impostas pelas frequências naturais. Não faz parte do escopo deste trabalho analisar o efeito da influência das frequências induzidas pela ferramenta de corte no sistema, cujo comportamento pode ser não-linear.

#### 4.2.4. Refinamento do MAR

Ainda foram feitas algumas análises com o intuito de otimizar o MAR, isto é, analisar sua configuração geométrica e verificar sua funcionalidade, já que por meio da análise de tensão de Von Misses e do deslocamento notou-se que há má distribuição do deslocamento ao longo do anel exterior. Por isso, as análises seguintes têm como prioridade sanar esse problema. Serão feitas algumas modificações geométricas no modelo, tais como, aumentar o número de molas e a massa da mesa superior. Ressalta-se que a forma e o modelo adotados, quando se diz respeito à minimização de erros (por exemplo, não formação de um plano quando aplicado deslocamento em um ou nos dois atuadores) estão totalmente de acordo com a teoria de projeto de precisão estudada.

É importante dizer que os testes a seguir foram feitos antes das mudanças efetuadas para energização dos piezelétricos. Cabe enfatizar que essas mudanças foram apenas na parte inferior (parte fixa) do MAR.

A princípio, a análise foi feita acrescentando mais três molas ao protótipo original, como mostra a FIGURA 4.11.

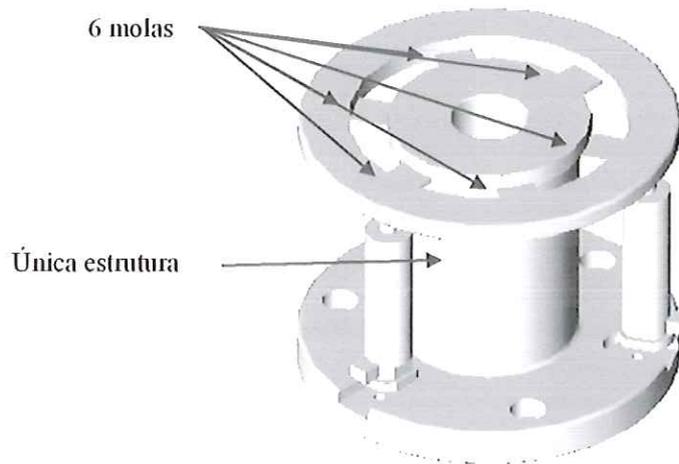


FIGURA 4.11 – MAR com seis molas.

Como pode ser observado pela FIGURA 4.11, as molas localizam-se a uma distância angular constante (60 graus). A rigidez causada pelos mancais continua a mesma, já que o número de molas é dobrado e as dimensões são divididas ao meio e colocadas em paralelo (HARA, MOTONOSHI & YOSHIDA 1990).

Com esta nova configuração (seis molas) procurou-se atenuar a distribuição de deslocamento ao longo do anel exterior. O resultado obtido para o deslocamento na direção normal aos atuadores está ilustrado na FIGURA 4.12.

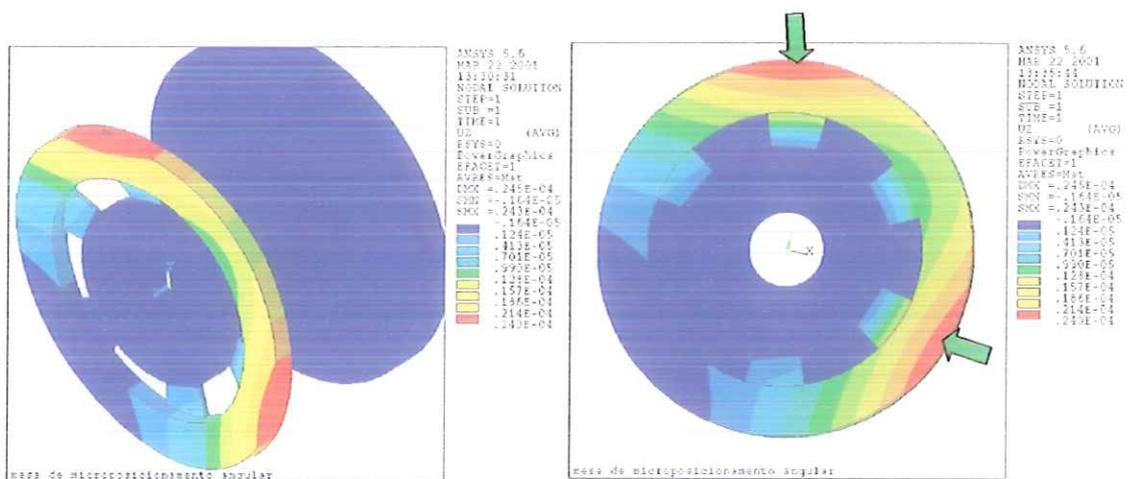


FIGURA 4.12 – Deslocamento na direção normal para o MAR com seis molas.

Analisando a FIGURA 4.12 constata-se que não houve êxito na distribuição de deslocamento para obtenção de um plano inclinado. Na verdade, na extremidade do anel exterior próximo às áreas dos piezelétricos, onde houve excitação, continuou apresentando notável deslocamento (região indicada pelas setas verdes) em relação às outras regiões do anel. Por meio da FIGURA 4.11 observa-se que dois atuadores estão sobre as molas e por isso, quando acionados, o deslocamento é maior onde eles estão fixos. As faixas de deslocamento continuaram se distribuindo em formas curvas. Portanto, pode-se afirmar que está ocorrendo uma flexão (envergamento) da mesa em direção ao centro, já que as regiões mais externas ao anel superior estão mais elevadas. Como o objetivo é obter um plano no anel exterior, procurou-se obter de alguma forma, regiões de deslocamento paralelas (faixas paralelas de deslocamento decrescentes) na superfície do anel exterior. Embora se queira o deslocamento em forma de plano na parte superior do anel, necessita-se saber onde estão localizadas as deformações para estimar a causa da flexão. Ao analisar os resultados obtidos pela simulação, pôde-se verificar onde estão concentradas as deformações da mesa superior. A FIGURA 4.13 ilustra a deformação da mesa com seis molas.

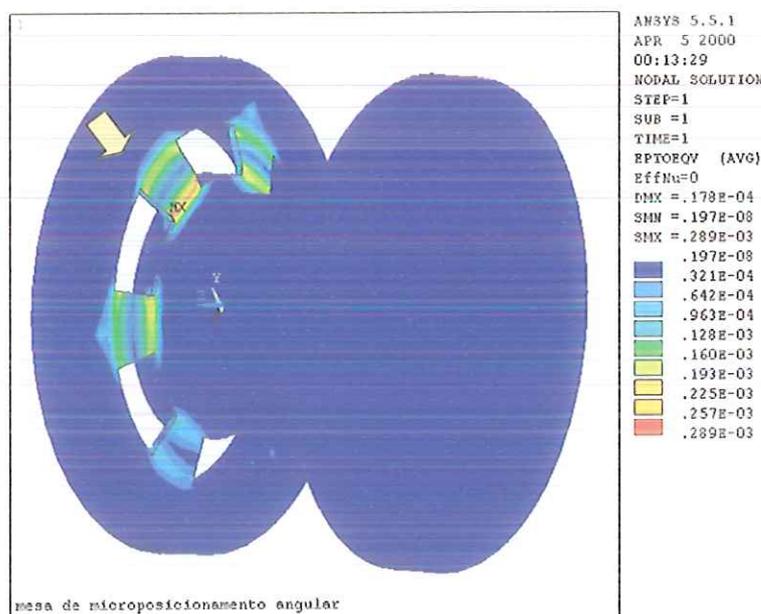


FIGURA 4.13 – Deformação segundo o critério de Von Misses (6 molas).

Analisando a FIGURA 4.13 nota-se que as deformações estão concentradas na região das molas, o que é desejado. No entanto, olhando de forma mais criteriosa, observa-se que a deformação também atinge uma pequena parte do anel externo. Portanto, é válido dizer que a

envergadura obtida (FIGURA 4.12) ocorre porque na região das molas e próximas a elas concentram-se deformações, de modo a ocasionar um deslocamento maior em relação às outras partes.

A adoção de seis molas não correspondeu às expectativas de melhora na distribuição do deslocamento, além disso, com esta configuração houve maior concentração das deformações nas molas próximas aos atuadores em movimento. É desejável que as molas apresentem deformação, no entanto, o ideal seria que a deformação fosse menor para um mesmo deslocamento e não proporcional ao movimento. Quanto menor forem as deformações nas molas quando os atuadores estiverem sujeitos a movimento, menos suscetíveis estarão as molas ao limites de deformação plástica.

Portanto, uma tentativa de buscar a formação de um plano na parte superior do MAR é aumentar a espessura do anel exterior, cujo modelo encontra-se na FIGURA 4.14. Esse aumento corresponde à adição de 6 mm de massa do mesmo material, resultando numa espessura total equivalente a 14 mm.

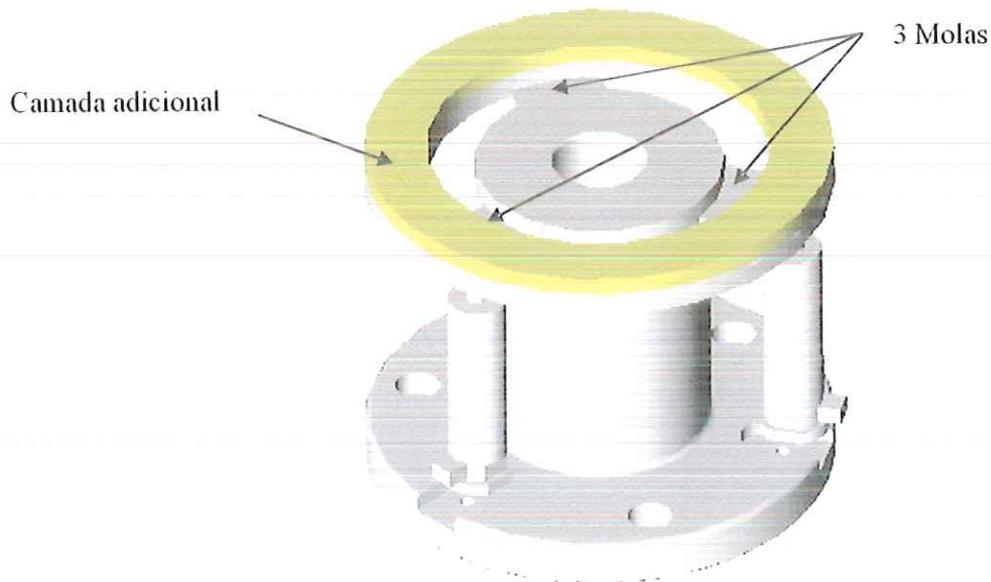


FIGURA 4.14 – MAR com aumento da espessura do anel exterior da parte superior.

Efetuada a análise com esta nova configuração, os resultados obtidos para o deslocamento na direção normal dos atuadores podem ser vistos na FIGURA 4.15.

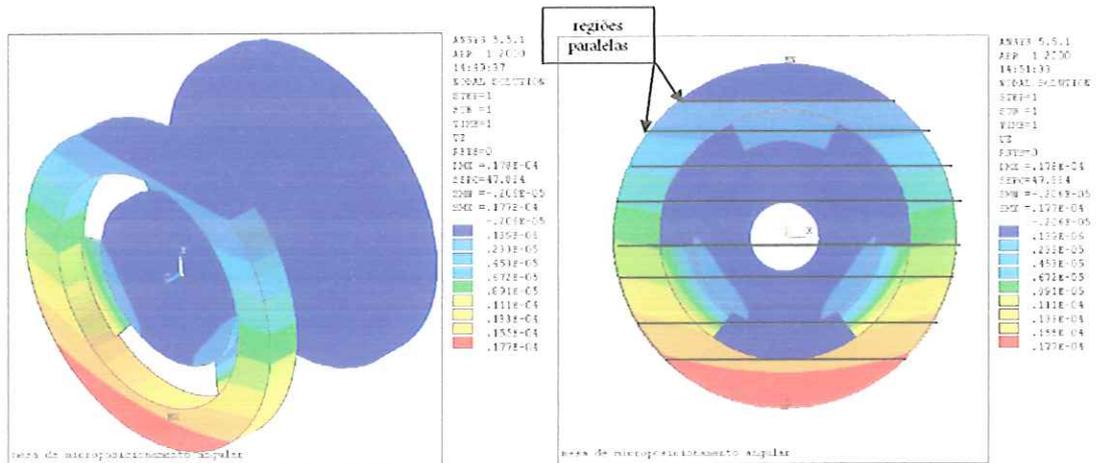


FIGURA 4.15 – Deslocamento na direção z para camada adicional de 6 mm.

Nota-se que as linhas de separação do deslocamento estão mais retilíneas que aquelas com 3 e 6 molas e espessura original. Para melhor comparação, a análise é feita com os dois casos ilustrados na FIGURA 4.16, mostrando o deslocamento para espessura original de 8 mm com 3 molas, e a outra para 14 mm de espessura final com 3 molas.

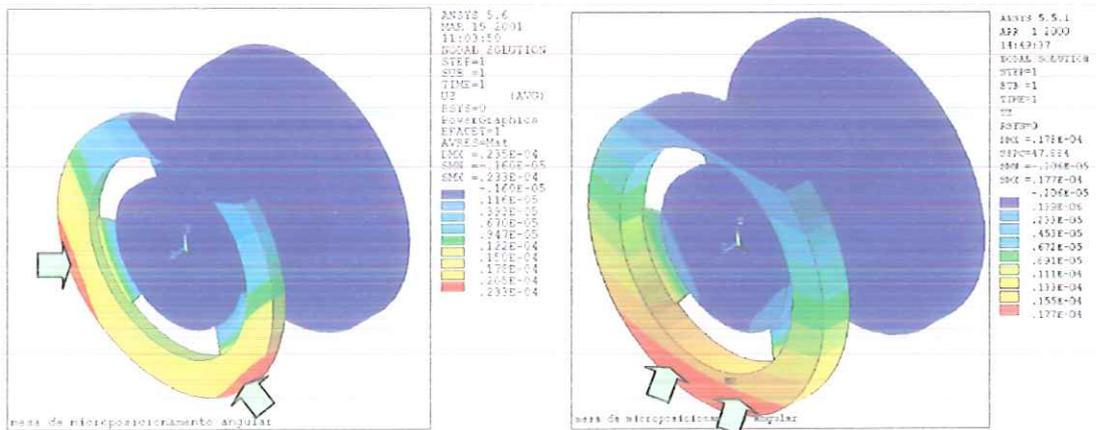


FIGURA 4.16 – Deslocamento na direção z com espessura de 8 mm e 14 mm no anel exterior.

É perceptível uma melhora na distribuição de deslocamento ao longo do anel exterior. As regiões de deslocamento estão praticamente paralelas e, portanto, as linhas de separação estão praticamente retilíneas. Tal configuração corresponde ao que se estava procurando, de modo a obter um plano em todo o anel exterior quando houver deslocamento.

A quantidade de material adicionado foi escolhida pelo método de tentativa e erro. Outras configurações foram testadas e analisadas criteriosamente uma a uma, até a obtenção da melhor

dentre elas, cujo acréscimo corresponde a 6 mm. Seguindo o raciocínio de que quanto maior a massa, maior a rigidez do sistema, possivelmente pode-se chegar ao erro de pensar que quanto maior quantidade de material for adicionada, melhores seriam os deslocamentos do anel exterior. Tal colocação é falsa, devido ao fato de que nem sempre uma maior quantidade de material pode influenciar na distribuição das deformações provocadas pelos deslocamentos. Com 6mm de espessura foi alcançado o limite máximo para a equalização na distribuição dos deslocamentos. A título de curiosidade, a FIGURA 4.17 ilustra o que ocorre quando há acréscimo de 8 mm na espessura do anel (16 mm de espessura final).

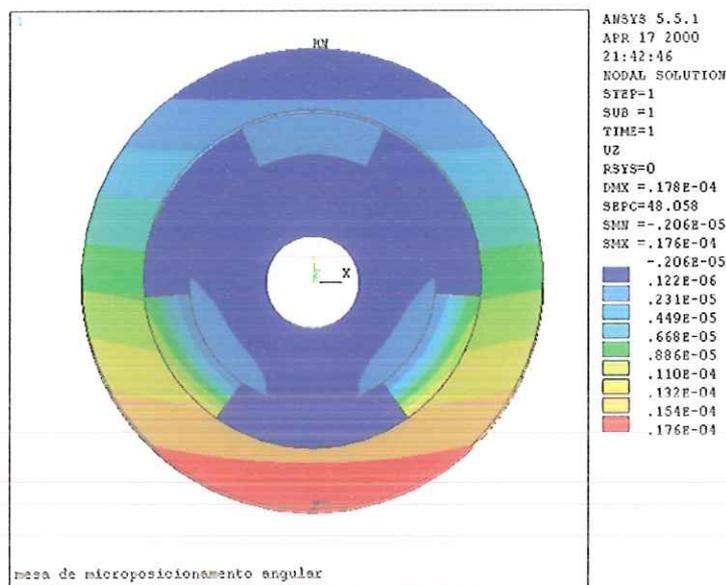


FIGURA 4.17 – Deslocamento na direção z com espessura de 16 mm no anel exterior.

Como se observa na FIGURA 4.17 o sistema manteve a mesma distribuição. Esta configuração também preenche os requisitos procurados, porém apresenta maior massa e conseqüentemente maior peso ao sistema. Por isso se optou pelo acréscimo de 6mm na espessura do anel.

Isso comprova o que SLOCUM (1992) afirma: “todos os componentes de uma máquina devem respeitar uma certa proporcionalidade no que diz respeito às suas dimensões físicas, às capacidades dos servocontroladores e dos sistemas de potência”. Muitas vezes, quando um componente é superdimensionado, tem-se aumento de custo na máquina, mas não melhora no seu desempenho. Se um componente for dimensionado aquém do correto, o restante da máquina não poderá render todo o seu potencial, e isso poderá acarretar em prejuízo, quando se diz respeito ao seu desempenho. O dimensionamento é função de qualidades estáticas e dinâmicas.

Componentes que têm bom comportamento estático, não necessariamente terão bom desempenho dinâmico.

Para a configuração com 14 mm de espessura no anel externo, as deformações e tensões distribuem-se de acordo com a FIGURA 4.18.

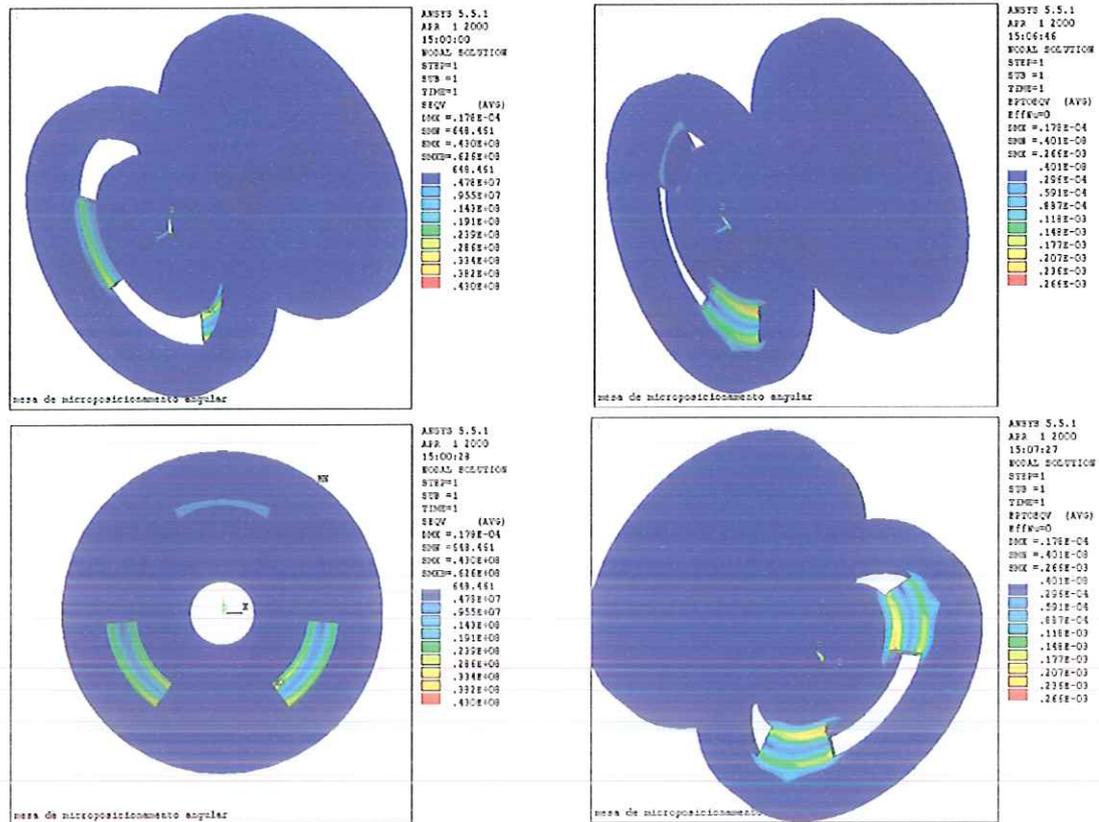


FIGURA 4.18 – Tensão [Pa] e deformação de Von Mises com anel de 14mm.

As deformações e tensões estão concentradas na região das molas como era esperado. Esta situação só tem a confirmar que o uso de três molas é a que melhor caracteriza o sistema final.

Resolvido o problema da distribuição dos deslocamentos na parte superior do anel, passa-se a questionar como seria tal distribuição quando for excitado somente um atuador piezolétrico. A FIGURA 4.19 ilustra os deslocamentos e deformações correspondentes.

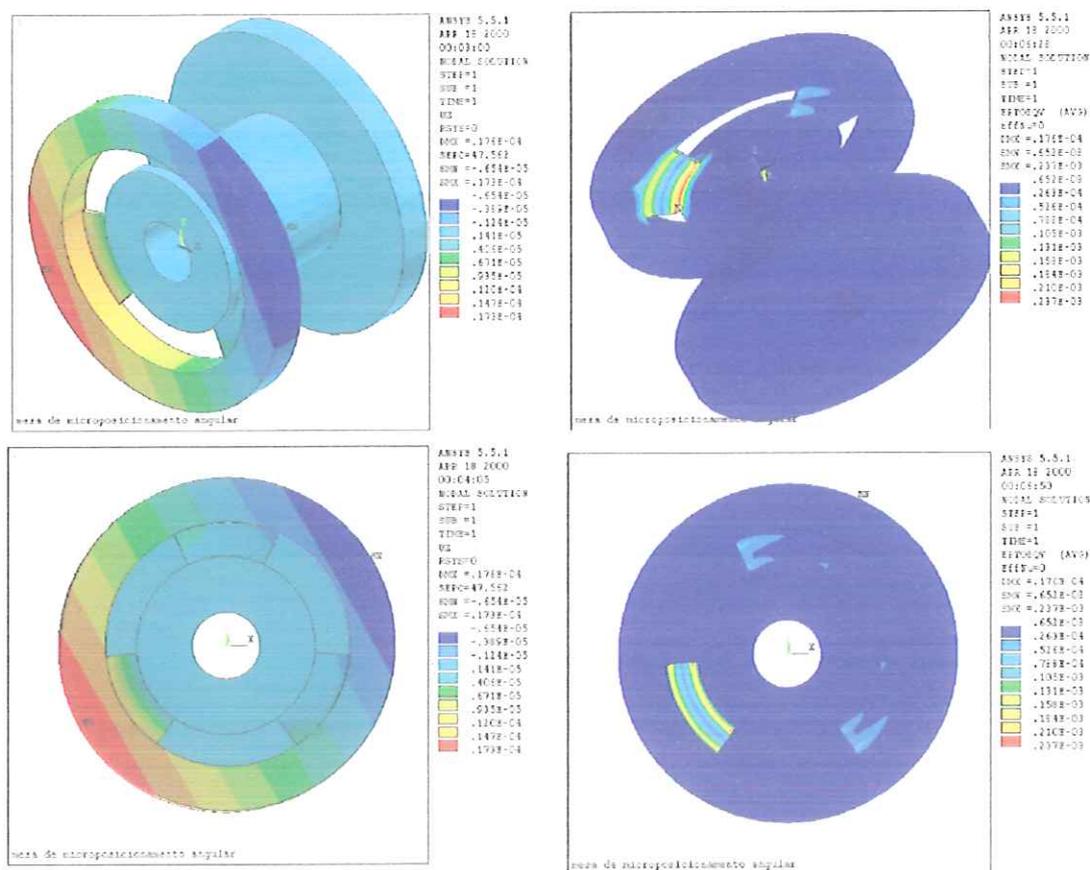


FIGURA 4.19 – Deslocamento [m] e deformação de Von Mises para um único atuador excitado.

Conforme as figuras apresentadas, o sistema confirma todo o processo de adaptação para a obtenção de um plano como reposta do sistema. Os deslocamentos estão dispostos em faixas paralelas, enquanto as deformações se restringem às molas. Portanto, o plano também é obtido quando se excita somente um atuador. Na verdade, estende-se a obtenção de um plano para qualquer outra situação que use um ou dois atuadores aplicando cargas ao anel.

#### 4.2.5. Reestruturação do Modelo

Antes de efetuar quaisquer mudanças no modelo, por exemplo, aumento da massa no anel exterior, procurou-se aprimorar o modelo estudado, já que o MEF é um método que fornece soluções aproximadas dos problemas, as quais dependem de um modelo conveniente.

O primeiro modelo (FIGURA 4.3) foi criado baseado na hipótese de que a peça a ser usinada seria fixada diretamente no elemento anular da mesa angular superior, além disso, as

análises foram feitas com um modelo onde se adotaram algumas simplificações construtivas, como a supressão de chanfros, furos e arredondamentos (FIGURA 4.4), supondo que a inclusão destes elementos incorreria em esforço computacional inútil. A FIGURA 4.20 mostra o modelo real da mesa angular superior, sem supressão de suas características geométricas.

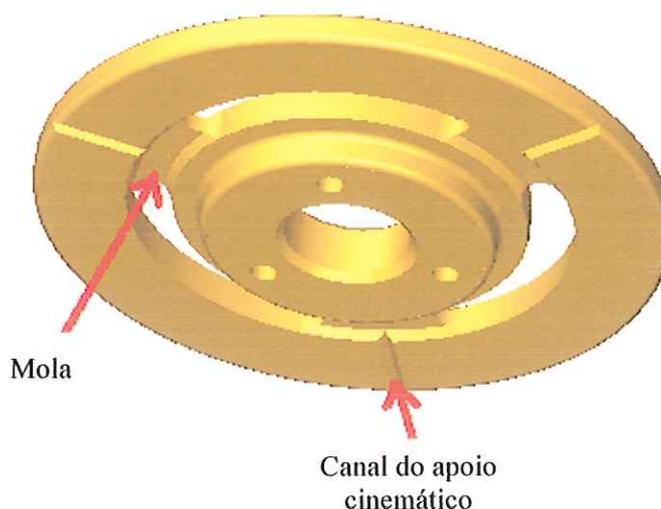


FIGURA 4.20 – Mesa angular superior.

Por meio da análise dos resultados obtidos, constatou-se que o elemento anular superior não se comportava conforme o desejado, isto é, era esperado desse modelo, que o elemento em questão se mantivesse plano quando solicitado em situações extremas. A causa da discordância com a resposta desejada pode ser atribuída à proximidade dos valores de rigidez da referida parte anular e das molas, o que provocava a sua flexão.

Sabida a causa do problema, o próximo passo foi a busca de soluções. A primeira solução encontrada foi a mudança na geometria, que implicaria adição de material na parte anular da mesa superior e redimensionamento das molas. Entretanto, antes de efetuar as mudanças geométricas pertinentes ao MAR a fim de desempenhar a sua função adequadamente, o modelo foi reconstruído e novas simulações foram realizadas. Dessa forma, os problemas apresentados anteriormente não foram estudados conjuntamente com os problemas de fixação da peça à mesa, já que um dos principais problemas encontrados no projeto do MAR consiste na fixação das peças a serem usinadas, pois o MAR não oferece nenhum mecanismo para esta finalidade. Uma alternativa é substituir a ordem do sistema, isto é, fixar o MAR no eixo-árvore do torno e fixar a placa de vácuo na parte superior do MAR. Com esta nova configuração, o meio de fixação das peças a serem usinadas permanece com o mesmo princípio do sistema original. Para isto, foram feitas algumas adaptações tanto no MAR quanto na placa de vácuo.

Para o problema de fixação foi projetada uma placa de vácuo que deveria ser fixada de alguma forma ao MAR (ver item 4.2.7.1 – Fixação do MAR ao Torno de Precisão ASG-2500). Foram estudadas várias formas de fixação, mas a mais praticável e mais eficiente foi a fixação por meio de seis parafusos dispostos de tal forma a atender as regiões de maior solicitação (FIGURA 4.21).

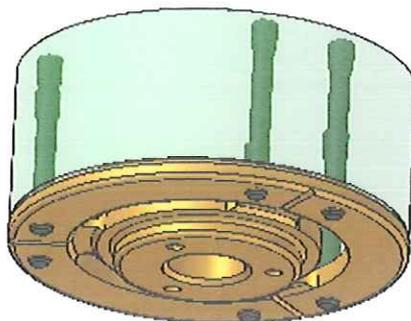


FIGURA 4.21 – Modelo de fixação da placa de vácuo ao MAR.

Analisando o problema sob esta nova óptica, deve-se mudar o foco de estudo, uma vez que a nova região a manter-se plana é a face superior da placa de vácuo. Tomando-se por hipótese que a fixação por parafusos seja feita de forma correta (apertados com o torque correto e selados com fixador anaeróbico), pode-se concluir, de início, que não haverá escorregamento relativo entre as duas peças. O atrito causado pela ação do parafuso entre as duas peças pode ser modelado unindo os nós que ocupam a mesma posição nas duas peças.

Já tendo mudado o problema, resolveu-se também suprimir algumas simplificações feitas no modelo antigo. Essas simplificações dizem respeito às molas, as quais foram modeladas anteriormente sem o raio de arredondamento previamente calculado, e a parte anular, que foi modelada sem os canais dos apoios cinemáticos. Como esses elementos são importantes para o correto funcionamento do protótipo, procurou-se, nesta reestruturação, reproduzi-los da forma mais próxima do real. Desse modo, obteve-se o modelo mostrado na FIGURA 4.22.

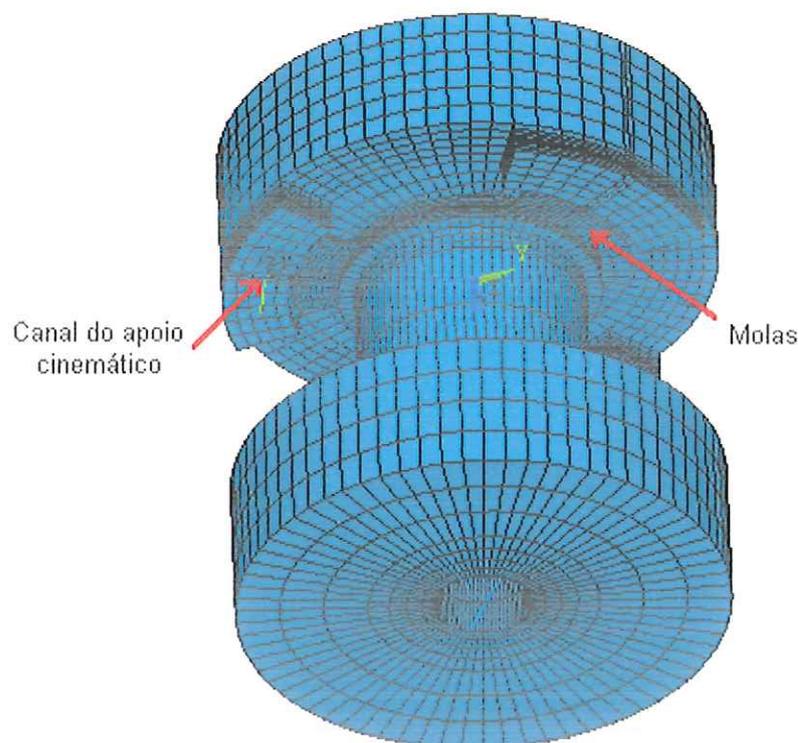


FIGURA 4.22 – Modelo reestruturado (*Software Ansys*<sup>®</sup>).

Como pode ser observado, ainda na FIGURA 4.22, foram retiradas algumas partes do anel da mesa superior. Isso foi feito com a intenção de diminuir o peso do conjunto.

O modelo mostrado já apresenta a malha. Pode-se observar ainda na FIGURA 4.21 que na região das molas e dos canais do apoio cinemático a malha apresenta-se mais fina (maior número de elementos). Isso acontece porque a forma geométrica destes elementos não permitiu que se fizessem elementos maiores. Este modelo apresenta 15.534 elementos, ao passo que o modelo antigo apresentava 14.510. Essa diferença não é causadora de muitos problemas, uma vez que o microcomputador usado tem velocidade de processamento muito alta. O tipo de elemento usado foi o *Solid 45*, com geometria hexaédrica (8 nós).

#### 4.2.5.1. Definição das Restrições e Cargas

Devem ser adicionadas restrições ao corpo para orientá-lo e fixá-lo no espaço. As restrições a serem aplicadas (FIGURA 4.23) são:

1. Fixação da base. Representa a fixação da base do MAR ao eixo-árvore do torno. Esta restrição suprime todos os graus de liberdade dos nós que estão na área da base do modelo.

2. Apoio fixo: É aplicado no canal do apoio cinemático e é orientado perpendicularmente às superfícies do canal, de modo a simular um contato esférico. O seu efeito é restringir a translação na direção Z e também a rotação em torno do referido eixo.

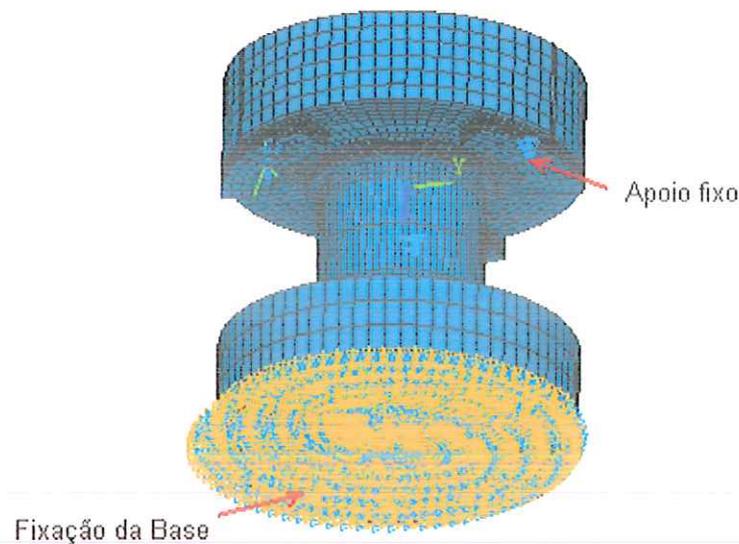


FIGURA 4.23 – Aplicação das restrições de movimento.

As cargas aplicadas resumem-se nas translações na direção de atuação dos atuadores piezelétricos. Foram feitas três simulações, cada qual com sua configuração de cargas:

1. Simulação 1: Duas cargas (na região dos atuadores) na direção de atuação (z) e com mesmo sentido, que é o sentido de atuação dos atuadores (sentido da placa de vácuo).
2. Simulação 2: Duas cargas (na região dos atuadores) na direção de atuação (z) e com mesmo sentido, que é o sentido contrário ao de atuação dos atuadores (sentido da base).
3. Simulação 3: Duas cargas, uma no sentido positivo e outra no sentido negativo de atuação do atuador.

Essa carga corresponde à translação constante de valor  $15 \mu\text{m}$ , que coincide com a metade do curso máximo de cada atuador piezelétrico.

#### 4.2.5.2. Simulações e Resultados (Análise Estática)

Nas simulações a seguir serão analisados os gráficos de deslocamento e tensão de Von Misses.

Em todas as simulações anteriores, tanto com respeito aos deslocamentos aplicados quanto às tensões obtidas, as cargas impostas afetaram a base do MAR de forma a não exigir estudos mais criteriosos nessa região. As simulações serão analisadas uma a uma.

- Simulação 1

Na FIGURA 4.24, pode ser observado o gráfico vetorial de deslocamentos nodais da situação definida como Simulação 1.

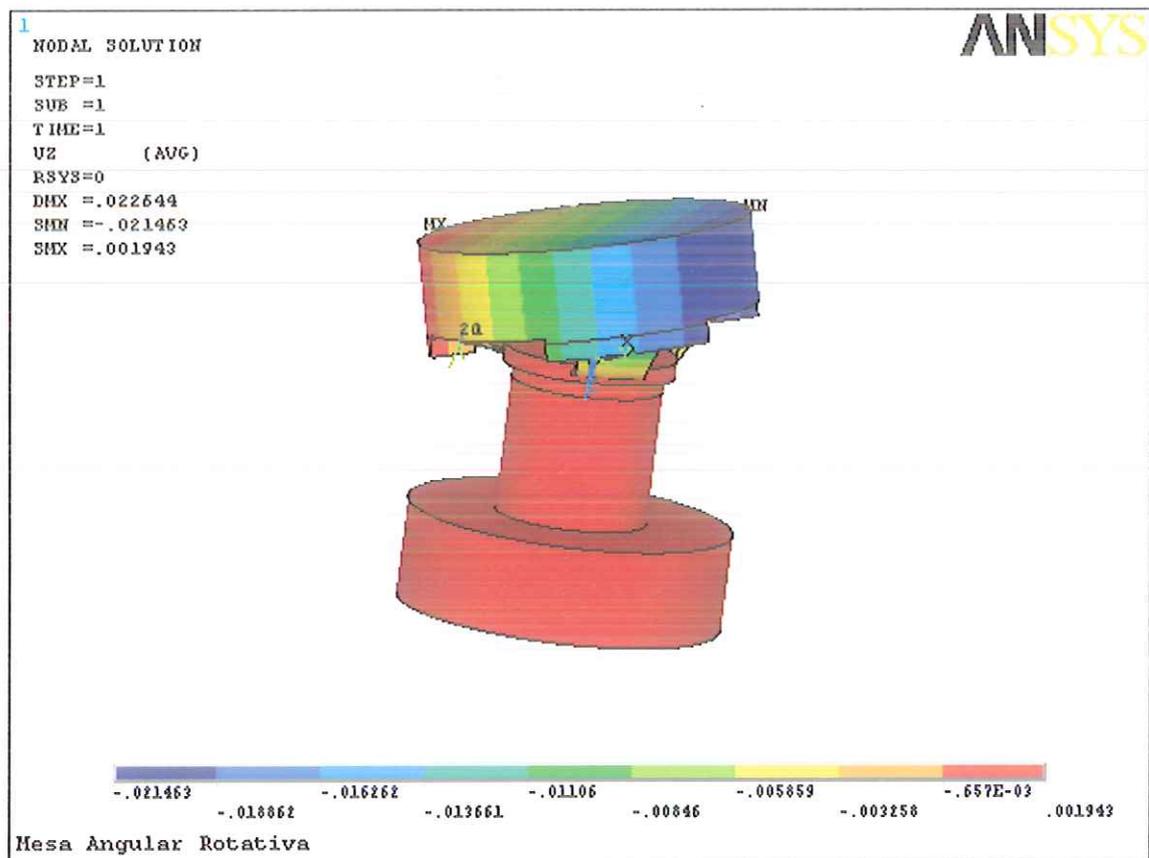


FIGURA 4.24 – Gráfico de deslocamentos nodais (direção z em mm).

Na FIGURA 4.25, pode ser observado o gráfico de deslocamentos nodais somente da região de interesse, que é a área superior da placa de vácuo. Neste gráfico, os deslocamentos são vistos com 1500 vezes de aumento. Os elementos selecionados foram posicionados de modo a mostrar a planicidade dessa região. Pode-se observar que nessa escala de aumento, não é visível nenhum desvio de planicidade.

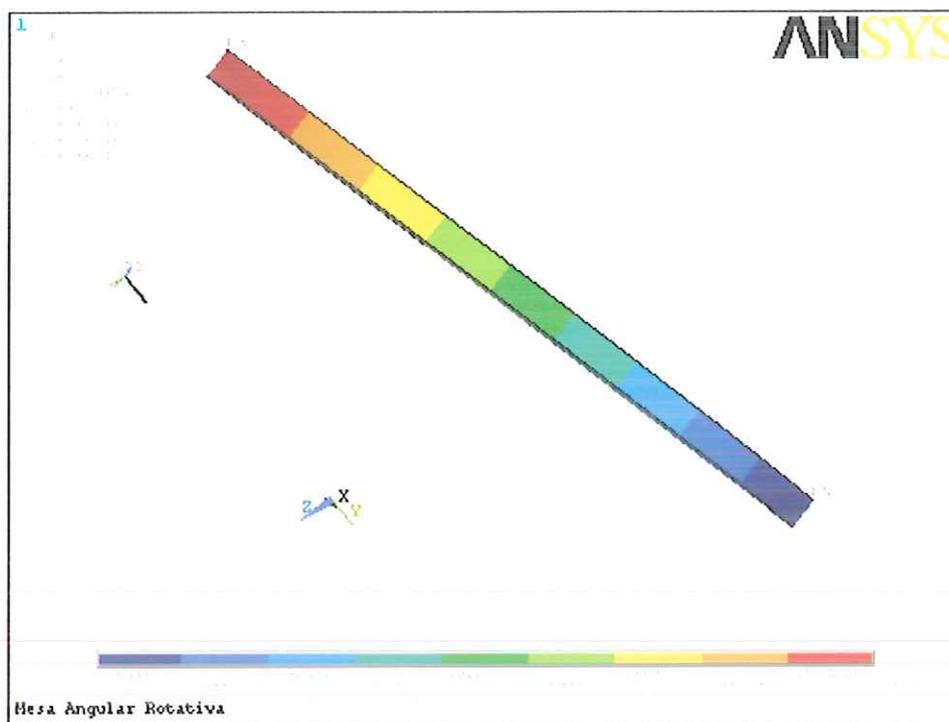


FIGURA 4.25 – Gráfico de deslocamentos nodais somente da região de interesse.

A FIGURA 4.26 mostra o gráfico de tensão de Von Mises do MAR. Verifica-se que a tensão máxima apresentada com esta configuração de cargas está na ordem de 70 MPa. Esses valores de tensão ocorrem do lado da mola que sofre tração. Sabendo que a tensão limite de comportamento do aço 1020 é da ordem de 430 MPa, tem-se para a situação da simulação um coeficiente de segurança de 6.

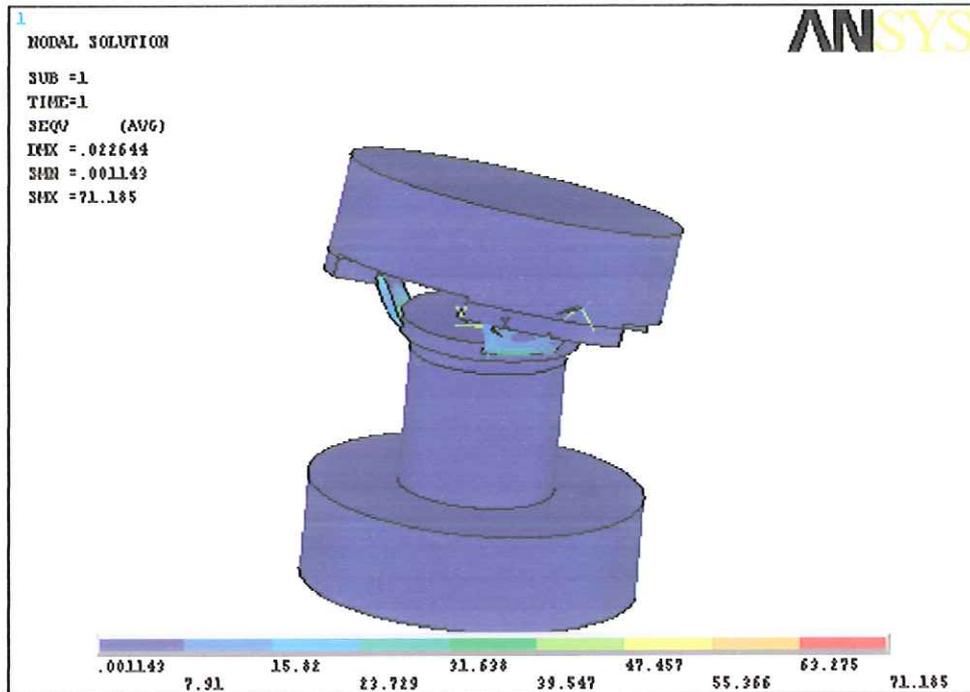


FIGURA 4.26 – Gráfico de Tensões de Von Misses [MPa].

• Simulação 2

A FIGURA 4.27 mostra o gráfico vetorial de deslocamentos nodais da situação definida como Simulação 2.

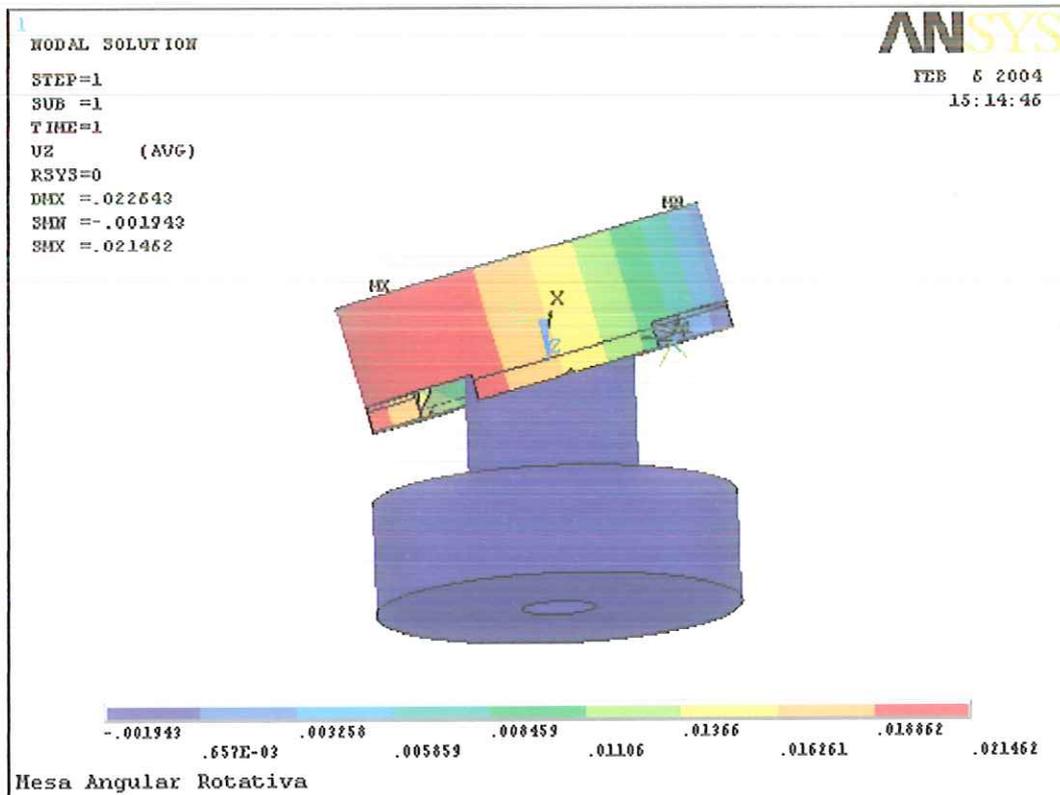


FIGURA 4.27 – Gráfico de deslocamentos nodais (direção z em mm).

Na FIGURA 4.28 pode ser observado o gráfico de deslocamentos nodais somente da região de interesse, que é a área superior da placa de vácuo.

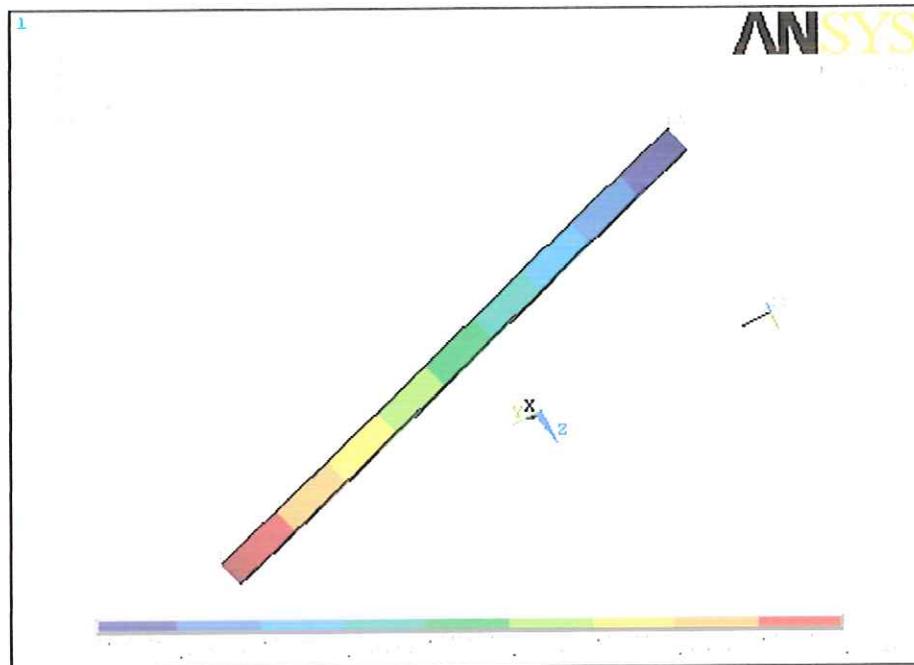


FIGURA 4.28 – Gráfico de deslocamentos nodais somente da região de interesse.

Na FIGURA 4.29 observa-se o gráfico de tensão de Von Mises do MAR.

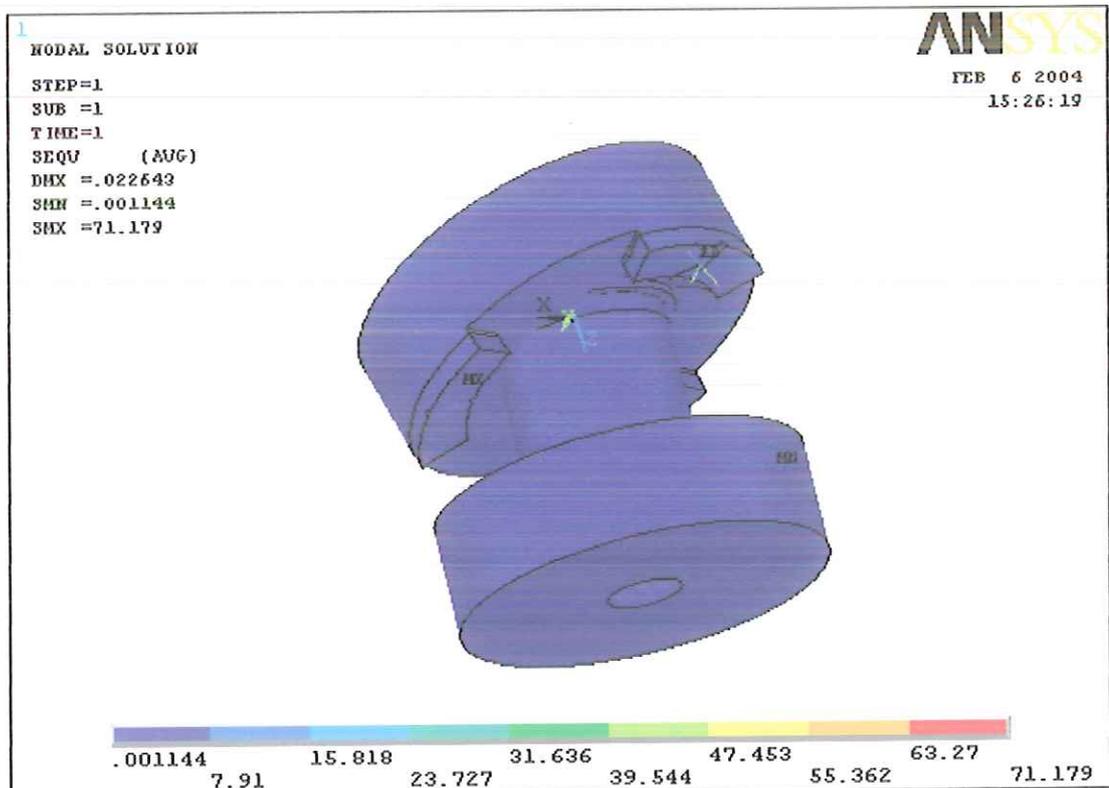


FIGURA 4.29 – Gráfico de Tensões de Von Mises [MPa].

Como na simulação 1, os deslocamentos são vistos com 1500 vezes de aumento. Pode-se observar que nessa escala de aumento, não é visível nenhum desvio de planicidade. Além disso, observa-se que a tensão máxima, ocorrendo do lado da mola que sofre tração, apresentada com esta configuração de cargas está na ordem de 70 MPa. Sabendo que a tensão limite de comportamento do aço 1020 é da ordem de 430 MPa, tem-se para a situação da simulação um coeficiente de segurança de 6.

### • Simulação 3

Na FIGURA 4.30 pode ser observado o gráfico vetorial de deslocamentos nodais da situação definida como Simulação 3.

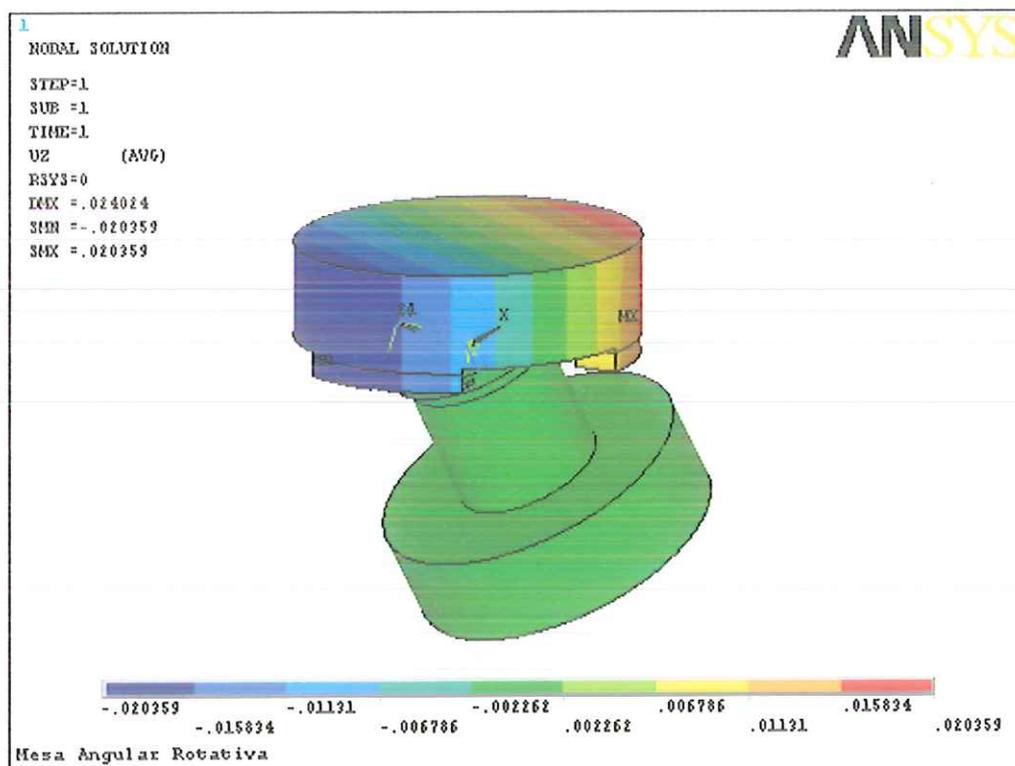


FIGURA 4.30 – Gráfico de deslocamentos nodais (direção z em mm).

Na FIGURA 4.31 pode ser observado o gráfico de deslocamentos nodais somente da região de interesse, que é a área superior da placa de vácuo. Como nas outras simulações, os deslocamentos são vistos com 1500 vezes de aumento. Pode-se observar que nessa escala de aumento, não é visível nenhum desvio de planicidade.



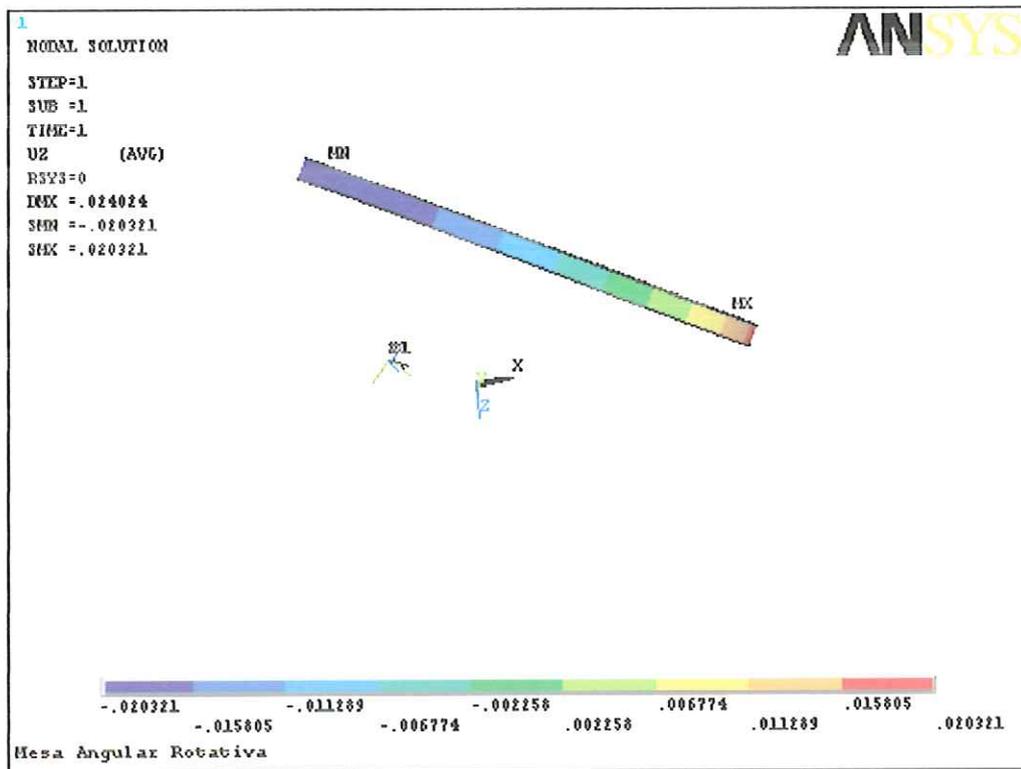


FIGURA 4.31 – Gráfico de deslocamentos nodais somente da região de interesse.

Na FIGURA 4.32, pode-se observar o gráfico de tensão de Von Misses do MAR

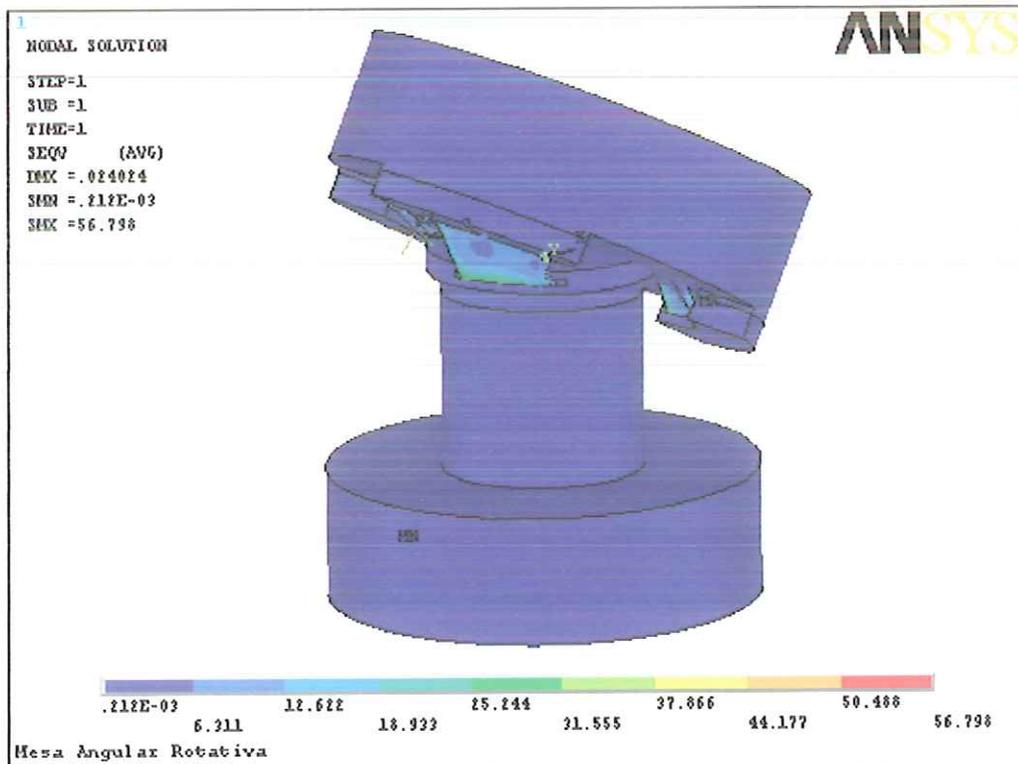


FIGURA 4.32 – Gráfico de Tensões de Von Misses [MPa].

Observando a FIGURA 4.32 verifica-se que a tensão máxima apresentada com esta configuração de cargas está na ordem de 60 MP tendo um coeficiente de segurança de 7,2. Estes valores de tensão ocorrem, novamente, do lado da mola que sofre tração.

#### 4.2.5.3. Conclusão das Análises Estáticas

Como era esperado, por serem as entradas pequenos deslocamentos, as tensões obtidas foram baixas, garantindo que o material solicitado sempre trabalhasse no regime elástico (comportamento desejado). A nova modelagem, onde se repensou o método de estudo e a própria construção do modelo, de modo que ele se aproxima mais do real, mostrou-se satisfatória.

#### 4.2.6. Identificação dos Modos de Vibrar

Para efeito de comparação com o modelo inicial proposto e aplicação de situação extrema (frequências mais baixas) foi usado somente restrição na base do modelo reestruturado, deixando livres os pontos de atuação dos atuadores. Sendo que as frequências naturais obtidas com o método *Block Lanczos* do novo modelo são vistas na TABELA 4.4.

TABELA 4.4 – Frequências naturais obtidas (*Block Lanczos*).

Modo de Vibração	Frequências Naturais [Hz]
	Método <i>Block Lanczos</i>
1°	365,16
2°	365,16
3°	506,14
4°	1338,4
5°	1544,4
6°	1544,4
7°	6988,7
8°	6989,1

Comparando os valores obtidos pode-se perceber que a faixa de frequências obtidas com o segundo modelo é muito mais ampla, apresentando como frequência mínima um valor bem baixo (365 Hz) e como valor máximo uma frequência bem alta (6989 Hz), dentre os modos de vibrar escolhidos. Essa faixa de frequências obtida para o novo modelo engloba todos os valores obtidos no modelo anterior, sendo os valores limite bem díspares.

É sabido que as frequências naturais dependem da massa, da rigidez e das restrições do sistema. Sendo que os dois modelos foram simulados com as mesmas restrições, pode-se dizer que a adição de massa em algumas regiões do MAR e a redução de massa em outras, além da própria mudança de massa, ocasionou também, mudanças localizadas de rigidez, o que explica o fato de terem ocorrido valores tão díspares na nova simulação em relação à primeira.

#### **4.2.7. Início da Implementação do Sistema de Fixação**

A fixação de peças a serem usinadas em máquinas-ferramenta é uma das fontes primárias de erros, os quais devem ser considerados em todos os projetos de processos de fabricação e, muitas vezes, é um dos mais importantes e difíceis aspectos a ser avaliado em projeto de máquina-ferramenta de ultraprecisão. Por isso, placas de fixação para máquinas de ultraprecisão devem ter características, tais que, impeçam possíveis distorções das peças (KÖNIG et al., 1991).

##### **4.2.7.1. Fixação do MAR ao Torno de Precisão ASG-2500**

Para implementar esta adaptação foi realizado um estudo sobre sistemas de fixação em máquinas-ferramenta de ultraprecisão (Apêndice III). A maneira mais apropriada de fazer as substituições do sistema sem alterar as características da máquina ASG 2500 e verificando a possibilidade de mudanças geométrica no MAR, consiste em reproduzir a placa de vácuo existente, alterando somente o necessário.

Alterações geométricas foram feitas na parte inferior do MAR, já que é necessário que o fluxo de ar seja transmitido até a superfície da placa onde será colocada a peça a ser usinada. Desta forma, foram executadas canaletas em toda a estrutura inferior do MAR. Nessas canaletas estarão os tubos condutores, responsáveis pela condução do fluxo de ar até a superfície, como mostra a FIGURA 4.33.

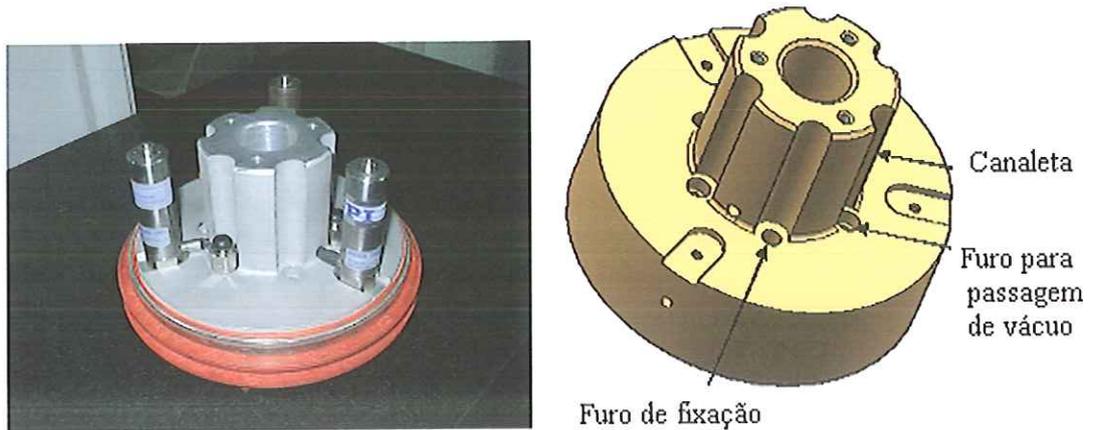


FIGURA 4.33 – MAR com a parte inferior modificada.

O passo seguinte foi o projeto da placa de vácuo. Como já foi dito, para não mudar quaisquer característica da máquina, o projeto desta placa de vácuo é muito similar ao da placa já existente na máquina.

De modo simplificado, a placa de vácuo original da máquina ASG 2500, tem a mesma estrutura que a mostrada na FIGURA 4.34. As medidas dos canais da placa original foram respeitadas. O que se fez foi adaptar a placa às dimensões do MAR. No novo projeto, a placa tem diâmetro menor, assim como a altura. O modelo 3D desta placa em corte pode ser visto na FIGURA 4.34, onde pode ser visto o mecanismo de distribuição do fluxo de ar. O sistema de fixação á vácuo consiste, de forma simplista, do seguinte modo: fluxo de ar entra pelo orifício de entrada, onde é conduzido ao canal de comunicação. Daí, passa pelo canal de comunicação central. A função desse canal é centralizar o fluxo, de modo que no canal de distribuição, o fluxo seja distribuído do centro para a periferia. Uma vez nesse canal, o fluxo é conduzido em canais menores, chamados de canais condutores, para as canaletas de distribuição. A peça a ser fixada fica em contato com a superfície externa das canaletas, onde com a passagem do fluxo é fechado o circuito de fixação.

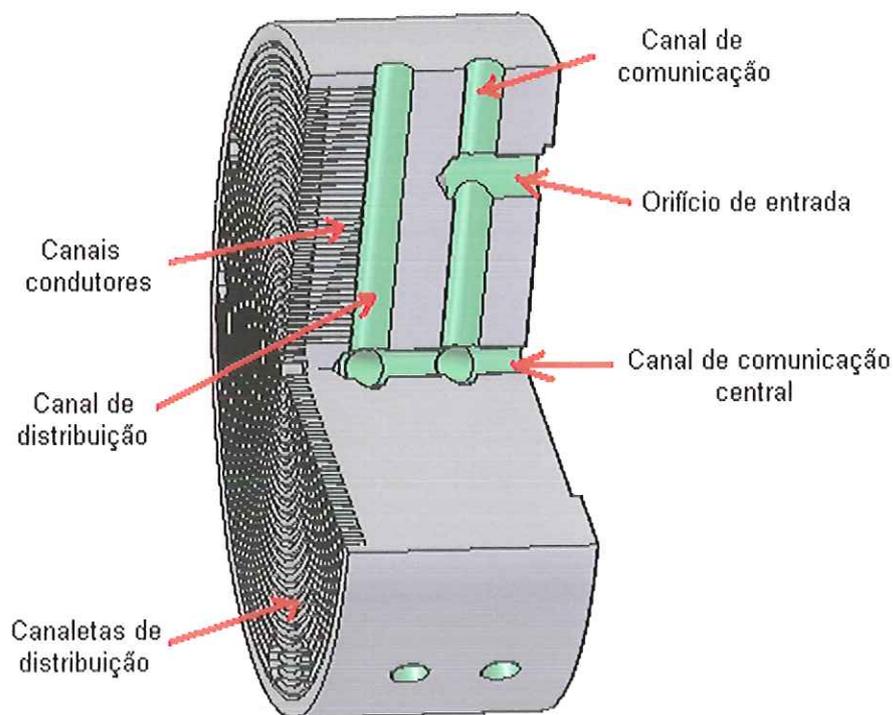


FIGURA 4.34 – Caminho percorrido pelo fluxo.

Nos orifícios de entrada são usados conectores para fixação de tubos flexíveis. Os canais de comunicação e comunicação central são selados hermeticamente. O canal de distribuição é inteiramente roscado, permitindo ajustar a área de contato da placa por meio de parafusos, o que proporciona a fixação de peças com diâmetro menor que o da placa de vácuo.

Para a fixação da placa de vácuo ao MAR, são necessárias mudanças na mesa superior. Essas mudanças consistem na execução de furos no anel exterior da parte superior do MAR, os quais podem ser vistos na FIGURA 4.35 e a montagem completa do MAR, com a adição dos acessórios de fixação e placa de vácuo, pode ser vista na FIGURA 4.36.

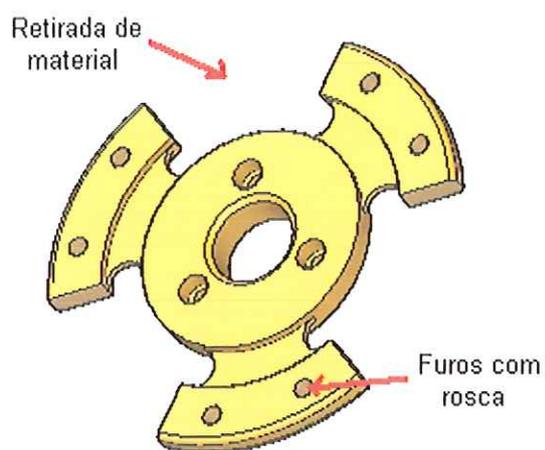


FIGURA 4.35 – Modificações feitas na mesa angular superior.

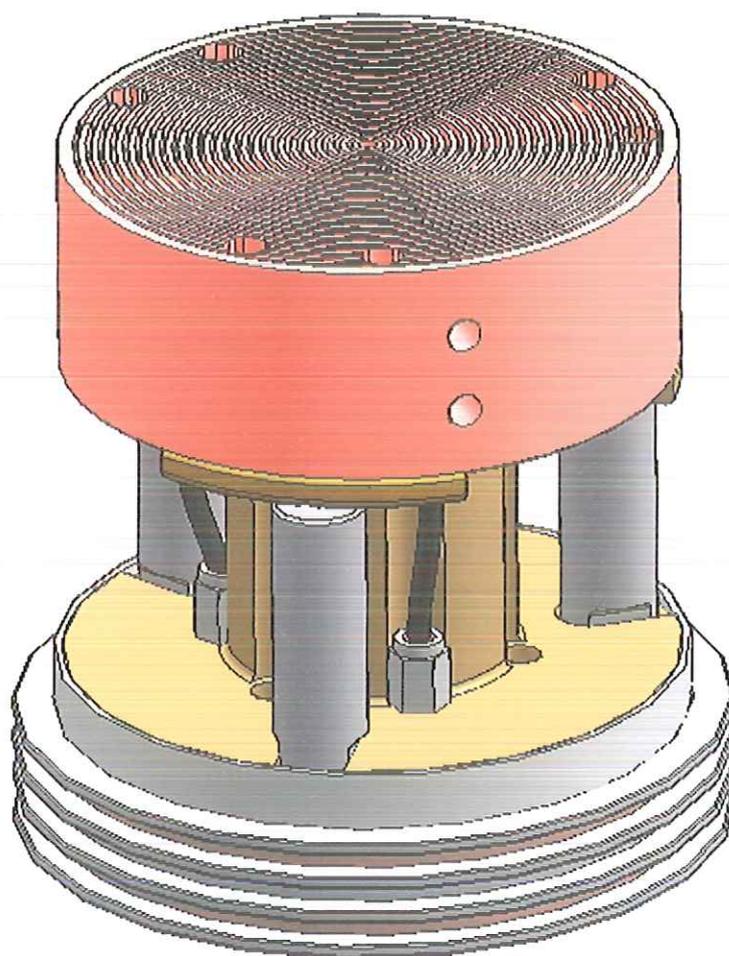


FIGURA 4.36 – Modelo do MAR com conectores e placa de vácuo.

### 4.3. Testes Experimentais

A obtenção de dados experimentais tem como objetivo primordial a avaliação do protótipo e sua consequente validação em sistemas de posicionamento de elevada precisão, como por exemplo, na usinagem de ultraprecisão.

Como já mencionado anteriormente, a posição angular do MAR será obtida com base nas equações cinemáticas apresentadas no Capítulo 3, que tem como objetivos principais, permitir a síntese e avaliação do sistema proposto. Para tanto, inicialmente, foram estabelecidos quais seriam os atuadores **A**, **B** e **C**, como pode ser visto na FIGURA 4.37. A escolha dos atuadores **A** e **B** e do ponto fixo como atuador **C** foi feita de modo a facilitar os cálculos.

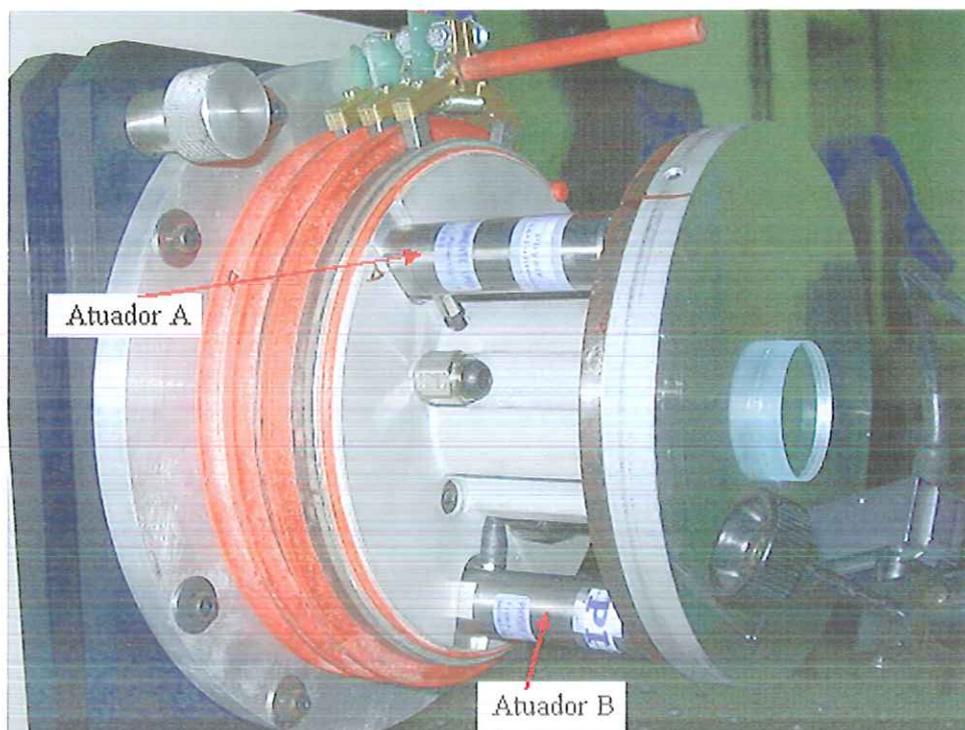


FIGURA 4.37 – Posição dos atuadores segundo equações cinemáticas.

O primeiro teste consistiu em aplicar tensão, separadamente, em cada um dos atuadores **A** e **B** e observar seus deslocamentos, respectivamente. Os testes foram repetidos cinco vezes e os valores médios encontrados para os deslocamentos podem ser vistos na TABELA 4.5.

Analisando a TABELA 4.5 observa-se que os atuadores movimentam-se na faixa de 30  $\mu\text{m}$  para as respectivas variações de tensões aplicadas, respeitando, desta forma, os limites estabelecidos para o curso máximo dos atuadores piezelétricos.

TABELA 4.5 – Deslocamento nos atuadores A e B.

Tensão [V]	Deslocamento [ $\mu\text{m}$ ]	
	Atuador A	Atuador B
50	0,8	0,8
100	3,0	4,0
150	5,0	5,0
200	7,0	7,0
250	8,0	9,0
300	10,0	11,0
350	11,0	12,0
400	13,0	14,0
450	16,0	15,0
500	17,0	18,0
550	20,0	20,0
600	22,0	22,0
650	24,5	24,0
700	26,0	25,0
750	29,0	28,0
800	30,0	30,0

Pelos gráficos da FIGURA 4.38 verifica-se o comportamento dos atuadores A e B quando aplicada uma determinada tensão.

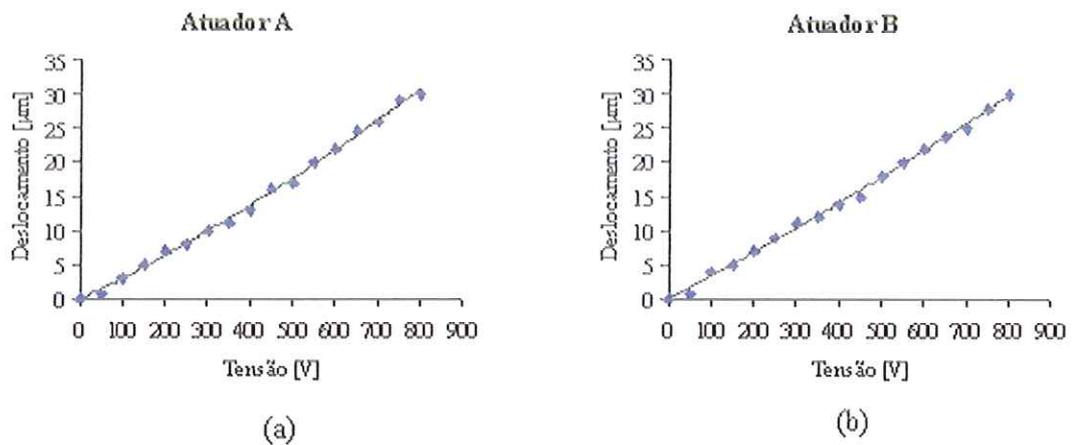


FIGURA 4.38 – Gráfico Tensão x Deslocamento – (a) Atuator A; (b) Atuator B.

Constata-se que o comportamento é não linear, característica intrínseca de atuadores piezelétricos. Além disso, pode-se comparar os valores medidos dos atuadores usados (P.410-30 da PHYSIK INSTRUMENTE<sup>®</sup> (1992)) com os valores fornecidos em catálogo pelo fabricante, atestando os resultados.

Com a finalidade de obter o deslocamento no ponto central do MAR quando os atuadores piezelétricos fossem acionados, o sensor de medição LVDT foi fixado nessa posição (centro do MAR). Desse modo, foram aplicadas tensões nos atuadores e os valores de deslocamentos correspondentes a cada tensão aplicada são vistos na TABELA 4.6.

TABELA 4.6 – Deslocamento no centro do MAR.

Tensão [V]	Deslocamento no centro do MAR [ $\mu\text{m}$ ]	
	Atuador A acionado	Atuador B acionado
50	0,2	0,2
100	0,5	0,5
150	0,8	1,5
200	1,0	2,5
250	1,5	5,0
300	1,8	6,4
350	2,5	11,0
400	2,8	17,2
450	3,7	25,5
500	4,1	30,3
550	5,5	36,6
600	6,8	44,5
650	8,0	55,0
700	9,0	61,8
750	11,0	75,0
800	14,5	84,0

O gráfico da FIGURA 4.39 ilustra de maneira esclarecedora o comportamento do ponto central do MAR. Nota-se que há diferença entre o deslocamento no ponto central quando os atuadores A e B estão acionados.

### Deslocamento no centro do MAR

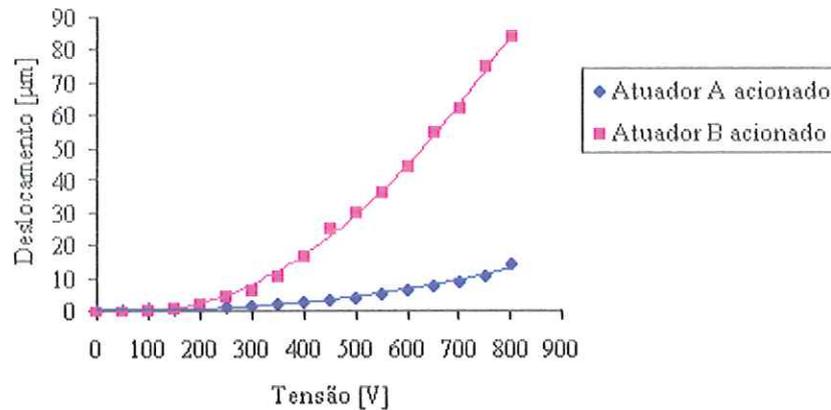


FIGURA 4.39 – Deslocamento do MAR.

A superfície óptica de vidro foi colada sobre o disco de alumínio, que por sua vez foi colado ao MAR. Ao efetuar o processo de colagem do vidro óptico sobre a superfície de alumínio pode ter havido um erro de alinhamento entre centros e esse desvio pode ter contribuído com a diferença de deslocamento encontrada. Além disso, outros fatores importantes que podem ter colaborado com a diferença encontrada são atribuídos às irregularidades da camada adesiva e a erros de fabricação, como por exemplo, os centros de apoio dos atuadores piezelétricos com relação ao centro do MAR.

Como este trabalho tem o propósito de avaliar o uso de técnicas de reconhecimento de imagens interferométricas associadas ao uso de técnicas inteligentes de identificação e controle, procurou-se trabalhar com os dados coletados. Se, por meio do algoritmo de reconhecimento proposto, houver sucesso na busca de solução, propõe-se para que faça a mesma análise quando o MAR estiver adaptado ao torno de ultraprecisão, pois como discutido e apresentado anteriormente, haverá mudanças no protótipo analisado e na forma de fixação da peça. Isto é, a placa de fixação a vácuo, sistema que eliminará os erros causados pelas irregularidades da camada adesiva (interfere na planicidade do conjunto) e garantirá a centragem e fixação da peça a ser usinada, cuja superfície será responsável pela reflexão da luz LASER do interferômetro, estará presa de forma precisa sobre o MAR, assegurando assim, o alinhamento entre centros do sistema. Não obstante, os erros de fabricação podem ser minimizados dentro de uma faixa adequada, fazendo-se medições e correções pertinentes ao sistema. Enfim, conhecidas as fontes de erros, pode-se eliminá-las e/ou atenuá-las de forma que, tais correções implicarão na obtenção de um resultado mais próximo do desejado, isto é, deslocamento similar no ponto central do MAR quando acionado o atuador A ou o atuador B.

A partir dos valores obtidos puderam ser calculados os valores dos ângulos correspondentes a cada tensão aplicada, segundo equações cinemáticas apresentadas por

MONTANARI (1999), já que existe uma correspondência única das saídas com relação às entradas dos atuadores piezelétricos.

Para a obtenção dos ângulos foram feitas algumas considerações:

- Quando a tensão é aplicada ao atuador **B**, não há deslocamento sobre o atuador **A** e sobre o ponto fixo **C**;
- Quando a tensão é aplicada ao atuador **A**, não há deslocamento sobre o atuador **B** e sobre o ponto fixo **C**;
- Quando a tensão é aplicada ao atuador **B**, assume-se que o ângulo  $\theta_2$  seja igual a zero. Como o atuador **B** está sobre o eixo **Y**, não há giro com relação a esse eixo, ou seja, o atuador **B** movimenta-se de acordo com a variação do ângulo  $\theta_1$ .

Sendo assim, os valores calculados para as variações angulares quando acionados os atuadores **A** e **B**, podem ser encontrados na TABELA 4.7.

TABELA 4.7 – Variação angular.

Tensão [V]	Variação angular [graus]		
	Atuador A acionado		Atuador B acionado
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_1$
50	$9,30 \cdot 10^{-5}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$9,55 \cdot 10^{-4}$
100	$2,34 \cdot 10^{-4}$	$4,13 \cdot 10^{-3}$	$6,68 \cdot 10^{-3}$
150	$3,85 \cdot 10^{-4}$	$6,84 \cdot 10^{-3}$	$6,20 \cdot 10^{-3}$
200	$4,75 \cdot 10^{-4}$	$9,37 \cdot 10^{-3}$	$9,07 \cdot 10^{-3}$
250	$7,14 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$
300	$8,50 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^{-2}$
350	$1,22 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$2,20 \cdot 10^{-2}$
400	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$1,90 \cdot 10^{-2}$	$2,98 \cdot 10^{-2}$
450	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$2,38 \cdot 10^{-2}$	$3,87 \cdot 10^{-2}$
500	$1,93 \cdot 10^{-3}$	$2,55 \cdot 10^{-2}$	$4,61 \cdot 10^{-2}$
550	$2,58 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-2}$	$5,41 \cdot 10^{-2}$
600	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$3,55 \cdot 10^{-2}$	$6,35 \cdot 10^{-2}$
650	$3,78 \cdot 10^{-3}$	$4,02 \cdot 10^{-2}$	$7,54 \cdot 10^{-2}$
700	$4,34 \cdot 10^{-3}$	$4,36 \cdot 10^{-2}$	$8,29 \cdot 10^{-2}$
750	$5,28 \cdot 10^{-3}$	$5,02 \cdot 10^{-2}$	$9,84 \cdot 10^{-2}$
800	$6,87 \cdot 10^{-3}$	$5,71 \cdot 10^{-2}$	$10,89 \cdot 10^{-2}$

A FIGURA 4.40 mostra as curvas características das variações angulares em relação aos ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  quando o atuador A é acionado.

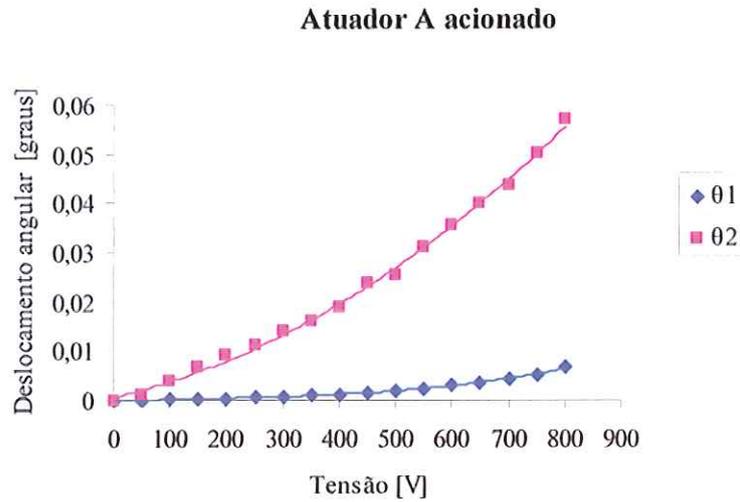


FIGURA 4.40 – Gráfico da variação angular – Atuador A acionado.

Analisando a FIGURA 4.41 observa-se a curva característica da variação angular em relação ao ângulo  $\theta_1$ , já que  $\theta_2$  é tomado como zero, quando o atuador B é acionado.

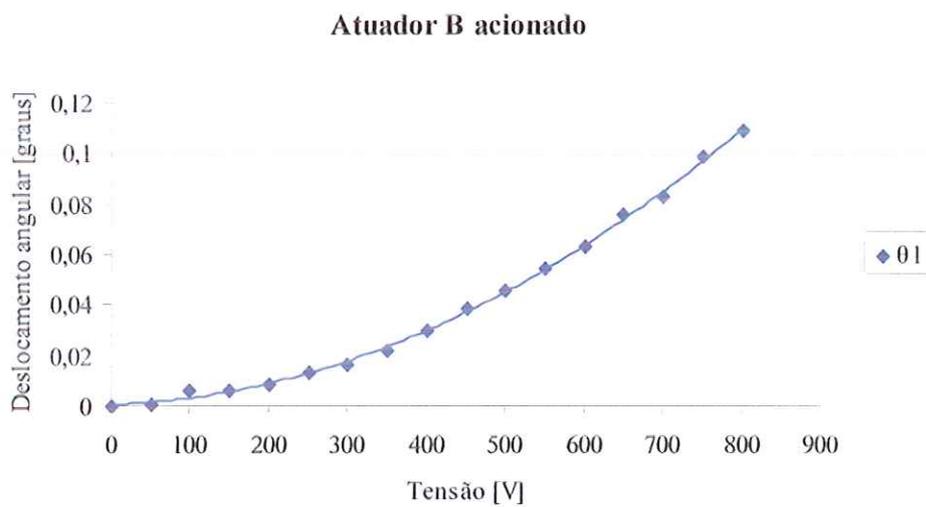


FIGURA 4.41 – Gráfico da variação angular – Atuador B acionado.

Constatou-se que a variação angular obtida para cada atuador foi diferente. Há um limite de tensão a ser aplicado nos atuadores piezelétricos, não podendo atingir os 800 V. (valor onde ocorre o máximo deslocamento dos atuadores). Os valores máximos de tensão a serem aplicados nos atuadores **A** e **B** são diferentes, sendo que, acima desse limite é impossível tratar as imagens, diferenciando as franjas interferométricas. Assim, não se trabalhará com o deslocamento máximo permitido dos atuadores, pois as franjas sobrepõem-se umas as outras, causando um borrão na imagem, como mostra a FIGURA 4.42.

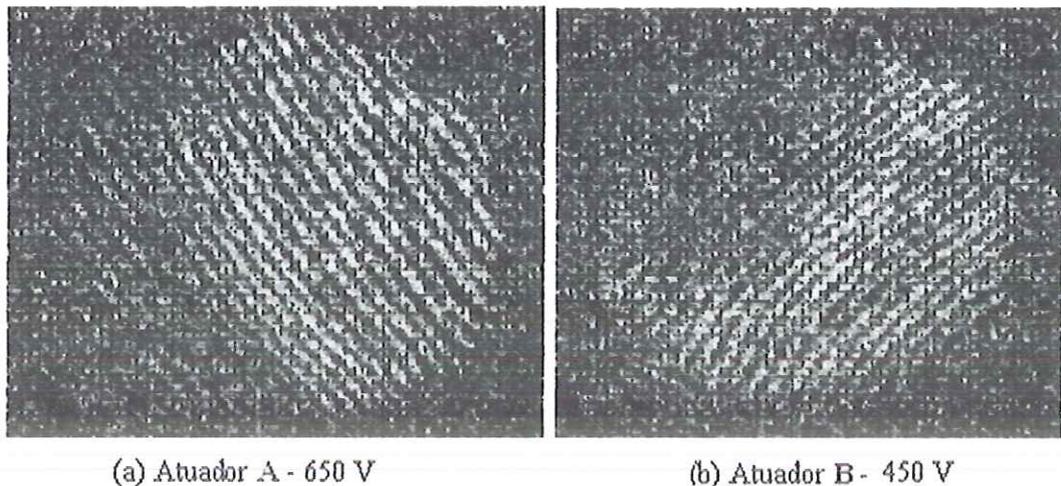


FIGURA 4.42 – Tensões limitantes para cada atuador.

Os valores máximos obtidos foram de 600 V ( $3,24 \cdot 10^{-3}$  graus) e 400 V ( $2,98 \cdot 10^{-2}$  graus) para os atuadores **A** e **B**, respectivamente.

Isso acontece, provavelmente, porque quando os atuadores são acionados, a posição central desvia-se do foco LASER, não sendo possível efetuar a medição da superfície da peça, originando as franjas interferométricas.

Com relação a diferença entre os valores para cada atuador, pode-se justificar pela posição dos atuadores no MAR e a posição do vidro óptico no centro do MAR. As próprias equações cinemáticas são diferentes para os atuadores **A** e **B** e os deslocamentos do ponto central do MAR, quando acionados os atuadores **A** e **B**, também apresentam discrepâncias (FIGURA 4.39). Além disso, todos os testes experimentais foram realizados em um laboratório com temperatura regulada, sobre uma mesa com amortecedores pneumáticos, no entanto, como o sistema LASER é muito sensível, pode ter havido interferências de vibrações do ambiente e ainda, as tensões de alimentação dos circuitos eletrônicos estão sujeitas às flutuações devido a possíveis variações de tensão da rede nas adjacências do laboratório.

Admitindo-se que os resultados obtidos descrevem realmente as características do sistema e sabendo-se a relação existente entre tensão e deslocamento angular, pôde-se mapear o problema por meio dos padrões de franjas interferométricas obtidos para cada condição de contorno. Nesse trabalho, procurou-se inovar, tratando as franjas interferométricas como uma imagem e analisando essa imagem como um todo, sem preocupação de como as franjas são calculadas e/ou contadas pelo interferômetro. Para tanto, é necessário fazer a aquisição e o processamento dessas imagens.

### 4.3.1. Aquisição e Processamento de Imagens

Para a etapa de processamento de imagens, optou-se por trabalhar com o *software* LabVIEW<sup>®</sup>, que permite uma diminuição considerável no tempo de desenvolvimento e é capaz de gerenciar os eventos com uma interface usuário de fácil compreensão. Isso é possível graças ao uso de bibliotecas de funções e sub-rotinas disponíveis no ambiente de programação. Essas bibliotecas permitem, entre outros, a implementação direta de funções de aquisição, análise, apresentação e armazenagem de dados (RUBIO, 2000).

Inicialmente, as franjas interferométricas geradas foram capturadas pela placa de aquisição de imagens, com resolução de 640x480 pontos. A imagem digital se aproximaria mais da imagem real se a resolução fosse maior, no entanto essa é a máxima resolução permitida pelo *software* de aquisição de imagem usado. A imagem interferométrica obtida possui 8 *bits*, tornando rápida a transferência de dados e facilitando o armazenamento.

A imagem capturada foi transformada numa matriz binária e armazenada, já que a binarização auxilia no dimensionamento de regiões e cria a separação entre os elementos em estudo e o fundo da imagem. Essa matriz será a entrada da rede neural artificial.

No entanto, antes da imagem ser transformada nessa matriz binária, houve um processamento. Em muitas situações, os padrões de imagens são corrompidos pela adição de ruído e/ou funções contendo informações significantes que não são essenciais à classificação do processo. Em muitos dos problemas ocorridos na realidade, é possível somente a classificação após o pré-processamento de dados. O objetivo do processamento é encontrar o melhor meio de ajustar os erros enquanto os dados são comparados. O método de processamento usado foi o de comparação *pixel* por *pixel*. Tal método foi escolhido por apresentar características favoráveis ao estudo, como compatibilidade de processamento em tempo real e necessidade de baixa quantidade de dados para classificação da imagem (FAGETH, ALLEN & JÄGER, 1996). No caso desse trabalho, houve necessidade de executar o pré-processamento, principalmente, para

averiguar como se comportariam as imagens, quando aplicadas as mesmas condições. Os passos seguidos estão ilustrados pelo fluxograma, como mostra a FIGURA 4.43.

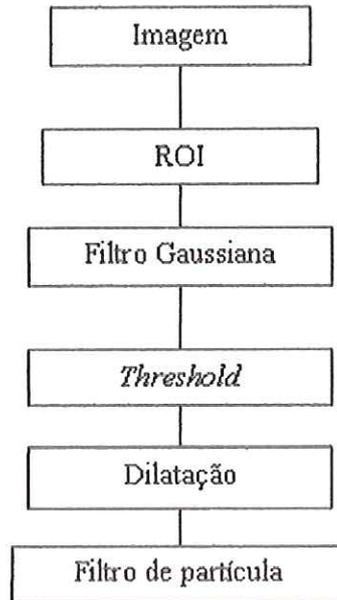


FIGURA 4.43 – Fluxograma de pré-processamento da imagem.

A princípio, foi selecionada a região de interesse (ROI), isto é, a região onde estão concentradas as franjas interferométricas, onde ocorrerá o processamento. Normalmente, nas técnicas de processamento de imagens sempre são encontrados problemas no tratamento das bordas da imagem. A criação de regiões de interesse faz com que apareçam também problemas nessas regiões. Com o intuito de contornar esse problema foi selecionada uma área um pouco além dos limites da região onde se deseja estudar. Optou-se por selecionar uma região de interesse porque o *software* de aquisição, quando captura a imagem, traz consigo toda a tela do monitor do interferômetro. Essa imagem, quando transformada numa matriz binária, gera uma matriz com 640 colunas e 480 linhas. Por isso, para tornar o processo de reconhecimento de imagens mais rápido, faz-se a seleção da região, cuja matriz binária obtida possui 308 colunas e 308 linhas. A região de interesse selecionada pode ser vista na FIGURA 4.44(a) e (b). A fim de remover os ruídos e resíduos nas imagens a serem analisadas (considera-se ruído qualquer alteração ou modificação indesejável nos valores dos *pixels* e, resíduos são *pixels* que não fazem parte do objeto ou região de interesse) foi usada uma técnica de filtragem. Entre os diversos tipos de técnicas de filtragem, a melhor, para esse caso, foi a aplicação do filtro da Gaussiana, que suaviza a intensidade de brilho nos *pixels* vizinhos aos *pixels* de interesse, neste caso, melhorando o contorno das franjas interferométricas. A FIGURA 4.44(b) mostra a aplicação do filtro da Gaussiana numa imagem com franjas interferométricas.

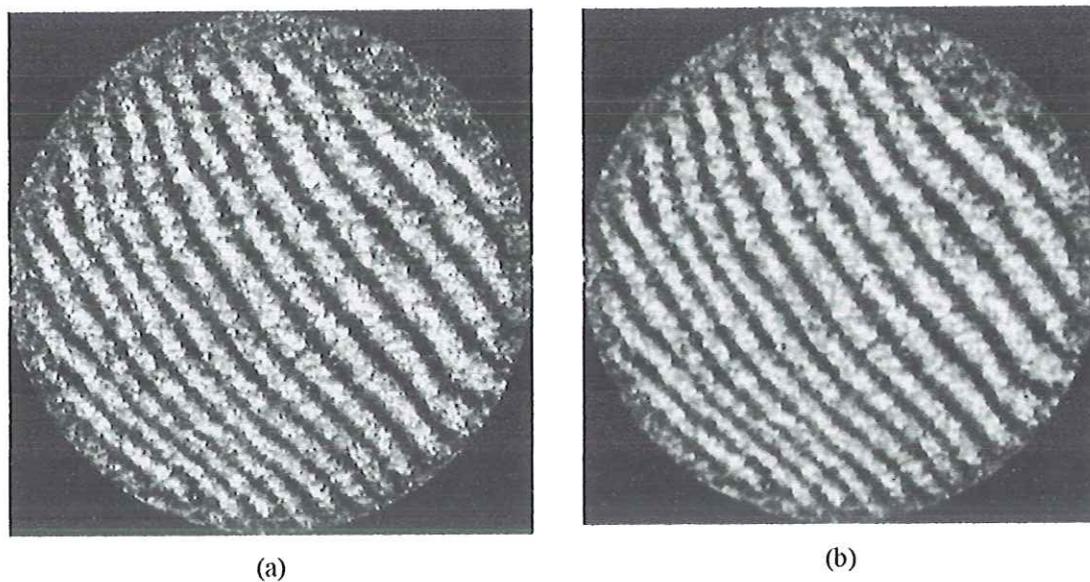


FIGURA 4.44 – Exemplo de imagem de franjas interferométricas depois de selecionada a ROI – (a) antes da filtragem; (b) após a filtragem.

O *threshold* foi aplicado em seguida a fim de contrastar as franjas com o fundo da imagem, como mostra a FIGURA 4.45. Quando há essa nítida diferença é possível contar o número de franjas.

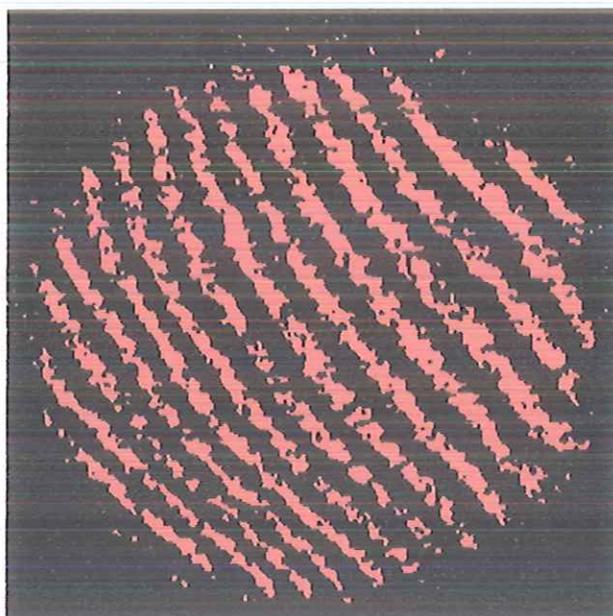


FIGURA 4.45 – Exemplo de imagem de franjas interferométricas depois do *threshold*.

No entanto, observando a FIGURA 4.45 atentamente, verifica-se que há descontinuidades nas franjas interferométricas onde, muitas vezes, aparecem obstruídas. Para contornar esse problema foi aplicada uma função morfológica, no caso, a dilatação. Observando a FIGURA 4.46 e comparando-a com a FIGURA 4.45, nota-se que depois da dilatação, os pontos expandem-se, diminuindo o espaço entre eles, tornando as franjas interferométricas mais contínuas, facilitando a análise.

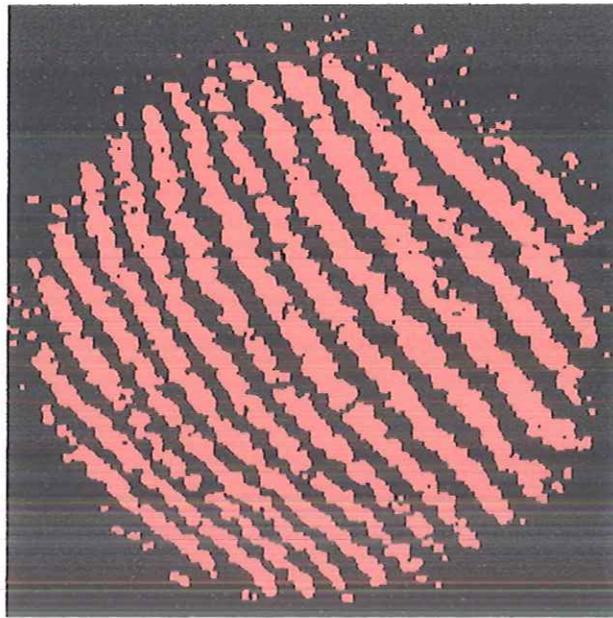


FIGURA 4.46 – Exemplo de imagem de franjas interferométricas depois da dilatação.

Analisando a FIGURA 4.46 verifica-se que há pontos que podem interferir na contagem das franjas e são desnecessários. Então, finalmente, aplicou-se um filtro de partículas para minimizar e/ou eliminar a quantidade desses pontos que degradam a qualidade da imagem, como mostra a FIGURA 4.47.

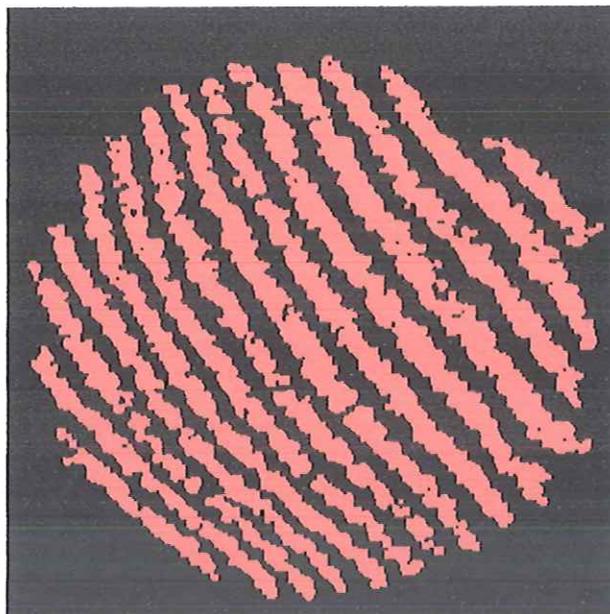


FIGURA 4.47 – Exemplo de imagem de franjas interferométricas depois de aplicado o filtro de partículas.

O propósito da abordagem descrita está na habilidade de reconhecer padrões de imagens gerados pelas *imagens interferométricas* ou medir a *similaridade* ou *correspondência* de duas ou mais funções aproximando parâmetros significativos de todos os dados da imagem.

Esse processamento foi efetuado de forma a garantir que, quando aplicada a mesma *condição (tensão)* em cada atuador, fosse obtida uma *imagem com o mesmo número de franjas*, já que pela tensão pode-se obter a posição angular da mesa superior do MAR, testando a confiabilidade do sistema.

Para averiguar esse fato, foram escolhidas imagens quando aplicado 450V no atuador A e traçada uma reta de vértice a vértice na área a ser estudada. Foi escolhida tal tensão apenas como exemplo, já que é uma condição onde aparecem várias franjas interferométricas. A reta foi traçada no sentido de orientação das franjas, como mostra a FIGURA 4.48.

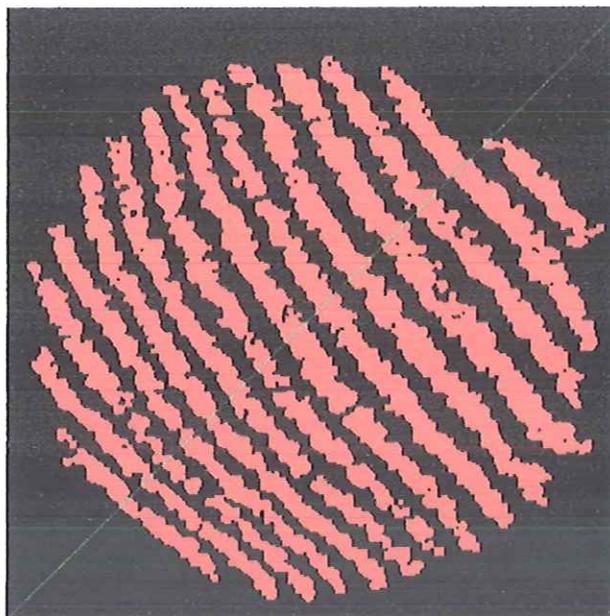


FIGURA 4.48 – Representação da reta para contagem de franjas.

Analisando a FIGURA 4.48 certifica-se que quando a tensão de 450V é aplicada ao atuador A, há o aparecimento de 14 franjas interferométricas. O aparecimento desse número de franjas está intimamente ligado à inclinação da superfície de teste com a superfície de referência.

Fazendo um mapeamento da região é possível identificar facilmente essas franjas, como mostra a FIGURA 4.49. Os perfis identificados na FIGURA 4.49 foram obtidos sob a mesma condição anterior (450V no atuador A). Foram feitos três testes que puderam comprovar o aparecimento de 14 franjas interferométricas (FIGURA 4.50 (a), (b) e (c)).

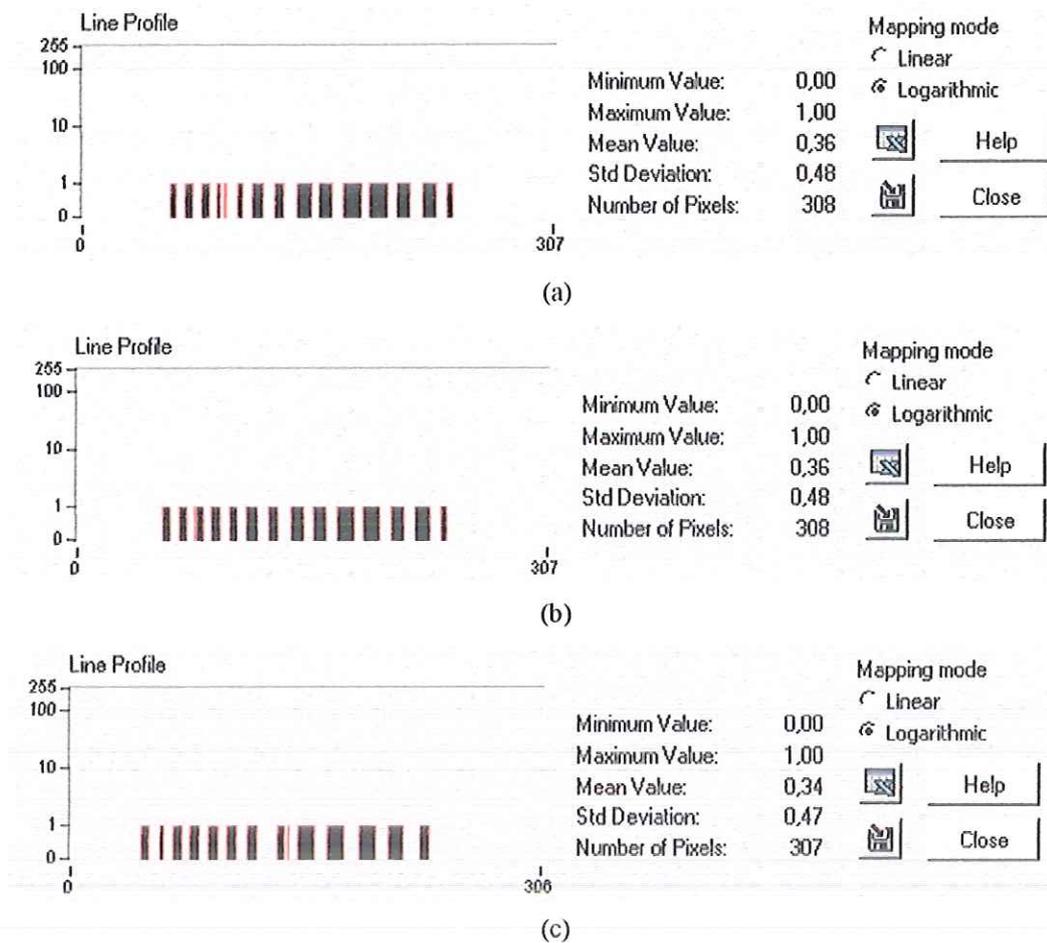


FIGURA 4.49 – Número de franjas quando a tensão de 450V é aplicada ao atuador A.

Analisando de forma criteriosa a FIGURA 4.49, observam-se características referentes à intensidade dos valores dos *pixels*, tais como valores mínimos, máximos, médios, desvio padrão e o número de *pixels*. Verifica-se que o desvio padrão para cada figura possui valor maior que o valor médio, isso ocorre porque o cálculo do desvio padrão é baseado na intensidade de brilho da imagem naquele ponto (*pixel*), sendo assim, por apresentar valor de desvio padrão maior que o valor médio, simboliza que a transição entre o “claro” e o “escuro” ocorre de forma eficaz, isto é, a grande variabilidade existente na amostra representa a diferença contrastante entre as franjas (elementos em estudo) e o fundo da imagem.

Com relação ao número de franjas resultantes, pôde-se constatar a ligação entre a inclinação da superfície de teste e a superfície de referência. Quanto mais inclinado estiver o MAR, maior será o aparecimento do número de franjas interferométricas, que vem de acordo com a teoria apresentada no Capítulo 2. Para ilustrar essa afirmação, é apresentada a FIGURA 4.50, que representa a imagem das franjas interferométricas quando aplicado 100V no atuador A.

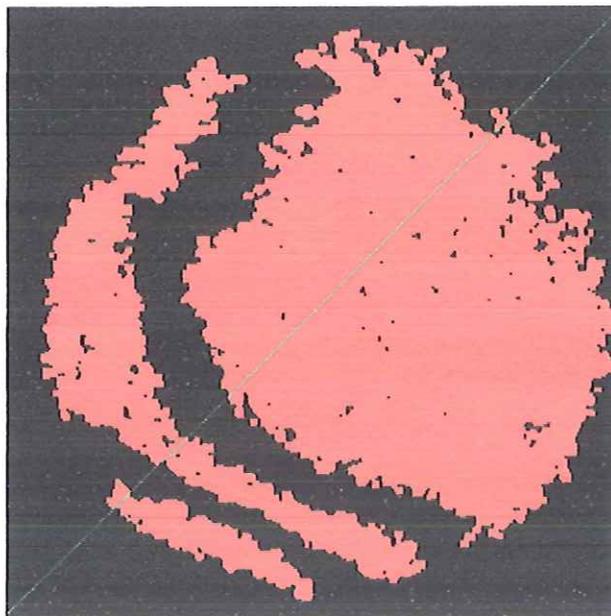


FIGURA 4.50 – Imagem quando aplicado 100V no atuador A.

Comparando a FIGURA 4.50 com a FIGURA 4.48, nota-se que há maior número de franjas quanto maior for a tensão aplicada no atuador em estudo.

Analisando separadamente cada atuador (**A** e **B**) e relacionado um ao outro, verifica-se pela análise de imagens que, para a mesma condição de contorno, surge um número maior de franjas quando acionado o atuador **B**. Esse efeito está intrinsecamente relacionado à progressão do coeficiente angular do MAR quando acionado o atuador **B**, como mostra o gráfico da FIGURA 4.41. Por isso, trabalha-se com tensão limite menor para esse atuador, a saber, 400V.

A identificação do atuador acionado está de acordo com a orientação das franjas, isto é, verifica-se que quando o atuador **A** é acionado, as franjas interferométricas tendem a aparecer numa direção e quando o atuador **B** é acionado, as franjas interferométricas mudam de direção, como pode ser visto por meio da FIGURA 4.51 (imagem depois de processada).

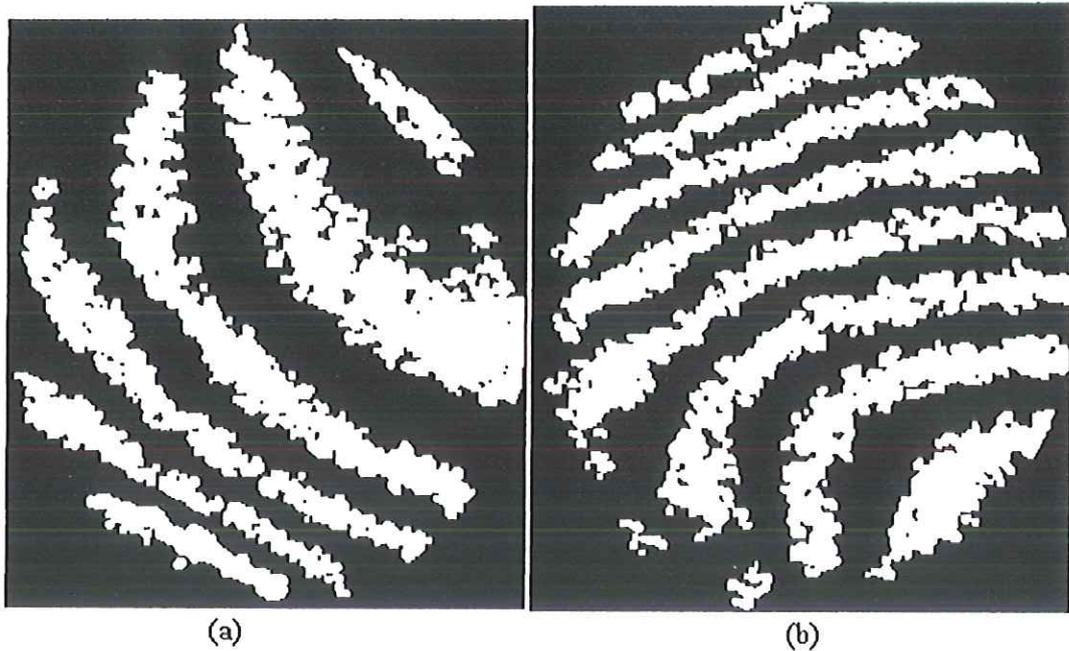


FIGURA 4.51 – Orientação das franjas – (a) Atuador A acionado (200 V); (b) Atuador B acionado (200 V).

Essa mudança na orientação das franjas interferométricas, quando acionados atuadores em posições diferentes, está de acordo com a teoria apresentada no Capítulo 2, já que a orientação das franjas interferométricas indica o sentido da inclinação da superfície em estudo.

Depois de obtidas e tratadas as imagens interferométricas, buscou-se um meio de identificar as imagens geradas. Ou seja, já que a proposta inicial desse trabalho é analisar imagens interferométricas obtidas por meio do interferômetro de Fizeau, sem atentar-se para os métodos de contagem de franjas e/ou de fase e, mesmo assim, obter um meio de verificar a inclinação de uma dada superfície quando esta estiver sobre o MAR. Para isso, optou-se por usar um algoritmo de identificação baseado em redes neurais artificiais, mais especificamente, uma rede competitiva do tipo auto-organizável. Alguns dos principais motivos que levaram a essa escolha foram:

- Promissora para trabalhar com imagens;
- Algoritmo robusto, permitindo a obtenção de bons resultados mesmo com falhas nos dados de entrada;
- Possibilidade em trabalhar com atributos binários;
- Desnecessário o pré-processamento de dados.

### 4.3.2. Aplicação de Redes Neurais Artificiais

Segundo KOHONEN (2001), uma rede auto-organizável permite a obtenção de bons resultados sem o pré-processamento de dados, característica que minimiza o tempo de operação quando há necessidade de se trabalhar em tempo real. Portanto, essa fase consiste em identificar as imagens obtidas diretamente do interferômetro de Fizeau, sem qualquer tratamento. Além disso, pesquisas apontam para o uso de redes auto-organizáveis quando se deseja comparar *pixels* de imagens armazenadas com *pixels* de imagens inéditas.

Os dados de entrada são referentes a imagens obtidas a partir da variação de cada atuador.

A arquitetura do algoritmo usado consiste numa função topológica hexagonal com 12 neurônios. Esses neurônios competem entre si segundo o critério de distância Euclidiana, realizando 500 iterações, isto é, o treinamento foi realizado com 500 épocas. Como é uma rede competitiva, cada neurônio vencedor deve caracterizar uma tensão correspondente ao atuador acionado, que corresponde a uma imagem, ou seja, os neurônios de saída da rede neural competem entre si para ser ativado e somente um neurônio de saída ou um neurônio por grupo é ativado, representando uma imagem.

Inicialmente, para o treinamento da rede auto-organizável, foram apresentados 7 conjuntos de dados representando cada variação do atuador A, como pode ser visto na TABELA 4.8.

TABELA 4.8 – Apresentação de 7 conjuntos de dados à rede neural – atuador A.

Tensão [V]	Conjuntos Apresentados						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
50	A1	A13	A25	A37	A49	A61	A73
100	A2	A14	A26	A38	A50	A62	A74
150	A3	A15	A27	A39	A51	A63	A75
200	A4	A16	A28	A40	A52	A64	A76
250	A5	A17	A29	A41	A53	A65	A77
300	A6	A18	A30	A42	A54	A66	A78
350	A7	A19	A31	A43	A55	A67	A79
400	A8	A20	A32	A44	A56	A68	A80
450	A9	A21	A33	A45	A57	A69	A81
500	A10	A22	A34	A46	A58	A70	A82
550	A11	A23	A35	A47	A59	A71	A83
600	A12	A24	A36	A48	A60	A72	A84

Os exemplos foram apresentados à rede na seqüência que estão na TABELA 4.8.

A rede neural baseia-se nos dados apresentados para extrair um modelo geral. Portanto, a fase de aprendizado deve ser rigorosa e verdadeira, a fim de se evitar modelos espúrios. Todo o conhecimento de uma rede neural está armazenado nas sinapses, ou seja, nos pesos atribuídos às conexões entre os neurônios. De 50 a 90% do total de dados devem ser separados para o treinamento da rede neural, por isso foram apresentados sete conjuntos de dados representando cada tensão atuante. O restante dos dados só é apresentado à rede neural na fase de testes a fim de que ela possa "deduzir" corretamente o inter-relacionamento entre os dados.

O resultado obtido com a apresentação desses dados à rede pode ser visto na TABELA 4.9.

TABELA 4.9 – Neurônios vencedores dos 7 conjuntos de dados– atuador A.

Tensão [V]	Neurônios Vencedores						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
50	4	1	12	12	1	12	1
100	12	12	1	1	12	12	12
150	1	2	1	9	1	1	1
200	9	4	9	6	4	4	9
250	3	11	11	2	11	11	11
300	11	8	4	9	4	4	4
350	5	10	10	10	10	10	10
400	6	7	7	7	7	7	7
450	5	5	6	8	6	5	5
500	5	5	6	7	5	6	5
550	5	3	9	3	3	3	3
600	6	5	5	6	6	6	6

Os números dentro da TABELA 4.9 indicam a posição do neurônio vencedor. Cada conjunto de imagens deveria estar representado por um único neurônio vencedor, no entanto, verifica-se que um neurônio representa mais de uma imagem. Na verdade, o mapa auto-organizável identifica, nos padrões de entrada, os agrupamentos e os correlaciona a regiões específicas da grade de neurônios. Os valores percentuais de acertos da rede neural são mostrados na TABELA 4.10.

TABELA 4.10 – Percentagem de acerto da rede neural.

Tensão [V]	Neurônio Vencedor	Percentagem de Acerto [%]
50	1 e 12	43
100	12	71
150	1	71
200	4 e 9	43
250	11	71
300	4	57
350	10	86
400	7	86
450	5	57
500	5	71
550	3	71
600	6	71

Nota-se que além de uma imagem estar representada por mais de um neurônio, há neurônios que representam mais imagens, como por exemplo, os neurônios 5 e 12. Isso significa que o desempenho da rede é baixo, ou seja, ela não reconheceu corretamente os padrões apresentados. Houve sucesso somente para os casos de 350 V e 400 V, cuja percentagem de acerto chegou a 86.

Como a variação da imagem é pequena, especialmente, quando as tensões atuantes são menores, a rede não pôde distinguir com eficiência uma imagem da outra.

Se observar o gráfico da FIGURA 4.39, verifica-se que o crescimento da curva de deslocamento no ponto central do MAR, quando acionado o atuador A, é exponencial. Esse crescimento exponencial ilustra o que está ocorrendo com as imagens. A partir de 300 V o crescimento é mais acentuado e as imagens são mais diferenciadas, há o aparecimento de um número maior de franjas interferométricas. É justamente onde a rede apresentou maior eficiência. No entanto, para tensões muito próximas, ainda há uma certa mistura, como no caso das imagens geradas pelas tensões de 50 V e 100 V.

A fim de maximizar a percentagem de acertos, foram realizadas modificações na arquitetura da rede e no número de épocas de treinamento, entretanto, não houve melhora significativa dos resultados.

Apesar de KOHONEN (2001) afirmar que uma rede auto-organizável permite a obtenção de bons resultados sem o pré-processamento de dados, nesse caso, tal afirmação não se aplica. Os principais motivos para a ocorrência desse fato são:

- A leitura da superfície da peça pelo feixe LASER do interferômetro foi realizada sem a presença de um filtro, o qual ajudaria na resolução da imagem obtida;
- A máxima resolução do software de aquisição de imagens é de 640x480 *pixels*. Se a resolução fosse maior, aumentaria sensivelmente a definição da imagem, permitindo maior diferenciação entre os valores.

Como os resultados apresentados não se mostraram satisfatórios, optou-se por realizar os mesmos testes, porém a entrada da rede neural será com conjuntos de imagens pré-processadas. O pré-processamento é o mesmo apresentado anteriormente (ROI, gaussiana, *threshold*, dilatação e filtro de partículas). Com isso, espera-se que a percentagem de acerto seja maior.

Foram apresentados sete conjuntos de dados à rede neural com imagens pré-processadas, cujos resultados obtidos podem ser vistos na TABELA 4.11. A arquitetura do algoritmo usado consiste numa função topológica hexagonal com 12 neurônios. Esses neurônios competem entre si segundo o critério de distância Euclidiana, realizando 500 iterações.

TABELA 4.11 – Neurônios vencedores com 7 conjuntos de dados – atuador A.

Tensão [V]	Neurônios Vencedores						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
50	10	10	2	10	10	2	10
100	2	2	2	2	2	10	2
150	7	7	2	7	7	7	2
200	5	5	5	5	1	5	5
250	12	1	5	1	1	7	1
300	1	1	1	1	1	1	8
350	4	6	6	6	6	4	6
400	4	4	4	4	4	4	4
450	11	11	11	6	4	6	11
500	9	9	9	9	4	9	9
550	12	3	3	12	3	3	3
600	12	5	5	12	12	12	12

A TABELA 4.12 mostra o percentual de acerto para cada tensão e o neurônio vencedor.

TABELA 4.12 – Acertos da rede neural.

Tensão [V]	Neurônio Vencedor	Porcentagem de Acerto [%]
50	10	71
100	2	86
150	7	71
200	5	86
250	1	57
300	1	86
350	6	71
400	4	100
450	11	57
500	9	86
550	3	71
600	12	71

Nota-se, em termos percentuais, uma melhora no processo de aprendizado da rede neural, sendo que a porcentagem mínima de acerto foi de 57 e no caso de 400 V, houve 100% de acerto. Comparando a TABELA 4.12 com a TABELA 4.10, verifica-se que a rede auto-organizável, para esse caso, identifica com maior eficiência, imagens pré-processadas.

Quanto à mistura que a rede faz, como colocar o mesmo neurônio identificando mais de um padrão de imagem, acredita-se que ao apresentar maior número de exemplos à rede, ou seja, mais imagens por tensão atuante, o seu comportamento será mais eficiente. Nesse caso, o mesmo neurônio (1) identificou dois padrões de imagens diferentes.

O passo seguinte foi inserir as imagens obtidas quando acionado o atuador **B** nesse mesmo algoritmo (junto com o atuador **A**) e examinar o desempenho da rede auto-organizável. Nesse caso, a rede deverá identificar, além da imagem gerada por uma dada tensão, qual o atuador que está sendo acionado. Para isso, foram apresentados dois conjuntos de imagens, um para cada atuador, sendo que a tensão varia em 50 V, como mostra a TABELA 4.13.

TABELA 4.13 – Conjuntos de dados de entrada – atuadores A e B.

Tensão [V]	Atuador A	Atuador B
50	A1	B1
100	A2	B2
150	A3	B3
200	A4	B4
250	A5	B5
300	A6	B6
350	A7	B7
400	A8	B8
450	A9	
500	A10	
550	A11	
600	A12	

A arquitetura do algoritmo usado consiste numa função topológica hexagonal com 20 neurônios. Esses neurônios competem entre si segundo o critério de distância Euclidiana, realizando 1000 iterações.

A TABELA 4.14 mostra os neurônios vencedores para cada tensão atuante.

TABELA 4.14 – Neurônios vencedores.

Tensão [V]	Atuador A	Atuador B
50	20	5
100	9	1
150	20	19
200	10	2
250	13	3
300	16	4
350	16	4
400	17	8
450	17	
500	18	
550	11	
600	6	

De acordo com a TABELA 4.14 verifica-se que a rede separou, com eficiência, os atuadores acionados. Analisando a FIGURA 4.51 e correlacionando-a a esse resultado vê que a orientação das franjas quando acionados os atuadores **A** e **B** são diferentes, assim, possibilita a obtenção de sucesso na identificação do atuador acionado. Entretanto, ainda confunde as imagens geradas por tensões muito próximas, tanto no atuador **A** quanto no atuador **B**.

Com o intuito de resolver esse problema, foram apresentados três exemplos para cada tensão atuante dos dois atuadores e os neurônios vencedores podem ser encontrados na TABELA 4.15. A arquitetura da rede foi a mesma usada anteriormente, com exceção do número de iterações que foi equivalente a 100 iterações.

TABELA 4.15 – Neurônios vencedores – atuadores **A** e **B**.

Tensão [V]	Neurônios vencedores					
	Atuador A			Atuador B		
	I	II	III	I	II	III
50	20	20	20	16	16	16
100	3	20	20	1	1	14
150	11	4	4	5	5	5
200	11	4	4	15	15	15
250	7	7	11	13	13	13
300	6	11	11	17	17	17
350	19	19	19	17	17	17
400	12	12	12	2	2	2
450	10	10	10			
500	8	8	14			
550	3	3	3			
600	9	9	9			

Por meio da TABELA 4.15 verifica-se que a rede diferencia eficientemente as imagens geradas pelos atuadores **A** e **B**.

A TABELA 4.16 mostra o percentual de acerto para cada tensão atuante, bem como os neurônios vencedores.

TABELA 4.16 – Acertos da rede neural.

Tensão [V]	Neurônios Vencedores		Porcentagem de Acerto [%]	
	Atuador A	Atuador B	Atuador A	Atuador B
50	20	16	100	100
100	20	1	67	67
150	4	5	67	100
200	4	15	67	100
250	7	13	67	100
300	11	17	67	100
350	19	17	100	100
400	12	2	100	100
450	10		100	
500	8		67	
550	3		100	
600	9		100	

Apesar da porcentagem mínima de acerto estar na ordem de 67 para o atuador A, nota-se que a rede reconheceu eficientemente qual atuador estava acionado. Uma ótima aplicação com esse tipo de resultado seria, por exemplo, na identificação de superfícies côncavas e convexas, já que nas imagens geradas por esse tipo de superfícies a formação de franjas sempre se apresentaria em direção contrária. Quanto às imagens geradas por tensões muito próximas, ainda há uma certa confusão na identificação, provavelmente, se fosse apresentado maior número de dados de entrada, o resultado seria melhor. Além disso, como dito no Capítulo 2, a criação de regiões de interesse faz com que apareçam problemas nessas regiões, assim, apesar do mapa auto-organizável ser um algoritmo robusto e tolerante à falhas, como é uma comparação por meio de *pixels*, pode ter havido perda de informações necessárias nessas regiões para melhor identificação da imagem, e ainda, durante a captura da imagem pode ter havido interferência de ruídos mecânicos e/ou acústicos. No entanto, os resultados apresentados já se mostram significativos para incentivar pesquisas envolvendo imagens interferométricas.

Nota-se que para o atuador B, houve maior eficiência na identificação dos padrões de imagens. Esta realidade vem de acordo com os resultados de variação angular apresentados na TABELA 4.7, ou seja, a variação angular do atuador B é mais acentuada que a do atuador A, logo as imagens geradas pelo atuador B para tensões muito próximas são mais distintas.

O procedimento realizado até aqui está de acordo com aquele apresentado no Capítulo 3 (coleta de dados, separação em conjuntos, configuração da rede e treinamento). Para encerrar o procedimento proposto ainda há necessidade de realizar testes, isto é, apresentar dados que não foram previamente usados no treinamento da rede a fim determinar sua performance.

Para tanto, foram adquiridas novas imagens e estas serão apresentadas de forma aleatória à rede. Serão usados os parâmetros obtidos (número de épocas, taxa de aprendizagem, função topológica, função distância, entre outros) na classificação dos neurônios vencedores apresentados na TABELA 4.16, os quais identificam imagens.

A TABELA 4.17 mostra a ordem de apresentação das imagens, bem como seus respectivos neurônios vencedores.

TABELA 4.17 – Ordem de apresentação dos exemplos de entrada e neurônios vencedores.

Ordem de Apresentação	Tensão [V]	Neurônios Vencedores	
		Atuador A	Atuador B
1	150	4	5
2	350	19	17
3	200	4	15
4	100	20	1
5	300	11	17
6	50	20	16
7	250	7	13
8	400	12	2
9	550	3	
10	600	9	
11	500	8	
12	450	10	

Comparando os resultados da TABELA 4.17 com os resultados da TABELA 4.16 verifica-se validação da rede, isto é, a rede auto-organizável classificou eficientemente os neurônios vencedores para cada padrão de entrada como a configuração pré-estabelecida.

Quanto ao tempo de processamento da rede, ele é menor para imagens pré-processadas. No entanto, para identificar imagens na fase de teste, será apresentada uma única imagem por vez, logo o tempo que é fator importante quando se deseja trabalhar em tempo real, não será

prejudicado. Além disso, com os avanços na área de informática, computadores mais rápidos surgem a cada dia, contribuindo com a tecnologia e incentivando pesquisas científicas.

A aplicação de redes auto-organizáveis em interferometria vai além da identificação de planicidade da superfície em estudo ou verificação de sua concavidade ou convexidade, ela se estende a superfícies sujeitas às irregularidades, ou ainda, a outros tipos de imagens interferométricas que tenham padrões definidos, além de imagens geradas por outros meios, não necessariamente pelo processo de interferometria. Para isso, basta mapear amplamente o problema, conhecendo todas suas características e assim, organizar uma base de dados que servirá como referência a outros padrões apresentados.

#### 4.4. Conclusões Preliminares

Este capítulo procurou mostrar que é possível a implementação do microposicionador angular rotativo no torno ASG 2500, a fim de obter geometrias diferenciadas na usinagem de ultraprecisão. Para isso, foram mostradas adaptações feitas na placa de vácuo, além de modificações geométricas realizadas no MAR. As modificações de projeto foram baseadas em conceitos e princípios de Engenharia de Precisão, buscando o resultado desejado, neste caso o posicionamento de ultraprecisão.

Por meio de elementos finitos pôde-se averiguar o comportamento estático e dinâmico do MAR quando sujeito aos deslocamentos causados pelos atuadores piezelétricos, além de sua melhor configuração para o objetivo proposto.

Ensaio experimentais puderam mostrar o comportamento do MAR, o qual se manifesta conforme equações matemáticas apresentadas no Capítulo 3. Essas equações representam as variações angulares do posicionador em função do deslocamento nos atuadores piezelétricos. Por outro lado, permitiu observar a influência de diversos parâmetros geométricos na obtenção da posição e trajetória. Alguns desses parâmetros geométricos já haviam sido identificados na análise por elementos finitos.

O ambiente de programação oferecido pelo LabVIEW<sup>®</sup> para implementação de algoritmos complexos, por exemplo, redes neurais artificiais, é de fácil configuração. Além disso, quando se trata de processamento de imagens, ele oferece muitas vantagens, já que possui blocos com funções específicas pré-definidas.

O emprego de mapas auto-organizáveis para identificação de imagens interferométricas bem como o processamento de imagens apresentam-se como técnicas promissoras na área de projeto de ultraprecisão, permitindo identificar a superfície em estudo e relacioná-la a padrões pré-estabelecidos. Enfim, os resultados validam o sistema na forma como foi sintetizado e comprovam a viabilidade do uso de imagens interferométricas em sistemas de posicionamento.

## *Capítulo 5*

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

#### 5.1. Conclusões

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento relativo ao projeto e construção do microposicionador angular rotativo (MAR), considerando os conceitos e princípios de projeto de máquinas de precisão. Foram feitas alterações e adaptações em relação ao protótipo original, a fim de encontrar a melhor configuração geométrica no sentido de torná-lo técnica e economicamente consistente. Trata-se de um sistema apoiado cinematicamente em três pontos, onde, em cada um deles, pode ser acoplado um atuador translativo linear, como por exemplo, atuadores piezelétricos. Dentre as alterações, cabe citar as modificações na parte superior do MAR para a geração de um plano quando um ou dois atuadores piezelétricos fossem acionados e ainda, na parte inferior, para sua adaptação ao torno ASG 2500. Além disso, foi projetada e construída uma placa de vácuo para ser acoplada ao MAR para permitir a fixação das peças a serem usinadas.

O principal objetivo deste trabalho foi validar o uso de processamento de imagem como ferramenta capaz de auxiliar na identificação e controle de posicionamento. As imagens foram geradas a partir de um interferômetro LASER do tipo Fizeau, sendo que a identificação dessas imagens foi realizada por meio de um algoritmo baseado em redes neurais. Assim, pôde-se associar reconhecimento de imagens, redes neurais e uso de métodos ópticos (interferometria) aplicados a projetos de ultraprecisão, em particular, a sistemas de posicionamento de alta precisão.

Desse modo, apresentou-se uma revisão bibliográfica sobre sistemas de posicionamento de ultraprecisão, reconhecimento de imagens e interferometria. Por meio da aplicação do Método de Elementos Finitos pôde-se averiguar o comportamento estático e dinâmico do MAR,

quando sujeito aos deslocamentos causados pelos atuadores piezelétricos. Desenvolveu-se então, um modelo matemático para a identificação da posição angular do MAR em função do deslocamento de cada atuador piezelétrico, sendo que, por meio de testes experimentais, foi possível relacionar a tensão aplicada em cada atuador piezelétrico à variação angular do MAR. Foram aplicadas funções de processamento de imagem e, assim, pôde-se comparar o método usado envolvendo imagens pré-processadas e imagens sem quaisquer tipos de pré-processamento. Um algoritmo de identificação de imagens baseado em redes neurais artificiais, mais precisamente, mapas auto-organizáveis de Kohonen, foi programado usando o LabVIEW<sup>®</sup>, um ambiente gráfico para o desenvolvimento do sistema de monitoramento e controle. O desempenho do sistema de identificação foi analisado e discutido em termos de seus requisitos.

Baseado nas etapas desenvolvidas e resultados obtidos, pode-se apresentar as seguintes conclusões:

- As modificações implementadas no projeto inicial permitiram alcançar melhor desempenho estático (formação de um plano) e dinâmico do conjunto (frequências naturais), como foi observado por simulações realizadas usando um método de modelagem matemática, baseado em elementos finitos, mostrando-se muito útil na síntese do sistema microposicionador proposto.
- Por meio de testes experimentais pôde-se atestar a efetividade do sistema proposto, ou seja, o comportamento cinemático da mesa superior do MAR realmente está condizente com o modelo matemático apresentado, isto é, para cada tensão atuante num dado atuador piezelétrico há uma única posição correspondente.
- O centro do MAR (ponto sobre o qual foram efetuadas medições de deslocamento linear) não se comportou como o esperado, isto é, os valores dos deslocamentos deveriam ser similares, independente de qual atuador fosse acionado. No entanto, depois de realizados os testes e conhecidas as fontes produtoras dessa diferença, os resultados incentivam pesquisas posteriores quando o MAR estiver fixado idealmente ao torno ASG 2500.
- A análise interferométrica permitiu observar a planicidade da superfície em estudo e os resultados foram compatíveis com aqueles apresentados por simulações realizadas usando o Método dos Elementos Finitos.
- Por meio do processamento de imagens pôde-se observar a quantidade de franjas interferométricas, constatando a relação entre número de franjas e inclinação.
- Ainda pela análise de franjas (orientação), observou-se que o comportamento do MAR quando acionado os atuadores piezelétricos corresponde a teoria apresentada no Capítulo 2.

- O desempenho dos mapas auto-organizáveis foi superior com imagens pré-processadas. Neste caso, o desempenho poderia ser melhorado por meio da utilização de uma placa mais apropriada, dedicada à tarefa de aquisição e processamento de imagens. Além disso, o uso de filtros ópticos ajudaria na definição da imagem interferométrica capturada, eliminando possíveis ruídos.
- As RNA permitiram identificar eficientemente os atuadores acionados e as tensões aplicadas com baixo nível de erros. Esse nível poderia ainda, ser minimizado, se os ruídos diminuíssem, tais como: ruído eletrônico, variação da intensidade luminosa e problemas de instabilidade do sistema óptico e mecânico envolvido na medição.
- A identificação de imagens interferométricas usando redes neurais auto-organizáveis permitiu a identificação da planicidade da superfície sem a necessidade de operações como, por exemplo, o método de contagem de franjas, diminuindo o tempo computacional.

De fato, o sistema proposto possui qualidades notáveis dentre as quais cabe destacar a simplicidade, quer na fabricação dos dispositivos opto-mecânicos, quer na obtenção da curva característica tensão/posição, uma vez que a calibração do sistema posicionador é feita por meio de um modelo matemático sobre o qual pesam poucas hipóteses restritivas, que acarreta, portanto, um modelo computacional compacto que permite ao usuário, para cada aplicação, deduzir com alta confiabilidade a função que estabelece a correspondência entre tensão do atuador e a posição da peça a ser usinada ou a função inversa, posição da peça e a tensão do atuador.

Em suma, a interferometria, como metodologia de medição em sistemas de posicionamento de alto desempenho, gera resultados excelentes e dessa forma deve ser incluída no elenco das técnicas convencionais já consagradas na área de nanotecnologia da engenharia mecânica.

## 5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Por meio dos resultados obtidos com o protótipo desenvolvido, algumas sugestões podem ser feitas quanto à continuação deste trabalho.

- Teste estático do novo conjunto (MAR mais placa de vácuo) – onde seria avaliada a efetividade do sistema de fixação a vácuo. Tal teste poderia consistir na fixação de peças de diferentes pesos e diâmetros e análise do comportamento do conjunto.

- Teste dinâmico – executado após um cuidadoso balanceamento do conjunto. Nesse teste, tomando como base os dados obtidos no teste estático, seria avaliado o comportamento do conjunto trabalhando em diferentes rotações a fim de verificar a funcionalidade do sistema. Com esse teste poderia ser feito um estudo das frequências naturais do sistema e comparar com as frequências naturais obtidas via simulação numérica.
- Estudo do efeito da influência das frequências induzidas pela ferramenta de corte no sistema MAR.
- Aplicação do LASER interferométrico na superfície enquanto o sistema estiver em operação, isto é, enquanto sujeito à rotação.
- Usar um outro algoritmo baseado em redes neurais como, por exemplo, o *back-propagation* e comparar os resultados. O uso do algoritmo *back-propagation* deverá facilitar o controle do sistema.
- Usar lógica difusa para efetuar o mapeamento entre entradas e saídas do modelo, já que neste caso, para cada tensão dada há somente uma única imagem correspondente. Com isso, atribuir-se-ia rótulos lingüísticos, facilitando o controle e permitindo a inserção e extração de conhecimento a respeito do sistema modelado.
- Implementar todo o sistema de controle do MAR direto no CNC do torno ASG 2500, diminuindo o número de equipamentos usados, além de aprimorar o processo.

## ***Referências Bibliográficas***

- AGUIRRE, L. A. (2000). *Introdução à identificação de sistemas*. Editora UFMG, Belo Horizonte.
- AI, M. (1996). Future of imaging technology, *Sensors and Actuators A*, v. 56, p. 31 – 38.
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. & PEZZOTA, C. (2004). Controle geométrico através da metrologia óptica: chegando onde nenhum outro meio de medição consegue chegar. <http://www.photonita.com.br/suporte.php>
- ALBUQUERQUE, M. C & ALBUQUERQUE, M. C. (2003). *Processamento de imagens: métodos e análises*. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCT. <http://www.cbpf.br/cat/cbpfcc>
- ANSYS 5.5 REFERENCE GUIDE. (1998). *Modal Analysis*.
- ASANO, S. GOTO, T. (1991). Micro-positioning stage of 6 degree-of-freedom with nanometer resolution. *Progress in Precision Engineering*, Springer-Verlag Berlin, Germany.
- BANARSE, D. S.; FRANCE, I. & DULLER, A. W. G. (2000). Analysis and application of a self-organising image recognition neural network. *Advances in Engineering Software*, v. 31, p. 937 – 944.
- BARNES, T. H.; EIJU, T.; CHEUNG, D. C. L. & WU, C. Y. (2002). Phase measurement accuracy of feedback interferometers. *Optics and lasers in engineering*, v.38, p. 387 – 404, Dec.
- BAXES, G. A. (1994). *Digital image processing: principles and applications*. New York, John Wiley & Sons, 451 p.
- BIFANO, T. G.; DOW, T. A. & SCATTERGOOD, R. O. (1991). Ductile-regime grinding. A new technology for machining brittle materials. *Journal of Engineering for Industry – Transaction of the ASME*, v. 113, n. 2, p. 184 – 189, May.
- BLACKLEY, W. S. & SCATTERGOOD, R. O. (1991). Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials. *Precision Engineering*, v. 13, n.2, p; 263 – 266.

- BRUNING, J. H. (1978). *Fringe scanning interferometry in Optical Shop Testing*. New York, Wiley, p. 406 – 438.
- BRYSEK, J. (1996). Impact of MEMS technology on society. *Sensors and Actuators A*, v. 56, p. 1 – 9.
- BURATO, C. U. (2003). *Desenvolvimento de uma mesa angular rotativa para a usinagem de ultraprecisão*. São Carlos. 120p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CAMPELLO, R. J. G. B. & AMARAL, W. C. (1999). *Equivalência entre modelos nebulosos e redes neurais*. IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, São Paulo, 8 – 10 setembro, p. 208 – 212.
- CARVALHO, A. A.; SILVA, R. R.; REBELLO, J. M. & VIANA, A. F. (2003). O mundo das imagens digitais. *Revista Matéria (Digital)*, v. 8, n. 2, p. 167 – 186.
- CASASANT, D. & PSALTIS, D. (1976). Position, rotation, and invariant optical correlation. *Applied Optics*, v. 15, n. 7, p. 1795 – 1799.
- CHAO, C. L. (1991). Investigation of the machine glasses and other normally brittle materials in the ductile regime. Cranfield. 203p. Thesis (Ph.D), Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science.
- COPPINI, C.; DICIOTTI, S. & VALLI, G. (2003). *Matching of medical images by self-organizing neural networks*. Pattern Recognition Letters, v. 25, p. 341 – 352.
- CORBETT, J.; McKEOWN, P. A.; PEGGS, G. N. & WHATMORE, R. (2000). Nanotechnology: International developments and emerging products. *Annals of the CIRP*, v. 42, n. 2, p. 523 – 545.
- CORBETT, J.; STEPHENSON, D.; SWEET, J. & WILLS-MOREN, W. (1999). An ultra precision machine tool demonstrating a novel vibration resistant structure. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE EUROPEAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING AND NANOTECHNOLOGY – 1<sup>st</sup> EUSPEN, Bremen, Germany, 31 May a 4 Jun. de 1999, *Annals*. p. 159 – 162.
- COSTA, J. A. F. (1996). *Sistema de reconhecimento de padrões visuais invariantes a transformações geométricas utilizando redes neurais artificiais de múltiplas camadas*. São Carlos. 157p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CRIVELARO, K. C. O. (2004). São Carlos. Utilização de redes neurais auto-organizativas para identificação de regimes de escoamento bifásico horizontal ar-água. 75p. Tese

- (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DOWN, T., MILLER, M. AND FALTER, P. (1991). Application of fast tool servo for diamond turning of nonrotationally symmetric surfaces. *Precision Engineering*, v. 13, n. 4, p. 243 – 250.
- DUDUCH, J. G. (1993). *Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle materials*. Cranfield. 155p. Thesis (Ph.D) – Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science.
- DUDUCH, J. G.; PORTO, A. J. V.; JASINEVICIUS, R. G.; RUBIO, J. C. C. & MONTANARI, L. (2004). Projeto de máquinas-ferramenta. In: PORTO, A. J. V.; SILVA, H. A.; DUDUCH, J. G.; RUBIO, J. C. C.; MONTANARI, L.; JASINEVICIUS, R. G.; ALMEIDA, R. M. & SHCROETER, R. B. *Usinagem de ultraprecisão*. São Carlos, RiMa, Cap. 10, p. 177 – 211.
- FAGETH, R.; ALLEN, W. G. & JÄGER, U. (1996). Fuzzy logic classification in image processing. *Fuzzy sets and systems*, v. 82, p. 265 – 278.
- FALTER, P. J. & DOWN, T. A. (1987). Design and performance of a small-scale diamond turning machine. *Precision Engineering*, v. 9, p. 185 – 190, Oct.
- FAUSETT, L. (1994). *Fundamentals Neural Networks: Architectures, algorithms, and applications*. Prentice Hall.
- FOWLES, G. R. (1968). *Introduction to modern optics*. Ed. by Holt, Rinehart and Winston, Inc., EUA, 304 p.
- GEE, A.; MCCANDLISH, S. & PUTTICK, K. (1989). On-axis Interferometric Measurement for Tool Positioning in Ultra-Precision Single-Point Machining. *Proc. SPIE*. v. 1121, p. 74 – 80.
- GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E. (1993). *Digital image processing*. Addison-Wesley.
- GUENTHER, R. (1990). *Modern optics*. New York, John Wiley & Sons.
- GUYON, I. (1991). Neural Networks and application tutorial. *Physics Reports*, v. 207, p. 215 – 259.
- 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.
- HATA, S. (1993). Industrial applications of image processing. *International Journal Society Precision Engineering*, v. 27, n. 4, p. 321 – 326.
- HAYKIN, S. (1999). *Neural networks: A comprehensive Foundation*. Ed. 2. New Jersey,

- Prentice Hall, 842 p.
- HOLMES, M.; HOCKEN, R. & TRUMPET, D. (1997). A long-range scanning stage – the LORS project. *Proceedings of the IPES-UME*, v. 1, p. 343 – 345.
- HUNT, K. J.; SBARBARO, D.; ZBIKOWSKI, R. & GAWTHROP, P. J. (1992). Neural networks for control systems. A survey. *Automatica*, v. 28, n. 6, p. 1083 – 1112.
- HUNTLEY, J. M. (2000). Optical shape measurement technology: past, present and future. *Proceedings of SPIE – Optical Diagnostics for Industrial Applications*, v. 4076, p. 162 – 173.
- IKAWA, N.; DONALDSON, 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.
- ITAO, K. (1993). Precision mechanisms for mechatronics systems. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, v. 27, n. 4, p. 315 – 318.
- JAIN, R.; KASTURI, R. & SCHUNCK, B. G. (1995). *Machine Vision*. New York, McGraw-Hill, EUA, 549p.
- JASINEVICIUS, R. G. (1998). Influência da transição de fase sobre os limites de ductilidade observados no torneamento de ultraprecisão do silício monocristalino. São Carlos. 173p. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- JASINEVICIUS, R. G.; PIZANI, P. S. & DUDUCH, J. G. (2000). Brittle to ductile transition dependence upon the transition pressure value of semiconductors in micromachining, *Journal of Materials Research*, v. 15, n. 8, p. 1688 – 1692.
- JESUS, G. A. R. (1999) *Uma contribuição para o desenvolvimento e controle de sistemas de posicionamento submicrométrico*. Florianópolis. 193p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- JONES, R. V. (1979). Precision engineering from supertankers to integrated circuits. *Precision Engineering*, v. 1, p. 3, Jan.
- KANIZAR, W. L.; LIU, D.; MOON, K. S. & SUTHERLAND, J. W. (1996). A magnetostrictive actuator based micropositioner and its application in turning. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, v. 2721, p. 385 – 393.
- KAROW, H. H. (1993). *Fabrication methods for precision optics*. New York, ed. John Wiley & Sons, 751 p.

- KELLER, J. M. (1995). Fuzzy sets in computer vision. VI IFSA WORLD CONGRESS, v. 1, p. 7 – 10, São Paulo.
- KELLER, J. M.; GADER, P.; TAHANI, H.; CHIANG, J. H. & MOHAMED, M. (1994). Advances in fuzzy integration for patter recognition. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 65, n. 2-3. p. 273 – 283.
- KOHNO, T. (1996). Nano-measuring systems of sub-naometre accuracy and resolution. In: TANIGUCHI, N. *Nanotechnology – Integrated processing systems for ultra-precision and ultra-fine products*. New York, Oxford University Press Inc. Cap. 2, p. 75 – 79.
- KOHNO, T.; OKAZAKI, Y.; OZAWA, N.; MITUI, K. e OMODA, M. (1989). In-process measurement and a work-piece -Referred form accuracy control system (WORFAC): concept of the method and preliminary experiment, *Precision Engineering*, v. 11, p. 9 – 14.
- KOHONEN, T. (2001). *Self-Organizing Maps*. Ed. 3, Springer-Verlag, 501 p.
- KÖNIG, W.; WECK, M.; SPENRATH, N. & LUDERICH, J. (1991). *Diamond machining technology*. Tutorial 6<sup>th</sup> IPES/UME 2, Aachen, Germany, May.
- KOSKO, B. (1992). *Neural networks and fuzzy systems: A dynamical systems approach to machine intelligence*. Prentice Hall.
- KOVÁCS. Z. L. (1996). *Redes neurais artificiais – Fundamentos e aplicações*. São Paulo, Edição Acadêmica.
- LANGENBECK, P. (1992). Ultrafine infeed control. *Precision Engineering*, v.14, n. 1, p. 43 – 46.
- LEE, S. Q. & GWEON, D.G. (2000). A new 3-DOF Z-tilts micropositioning system using electromagnetic actuator and air bearings. *Precision Engineering*, v.24, p.24 – 31.
- MAILACHALAM, B. & SRIKANTHAN, T. (2002). Area-time issues in the VLSI implementation of self-organizing map neural-network. *Microprocessors and Microsystems*, v. 26, p. 399 – 406.
- MATLAB<sup>®</sup> 6.5. (2002) – *Image processing toolbox*.
- MCKEOWN, P. A.; CARLILE, K.; SHORE, P. & READ, R. F. J. (1990). Ultra-precision, high stiffness CNC grinding machine for ductile mode grinding of brittle materials. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, v. 56, n. 5, p. 30 – 37.
- MELÃO, I. (1998). *Análise de superfícies através do método óptico de sub-franjas*. São Paulo. 98p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- MIZUNO, H. (1993). *Micro-tilt controlled rotating face-plate stage for single-point diamond turning*. Cranfield. 133 p. Thesis (Ph.D) – Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science.
- MÖLLER–WEDEL OPTICAL (2001). Operation Manual Interferometer V-100.
- MONCHALIN, J. (1986). Optical detection of ultrasound. *IEEE Transactions on ultrasonics ferroelectrics and frequency control*, v. 33, n. 5, p. 485 – 499.
- MONTANARI, L. (1999). *Técnicas de projeto aplicadas no desenvolvimento de um microposicionador angular*. São Carlos. 126p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MONTANARI, L.; RUBIO, J. C. C.; DUDUCH, J. G. & PORTO, A. J. P. (1998). Desenvolvimento de um sistema para microposicionamento angular. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA MECÂNICA – NORTE/NORDESTE, Fortaleza. *Anais. ABCM*, v. 1, p. 94 – 101, outubro de 1998.
- NADER, G. (2002). *Desenvolvimento de técnicas de caracterização de transdutores piezelétricos*. São Paulo. 160p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- NAKAO, Y. & DORNFELD, D. A. (2003). Diamond turning using position and AE dual feedback control system. *Precision Engineering*, v. 27, p. 117 – 124.
- NAKAZAWA, H. (1994). *Principles of precision Engineering*. Oxford University Press, Oxford, 267 p.
- NARENDRA, K. S. & PARTHASARATHY, K. (1990). Identification and control of dynamic systems using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, v. 1, p. 4 – 27.
- NASCIMENTO, C. L. & YONEYAMA, T. (2000). *Inteligência artificial em controle e automação*. Editora Edgar Blücher, São Paulo, SP.
- NOMURA, T.; YOSHIKAWA, K.; TASHIRO, H.; TAKEUCHI, K.; OZAWA, N.; OKAZAKI, Y.; SUZUKI, M.; KOBAYASHI, F. & USUKI, M. (1992). On-machine shape measurement of workpiece surface with Fizeau interferometer. *Precision Engineering*, v. 14, n. 3, p. 155 – 159, Jul.
- NORGARD, M.; RAVN, O.; POULSE, N. K. & HANSEN, L. K. (2000). *Neural networks for modelling and control of dynamic systems*. Springer-Verlag.
- PAPOULIS, A. (1968). *System and transforms with applications in optics*. New York, McGraw-Hills.

- PATTERSON, S. R. & MAGRAB, E. B. (1985). Design and testing of a fast tool servo for diamond turning. *Precision Engineering*, v. 7, n. 3, p. 123 – 128.
- PHYSIK INSTRUMENTE® (1992). *Products for micropositioning*.(CATALOG). Germany.
- PICOTTO, G. & PISANI, M. (1997). Interferometric control for a STM device. *Proceedings of the 9th. IPES & 4 th. UME – Progress in Precision Engineering and Nanotechnology*, v. 1, p. 340 – 342.
- PORTMAN, V. & PESCHANSKY, B. (2001). Phase-statistical method and device for high precise and high-efficiency angular measurements. *Precision Engineering*, v.25, p.309 – 15.
- 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 (Livredocência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PURQUERIO, B. M.; PENTEADO, L. A.; FRANÇA, S. C. & FORTULAN, C. A. (1994). Máquinas de ultraprecisão: um projeto desenvolvido no Brasil. *Máquinas e Metais*, p. 152 – 163, mar.
- RASTOGI, P. K. (1997). *Optical measurement technique and applications*. Norwood, Artech House, Inc, 433 p.
- RASURE, J.; ARGIRO, D.; SAUER, T. & WILLIAMS, C. (1990). Visual language and software development environment for image processing. *Journal of Imaging System and Technology*, v. 2, p. 183 – 199.
- ROAD, L. B. (1984). *Interferogram interpretation and evaluation handbook*, ed. 3, Zygo Corporation, p. 2 – 6.
- ROCHA, R. N. (2000). *Aplicações técnicas de processamento de imagens e visão computacional em inspeção visual*. São Carlos. 161p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROSENFELD, A. & KAK, A. C. (1982). *Digital picture processing*. Academic Press, v.1.
- RUBIO, J. C. C. (2000). *Projeto, construção e avaliação de microposicionadores para usinagem de ultraprecisão*. São Carlos. 259p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RUBIO, J. C. C., DUDUCH, J. G. & PORTO, A. J. V. (1996). “Acionamento Direto de Ferramentas de Corte em Máquinas de Ultra-Precisão”. *Anales CIM*, Valdivia (Chile), p. 220 – 223.

- RUSS, J. C. (1995). *The image processing handbook*, CRC Press, ed. 2.
- SCHALKOFF, R. J. (1989). *Digital image processing and computer vision*. John Wiley & Sons, 489 p.
- SCRUBY, C. B. & DRAIN, L. E. (1990). *Laser ultrasonics, techniques and applications*. EUA, Adam Hilger, 447 p.
- SEARS, W. & ZEMANSKY, S. (1977). *Física: calor-ondas-ótica*. Trad. José de Lima Accioli e equipe do Departamento de Física da Universidade de Brasília. Livros Técnicos e Científicos S.A., v. 2, 2 ed. Rio de Janeiro, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 440 p.
- 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.
- 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.
- SJÖBERG, J.; ZHANG, Q.; LJUNG, L.; BENVENISTE, A.; DEYLON, B.; GLORENNEC, P. Y.; HJALMARSSON, H. & JUDTSKY, A. (1995). Nonlinear black-box modeling in system identification: A unified overview. *Automatica*, v. 31, n. 12, p. 1691 – 1724.
- SLOCUM, A. H. (1992). *Precision machine design*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc, 750 p.
- SOMMARGREN, G. E. (1987). A new laser measurement system for precision metrology. *Precision Engineering*, v. 9, p. 179 – 184, Oct.
- SRIVASTAVA, L.; SINGH, S. N. & SHARMA, J. (2003). Parallel self-organizing hierarchical neural network based estimation of degree of voltage insecurity. *Computers and Electrical Engineering*, v. 29, p. 589 – 602.
- SUKHASWAMI, M. B. & PUJARI, A. K. (1996). Restoration of geometrically aberrated images using a self-organising neural network. *Pattern Recognition Letters*, v. 17, p. 1 – 10.
- TANIGUCHI, N. (1983). Current status in, a future trends of ultraprecision machining and ultrafine materials processing. *Annals of the CIRP*, v. 32, n. 2, p. 573 – 582.
- TANIGUCHI, N. (1996). *Nanotechnology: integrated processing systems for ultra-precision and ultra-fine products*. Oxford University Press, New York, 406 p.
- TOMITA, Y.; KOYANAGAWA, Y. & SATOH, F. (1994). A surface motor driven precise

- positioning system. *Precision Engineering*, v. 16, n. 3, p. 184 – 191, Jul.
- TRONCO, M. L. (1999). *Sistema de reconhecimento de imagens baseado no modelo GSN de rede neural*. São Carlos. 244p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- VAN SPENGEN, W. M.; PUERS, R.; MERTENS, R. & DE WOLF, I. (2004). Characterization and failure analysis of MEMS: high resolution optical investigation of small out-of-plane movements and fast vibrations. *Microsystem Technologies*, v. 10, p. 89 – 96.
- VASCONCELOS, G. C. (1995). *Redes neurais e reconhecimento de padrões. II Simpósio Brasileiro de redes neurais*. São Carlos.
- WATANABE, F. Y. (1992). *Desenvolvimento de um atuador hidrostático diferencial e de um sensor optoeletrônico para posicionamento linear de precisão*. São Carlos. 116p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- WECK, M. & BISPINK, T. (1992). Performance analysis of feed-drive systems in diamond turning machining specified test samples. *Annals of the CIRP*, v. 41, n. 1, p. 601 – 604.
- WECK, M. & DAY, M. (2002). Machine concepts for microcutting with diamond tools. *Industry Diamond Review*, v. 62, n. 594, p. 162 – 169.
- WILLIAMS, D. C. (1993). *Optical methods in engineering metrology*. Londres, Chapman & Hall.
- WUERZ, L. J. & QUENELLE, R. C. (1983). Laser interferometer system for metrology and machine tool applications. *Precision Engineering*, v. 5, p. 111 – 114, Jul.
- WYANT, J. (1987). Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems. *Applied Optics*, v. 26, p. 2504 – 2505.
- WYKO® 6000 (1989) – *WYKO CORPORATION*, Manual.
- YAGER, R. R. & FILEV, D. P. (1994). *Essentials of fuzzy modeling and control*. New York. John Wiley & Sons, 388 p.
- YATAGAI, T. (1993). *Intensity based analysis methods – Interferogram analysis*. Ed. Robinson & Reid, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia.
- ZADEH, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*. v. 8, p. 338 – 353.
- ZECCHINO, M. NOVAK, E. & SCHMIT, J. (2003). Optical profiling – Applications Expand. *Photonics Spectra*, p. 68 – 72, Aug.
- ZENZO, S. D.; CINQUE, L. & LEVIALDI, S. (1996). Run-based algorithms for binary image

analysis and processing. *IEEE Transactions on Patter Analysis and Machine Intelligence*, v. 18, n. 1, p. 83 – 89, Jan.

ZHONG, Z. & NAKAGAWA, I. (1992). Development of a microdisplacement table for ultra-precision machining and grinding for curved surfaces by use of it. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, v. 26, n. 2, p. 102 – 107.

## Apêndice I

### I.1. Redes Neurais Artificiais

Redes Neurais Artificiais constituem-se em modelos computacionais paralelos baseados numa unidade atômica, o neurônio (FIGURA I.1). Em geral, esses modelos possuem inspiração neurobiológica, porém, na prática, são algoritmos computacionais representando, de maneira elementar, o mecanismo de funcionamento cerebral. Atualmente, existe uma variedade de redes neurais disponíveis.

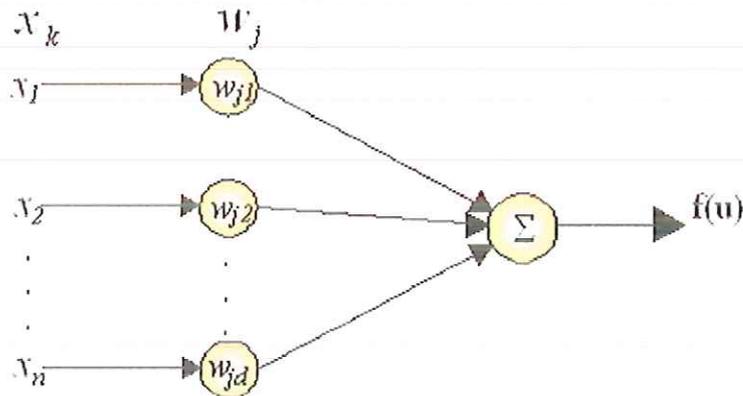


FIGURA I.1 – Representação de um neurônio artificial.

Redes neurais artificiais são caracterizadas pela arquitetura, característica dos neurônios que as compõem e pela regra de treinamento usada para absorção do conhecimento. Os estímulos de entrada de um neurônio são representados por um vetor de dados de entrada  $x_k = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  e a intensidade das sinapses por um vetor peso  $w_j = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jd}]^T$ . A função de ativação ( $f(u)$ ) é calculada a partir de um somatório envolvendo os estímulos de entrada de um neurônio e a intensidade das sinapses associadas à cada uma dessas entradas, gerando um estado de ativação. Existem variações desse modelo básico, assim como várias

funções de ativação. As redes neurais artificiais são formadas pela combinação dessas unidades básicas e apresentam como vantagens as características de adaptabilidade, generalização e tolerância a ruídos, dentre outras (HAYKIN, 1999).

KOHONEN (2001) propõe a divisão de redes neurais em três categorias: redes de transferência de sinal, redes de transferência de estado e redes competitivas.

Nas redes de transferência de sinais, a saída da rede dependerá, única e exclusivamente, do valor de entrada. Essas redes são usadas para transformação de sinais. São exemplos desse tipo de rede os Perceptrons de Múltiplas Camadas (MLP – do inglês *Multi-Layer Perceptron*) e as redes de função de base radial (RBF – do inglês *Radial Basis Function*). Essas redes são usadas como identificadores e classificadores de padrões, controle, avaliação de dados de entrada etc.

As redes de transferência de estado têm como base os efeitos de relaxação. A retroalimentação e a não-linearidade são tal que garantem que o estado de atividade rapidamente convirja para um de seus valores estáveis. Os valores de entrada acionam o estado inicial de atividade, a rede então inicia o processamento até chegar no estado final. São exemplos desse tipo de rede, as redes de Hopfield e a máquina de Boltzman. As principais aplicações dessas redes são: como função de memória associativa e em problemas de otimização, embora também sejam usadas no reconhecimento de padrões.

As redes de aprendizagem competitiva estão baseadas no processo competitivo de aprendizagem entre suas unidades. Uma das principais aplicações dessas redes é a descoberta de agrupamentos de dados. Estão incluídas nessa categoria os Mapas Auto-Organizáveis (KOHONEN, 2001) e ART – *Adaptive Resonance Theory* (FAUSETT, 1994). A aprendizagem competitiva é um processo adaptativo onde os neurônios, numa rede neural artificial, tornam-se gradualmente sensíveis a diferentes categorias de entrada e a conjuntos de amostras num domínio específico do espaço de entrada. O aprendizado dos Mapas Auto-Organizáveis possui o menor grau de supervisão, denominado de supervisão muito fraca e é referido na literatura como aprendizado não-supervisionado (*unsupervised learning*), isto é, o algoritmo de treinamento atua de modo a descobrir categorias para os dados de entrada de acordo com semelhanças de atributos. A rede usa uma medida de correlação entre os vetores de entrada e os vetores de pesos, cuja regra de aprendizado modifica os pesos da rede tal que esses passem a representar classes (categorias) de dados. Esse trabalho de pesquisa concentrou-se nessa última categoria, mais especificamente em Mapas Auto-Organizáveis. Na seção seguinte serão descritos a arquitetura e o algoritmo de aprendizagem de Mapas Auto-Organizáveis.

### I.1.2. Mapas Auto-Organizáveis

Mapas Auto-Organizáveis é um tipo de rede neural competitiva, cuja função principal é mapear os dados de entrada de dimensão  $d$  numa grade de dimensão  $d'$ ,  $d' \ll d$ , de forma que esta grade de neurônios, totalmente conectada ao vetor de entrada pelos vetores de código, ou pesos, represente, de maneira topologicamente ordenada, os dados de entrada (KOHONEN, 2001). Ou seja, o Mapa Auto-Organizável identifica, nos padrões de entrada, os agrupamentos e os correlaciona a regiões específicas da grade de neurônios. A entrada da rede corresponde a um vetor no espaço  $d$ -dimensional em  $\mathfrak{R}^d$ , representado por  $x_k = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$ , sendo  $m$  o número de vetores de entrada. Cada neurônio  $j$  da camada de saída possui um vetor de código  $w$ , também no espaço  $\mathfrak{R}^d$ , associado ao vetor de entrada  $x_k$ ,  $w_j = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jd}]^T$ . Os neurônios da camada de saída estão interconectados por uma relação de vizinhança que descreve a estrutura do mapa.

O Mapa Auto-Organizável foi idealizado a partir da analogia com a região do córtex cerebral humano. Descobriu-se que essa parte do cérebro aloca regiões específicas para atividades específicas e que, para uma determinada ativação cerebral, o grau de ativação dos neurônios diminuía à medida que se aumentava a distância da região de ativação inicial (KOHONEN, 2001).

Existem diferentes topologias para estruturação de um Mapa Auto-Organizável, sendo que a estrutura mais comum é a de duas dimensões.

O algoritmo básico de treinamento de um Mapa Auto-Organizável consiste de três fases. Na primeira fase, competitiva, os neurônios da camada de saída competem entre si, segundo algum critério, geralmente a distância Euclidiana, para encontrar um único vencedor. Na segunda fase, cooperativa, é definida a vizinhança deste neurônio. Na última fase, adaptativa, os pesos do neurônio vencedor e de sua vizinhança são ajustados. A relação de vizinhança entre os neurônios é estabelecida segundo alguma função. O principal objetivo da função vizinhança é controlar o nível de atuação dos neurônios em torno do neurônio vencedor do processo competitivo. Seguindo o modelo neurobiológico tem-se que o nível de atuação dos neurônios vizinhos decai à medida que o mesmo se distancia do neurônio vencedor.

Resumidamente, o algoritmo de um Mapa Auto-Organizável funciona da seguinte forma:

- (a). Escolha inicial aleatória dos pesos sinápticos ( $w_j$ );
- (b). Apresentação do padrão de entrada ( $x_k$ ) à rede;

(c). Achar o neurônio vencedor cujo peso sináptico ( $w_j$ ) esteja mais perto (em termos de distância Euclidiana) do vetor de entrada  $x_k$  apresentado;

(d). Ajustar os pesos sinápticos do neurônio vencedor e de todos os que se encontram dentro de uma certa vizinhança centrada nele, de forma a que estes vetores peso ( $w_j$ ) fiquem cada vez mais perto (vetorialmente) do centro de gravidade da classe de padrões que representam. Essa vizinhança do neurônio vencedor é, na verdade, uma função da distância entre ele e os demais neurônios do mapa de características topológicas e varia, dinamicamente, durante o aprendizado;

(e). Continuar a partir do item (b) até não haver mais mudanças sensíveis dentro do mapa de características.

Maiores detalhes a respeito das características e funcionamento de Mapas Auto-Organizáveis podem ser encontrados, por exemplo, em HAYKIN (1999), KOHONEN (2001) e CRIVELARO (2004).

## *Apêndice II*

### **II.1. Desenvolvimento Matemático do Fenômeno de Interferência**

A teoria ondulatória que descreve a natureza eletromagnética da luz constitui um ponto de partida natural para a análise destes fenômenos. As perturbações ópticas são soluções de uma equação de derivadas parciais de segunda ordem, linear e homogênea. As soluções desta equação de ondas satisfazem o princípio de sobreposição, segundo o qual o campo elétrico total ( $\vec{E}$ ), em qualquer ponto do espaço em que duas ou mais ondas se sobrepõem, é igual a soma vetorial das ondas intervenientes. A interferência óptica consiste na interação entre duas ou mais ondas luminosas, com geração de um padrão em que a irradiação total difere da soma das individuais (SEARS & ZEMANSKY, 1977).

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \vec{E}_n \quad (\text{II.1})$$

Onde  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}_2$  e  $\vec{E}_n$  são campos elétricos produzidos separadamente pelas fontes num único ponto.

Normalmente, os interferômetros são variações do interferômetro de Michelson, ilustrado por um modelo simplificado na FIGURA II.1.

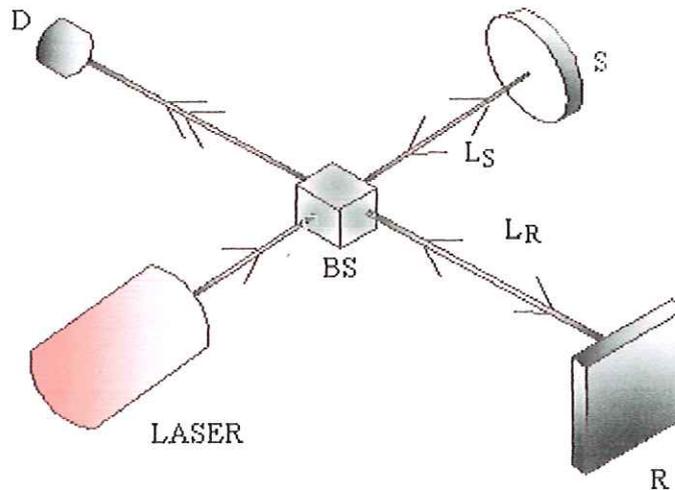


FIGURA II.1 – Interferômetro de Michelson.

O feixe de luz proveniente da fonte LASER é monocromático e colimado, tal que a frente de onda é aproximadamente plana. Esse feixe LASER é dividido em dois no divisor de feixes (BS), que é um espelho semitransparente, e direcionado em caminhos ortogonais, normalmente chamados de braços do interferômetro. Um dos feixes é chamado feixe de referência, este incide no espelho fixo (R), o outro é chamado feixe sinal e incide no espelho da amostra (S) em movimento, cujo deslocamento deseja-se medir. Os feixes são refletidos pelos espelhos, retornando ao divisor de feixes e interferindo-se no caminho em direção ao fotodetector (D). Duas observações importantes são necessárias aqui: se o LASER não for perfeitamente monocromático, os caminhos ópticos referência  $L_R$  e sinal  $L_S$  têm de ser aproximadamente iguais, o erro tolerável é de poucos milímetros (menor que 2 mm); deve-se incidir sobre o fotodiodo apenas o máximo central do sinal de interferência. Para aumentar a sensibilidade do sistema interferométrico os feixes LASER interferentes devem ser expandidos (NADER, 2002).

O deslocamento da superfície analisada produz uma variação na intensidade da interferência, a qual passa por máximos e por mínimos. Isso ocorre porque a luz é uma onda de natureza eletromagnética, tal que quando a superfície analisada desloca-se é produzida uma variação na fase entre os feixes referência e sinal. A intensidade máxima é obtida quando a interferência é construtiva, isso ocorre quando a diferença de fase entre os feixes equivale a deslocamentos de  $n\lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do LASER e  $n$  é um número inteiro. A intensidade mínima é obtida quando a interferência é destrutiva, isso ocorre quando a diferença de fase equivale a um deslocamento de  $\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$ .

Pelo princípio de superposição de ondas obtém-se o tratamento matemático da interferência. Apesar da luz ser uma onda eletromagnética, é comum realizar o tratamento matemático apenas considerando o campo elétrico ( $\vec{E}$ ), principalmente porque a grandeza mensurável é a intensidade, que é proporcional ao módulo do quadrado do campo elétrico ( $I = |\vec{E}|^2$ ) (FOWLES, 1968).

Por simplicidade matemática e aproximação a um sistema interferométrico real com a fonte LASER verticalmente polarizada, o desenvolvimento teórico será ilustrado para ondas eletromagnéticas monocromáticas polarizadas verticalmente, tal que as ondas eletromagnéticas que se somam podem ser descritas na notação complexa como:

$$\vec{E}_R = \vec{a}e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{u}_R)} = \vec{A}e^{i\omega t} \quad (\text{II.2})$$

$$\vec{E}_S = \vec{b}e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{u}_S)} = \vec{B}e^{i\omega t}$$

Onde  $\vec{a}e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{u}_R)}$  e  $\vec{b}e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{u}_S)}$  são expressões exponenciais complexas para um plano de ondas harmônicas (FOWLES, 1968).

Sendo:

$$\vec{A} = \vec{a}e^{-i(\vec{k}\vec{u}_R)} \quad \vec{B} = \vec{b}e^{-i(\vec{k}\vec{u}_S)} \quad (\text{II.3})$$

Nestas equações, a frequência das ondas eletromagnéticas é  $\omega$ , propagando-se num tempo  $t$ . O vetor de onda é  $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda. Os vetores  $\vec{u}_R$  e  $\vec{u}_S$  representam o deslocamento das ondas, tal que a diferença entre esses termos dará a diferença de caminho óptico ( $\Delta\vec{u}$ ), e conseqüentemente a diferença de fase  $\phi$  entre as ondas.

A resultante da soma das ondas eletromagnéticas é:

$$\vec{E} = \vec{E}_R + \vec{E}_S \quad (\text{II.4})$$

Escrevendo a eq. (II.4) em função da intensidade, obtém-se:

$$I = |\vec{E}^2| = |(\vec{E}_R + \vec{E}_S) \cdot (\vec{E}_R + \vec{E}_S)| = |\vec{E}_R^2| + |\vec{E}_S^2| + 2|\vec{E}_R \cdot \vec{E}_S| \quad (\text{II.5})$$

A intensidade resultante será dada pela eq. (II.6).

$$I = I_R + I_S + 2|\vec{E}_R \cdot \vec{E}_S| \quad (\text{II.6})$$

$I_R$  e  $I_S$  são as intensidades do feixe referência e sinal, respectivamente, e  $I$  é a intensidade resultante. Toda a informação sobre a interferência está contida no terceiro termo da equação. Ele carrega informação da fase da onda ou se há coerência entre as ondas (GUENTHER, 1990). Os termos da coerência não são tratados neste texto, podem ser encontrados em FOWLES (1968). Resolvendo o terceiro termo da eq. (II.6), obtém-se:

$$2|\vec{E}_R \cdot \vec{E}_S| = \Re\{\vec{E}_R \cdot \vec{E}_S\} = \Re\{ab \exp[-i(ku_R - wt) + i(ku_S - wt)]\} \quad (\text{II.7})$$

$\Re$  significa a parte real da eq. (II.7).

$$\Re\{\vec{E}_R \cdot \vec{E}_S^*\} = ab \cos(ku_R - ku_S) \quad (\text{II.8})$$

De acordo com as eq. (II.5) e (II.7) as intensidades  $I_R$  e  $I_S$  são da forma:

$$I_R = |E_R^2| = \frac{1}{2} \Re\{\vec{E}_R \cdot \vec{E}_R^*\} = \frac{a^2}{2} \quad (\text{II.9})$$

$$I_S = |E_S^2| = \frac{1}{2} \Re\{\vec{E}_S \cdot \vec{E}_S^*\} = \frac{b^2}{2}$$

Onde o símbolo (\*) denota conjugado complexo.

O que leva à:

$$2|\vec{E}_R \cdot \vec{E}_S| = ab \cos(ku_R - ku_S) = 2\sqrt{I_R I_S} \cos \phi \quad (\text{II.10})$$

A intensidade mensurável é então:

$$I = I_R + I_S + 2\sqrt{I_R I_S} \cos \phi \quad (\text{II.11})$$

As fases ( $\phi$ ) correspondentes aos pontos de intensidade máxima ( $I_{MAX}$ ) e de intensidade mínima ( $I_{MIN}$ ) são obtidas da eq. (II.11). Estes pontos equivalem às seguintes fases:

$$I_{MAX} = I_R + I_S + 2\sqrt{I_R I_S}, \quad \text{para } \phi = 0, 2\pi, \dots, 2n\pi, \quad (\text{II.12})$$

$$I_{MIN} = I_R + I_S - 2\sqrt{I_R I_S}, \quad \text{para } \phi = \pi, 3\pi, \dots, (2n-1)\pi,$$

Das quais obtém-se:

$$I_R + I_S = \frac{I_{MAX} + I_{MIN}}{2}, \quad (\text{II.13})$$

$$2\sqrt{I_R I_S} = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{2},$$

Que permitem reescrever a eq. (II.11):

$$I = \frac{I_{MAX} + I_{MIN}}{2} + \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{2} \cos(\phi) \quad (\text{II.14})$$

A eq. (II.11) ou a eq. (II.14) traz informação a respeito da fase ( $\phi$ ), o que permite calcular o deslocamento. Essa fase deve-se a:

$$\phi = ku_R - ku_S \quad (\text{II.15})$$

A fase mostrada na eq. (II.15) aparece quando há diferença de caminho óptico na propagação de cada onda. A modulação da fase num interferômetro pode ser induzida pelo movimento de um espelho, deflexionando uma grade, rotacionando uma placa de meia onda ou usando um modulador óptico acústico ou opto-eletrônico, ou usando um LASER Zeeman (MELÃO, 1998). Deslocamento da fase proveniente dos movimentos de espelhos, grades e deflexão de placas de vidro podem produzir deslocamentos contínuos ou discretos entre os feixes referência e sinal (WYANT, 1987). Em um interferômetro (Michelson e Fizeau) pode-se dizer que as medições são realizadas considerando que o espelho de referência (R) está fixo e a amostra espelhada (S) está em movimento. Neste caso, as distâncias referência ( $u_R$ ) e sinal ( $u_S$ ) são percorridas pelo feixe LASER no caminho de ida e volta do divisor de feixes aos espelhos. Assim, a variação do caminho óptico é:

$$2\Delta u = 2(u_R - u_S)$$

E a diferença de fase é dada pela eq. (II.16) ou eq. (II.17).

$$\phi = 2k(u_R - u_S) = 2k\Delta u \quad (\text{II.16})$$

Ou

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta u \quad (\text{II.17})$$

Tal que, para uma diferença de fase de  $\pi$ , a diferença de caminho óptico é mostrada pela eq. (II.18).

$$\Delta u = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{II.18})$$

Da eq. (II.17), a variação da intensidade será:

$$I = \frac{I_{MAX} + I_{MIN}}{2} + \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{2} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \Delta u\right) \quad (\text{II.19})$$

## *Apêndice III*

### **III.1. Sistema de Fixação de Peças em Máquinas-ferramenta de Ultraprecisão**

A fixação e montagem de peças em placas de máquinas-ferramenta é uma das fontes primárias de erros (assimetria geométrica das peças), os quais devem ser considerados em todos os projetos de processos de fabricação. O torneamento de componentes ópticos com ferramenta de diamante é muito diferente das técnicas convencionais de fabricação, como lapidação e polimento. Contudo, quando se pensa em fixação, as duas técnicas são muito semelhantes. Placas de fixação para máquinas de ultraprecisão devem ter características, tais que, impeçam possíveis distorções das peças. Outra característica desejável é a capacidade de emprego destas placas na fixação de peças para o torneamento fora de centro (*fly cutting*) e também a possibilidade de trabalhar várias superfícies em uma única fixação. Entretanto, essas duas últimas características nem sempre são possíveis quando é essencial a eliminação ou atenuação de distorções nas peças. A fixação é um dos mais importantes, e muitas vezes um dos mais difíceis aspectos a ser considerado em um projeto de máquina-ferramenta de ultraprecisão. É uma área onde engenharia e experiência devem ser exploradas no limite para a obtenção de peças com elevada qualidade superficial e de forma (KÖNIG et al., 1991).

As placas de fixação devem apresentar várias características. Dentre elas, as mais importantes em máquinas-ferramenta de ultraprecisão são:

- a) Suportar a peça com pouca ou nenhuma deformação ou distorção;
- b) Ser fáceis de usar;
- c) Proporcionar fácil montagem e desmontagem de peças;
- d) Permitir a centragem do eixo-árvore, da máquina e da peça;
- e) Proporcionar ajuste de balanceamento para peças que não têm simetria rotacional.

Existem vários sistemas de fixação aplicados em sistemas de torneamento, como por exemplo, montagem em único ponto; montagem em três pontos; pinças; embutimento e placa de vácuo. No entanto, os primeiros três métodos citados tendem a gerar tensões localizadas nas peças a serem fixadas (KÖNIG et al., 1991), por isso são descartados por não serem adequados em aplicações de ultraprecisão. Quanto à fixação por embutimento, sua principal vantagem é o apoio uniforme da peça sem a necessidade do contato entre as superfícies da placa e da peça. Este tipo de fixação é especialmente usado em peças cujo formato não permite ou torna difícil o contato entre as superfícies em questão. A desvantagem é o tempo de preparo da máquina e o tempo que se perde após a usinagem para se efetuar a limpeza.

O sistema de fixação a vácuo é o mais usado em aplicações de ultraprecisão, pois apresenta características importantes, tais como, limpeza de processo, tanto para montar quanto para desmontar a peça e permite a fixação de toda a superfície a ser usinada com um mínimo de tensão localizada.

### **III.1.1. Placa de Vácuo**

Componentes ópticos são fixados de forma mais efetiva usando-se placas de vácuo (FIGURA III.1). A fixação por vácuo requer grande planicidade da superfície da peça que ficará em contato com a placa. O contato total entre a placa e superfície da peça (exceto nas áreas necessárias para passagem de ar) deve ser o melhor possível a fim de evitar que haja distorções no lado da peça que não está apoiado na placa.

Para obter um perfeito contato entre a superfície de fixação da placa e a superfície da peça a ser usinada, pode ser necessário usar um processo iterativo, isto é, usina-se a superfície desejada, depois esta superfície é presa na placa de vácuo para que seja usinado o lado oposto. Se o contato entre as duas superfícies não for o desejado, este mesmo processo pode ser repetido quantas vezes forem necessárias. Cada iteração resultará em uma aproximação da melhor condição de conformidade entre as duas superfícies. Este processo demorará mais para convergir quanto menor for a relação espessura / diâmetro da peça a ser usinada.

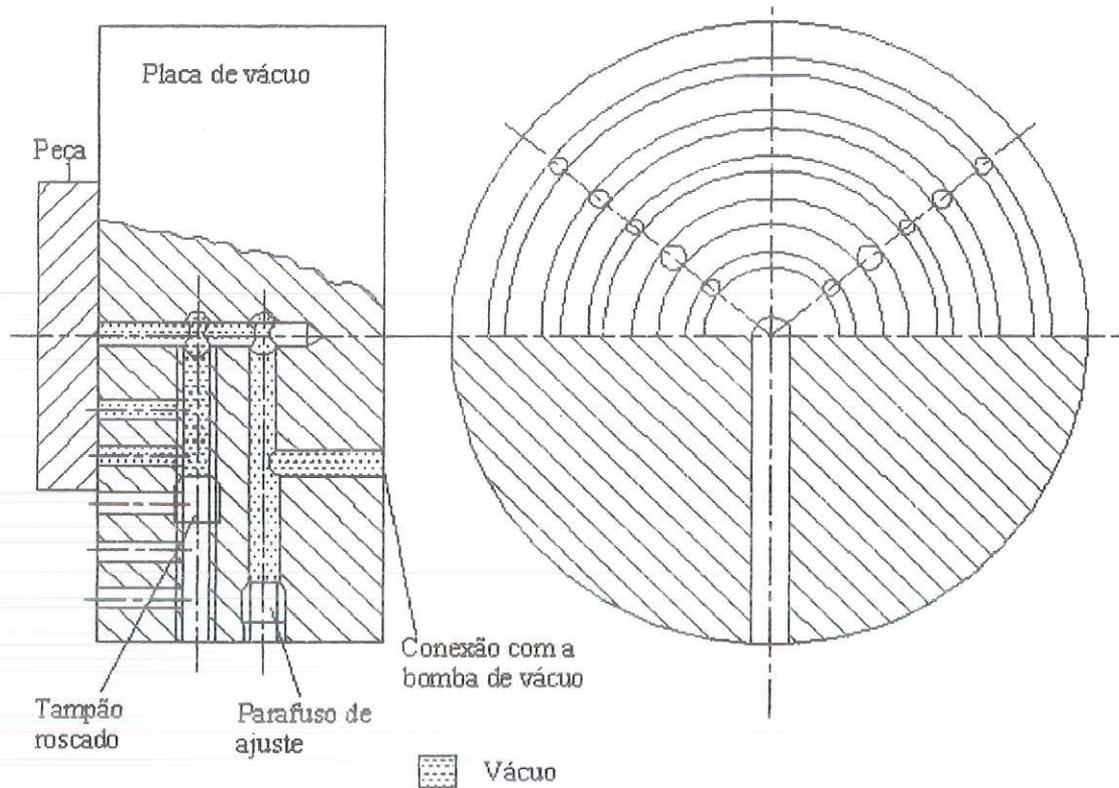


FIGURA III.1 – Princípio de uma placa de vácuo (KÖNIG et al., 1991).

Esse tipo de fixação tem como desvantagem os esforços adicionais necessários para unir as superfícies, e também a incapacidade de fixar peças pequenas adequadamente. Dependendo da rigidez no contato das superfícies e da espessura da peça montada, podem ocorrer grandes distorções na superfície a ser usinada. Um meio de se determinar as distorções causadas pela fixação é medindo-se a peça enquanto ainda está acomodada na placa, e depois é repetido o procedimento fora da placa. A diferença entre as medições indica a distorção.

As forças centrífugas devem ser consideradas no projeto de sistemas de fixação e na escolha da velocidade do eixo-árvore. Um meio de medir os deslocamentos oriundos de forças centrífugas é usar um transdutor que pode medir os deslocamentos enquanto a máquina está trabalhando (eixo-árvore girando). Um outro meio é usar o método dos elementos finitos (MEF). Sabe-se que estes deslocamentos podem ser controlados por meio de compensação no comando numérico da máquina-ferramenta.