

T169/97
✓

UM ALGORITMO PARA COMANDO DE UMA MESA DE MICROPOSICIONAMENTO ANGULAR USANDO INTERFEROMETRIA

DANIELA LARA DOS SANTOS

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

DEDALUS - Acervo - EESC



31100036313



ORIENTADOR: Prof. Ph.D. Jaime G. Duduch

SÃO CARLOS
1997

| | |
|--------|----------------|
| Class. | <i>Sci</i> |
| Cult. | <i>5084</i> |
| Tombo | <i>T169/97</i> |

Área: Engenharia Mecânica

31100036313

st 0934077

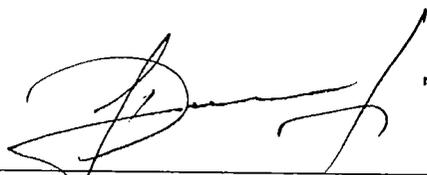
Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

S237a Santos, Daniela Lara dos
Um algoritmo para comando de uma mesa de micro posicionamento angular usando interferometria / Daniela Lara dos Santos. -- São Carlos, 1997.
Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.
Área: Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Dr. Jaime G. Duduch
1. Interferômetro de Fizeau. 2. Atuadores piezoelétricos. 3. Microposicionadores. 4. Usinagem de ultra-precisão. 5. Crescimento de regiões. I. Título.

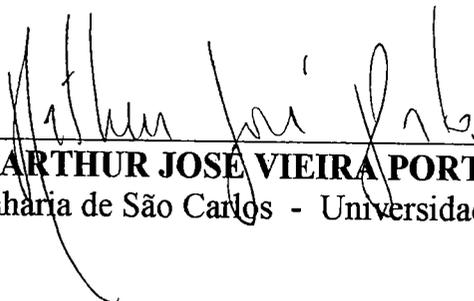
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **DANIELA LARA DOS SANTOS**

Dissertação defendida e aprovada em 08-8-1997
pela Comissão Julgadora:



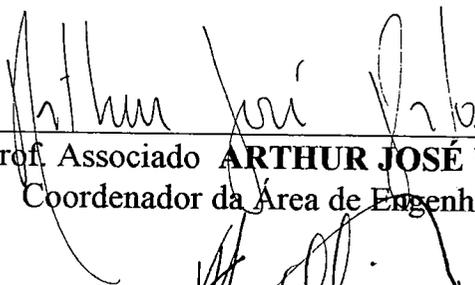
Prof. Doutor **JAYME GILBERTO DUDUCH (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



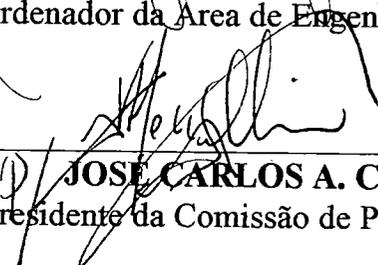
Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Profa. Doutora **VILMA ALVES DE OLIVEIRA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

“ Sejam quais forem as coisas que desejares, quando orares acredita que as receberás,
e as terás”.

‘O Messias’

Dedico esta dissertação aos meus pais José
Lázaro dos Santos e Zarife Zuleica de Lara
Santos que me apoiaram em todos os
momentos.

Agradecimentos

Ao Prof. PhD. Jaime G. Duduch pela oportunidade do desenvolvimento desta pesquisa e pela orientação.

A Prof^a. PhD. Vilma A. Oliveira pela atenção.

Ao Prof. MSc Alberto Eduardo Barbosa pelo apoio, colaboração e sugestões que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Arthur J. V. Porto pelas sugestões apresentadas.

Agradeço ao MSc Henrique J. Q. Oliveira e ao Ricardo L. Vilela pela contribuição e apoio.

O agradecimento aos amigos MSc Inácio Regiani, MSc Márcia Aparecida Silva e ao MSc Humberto de Oliveira Lêdo pelo incentivo e conselhos dados.

A Regina Celia Chaves Regiani pelo apoio dedicado no decorrer destes dois anos.

A toda minha família pela compreensão, confiança e paciência sem os quais tudo teria sido difícil, e pelo apoio e incentivo ao longo de toda minha vida.

A todos que colaboraram para a realização deste trabalho e aos amigos do LAMAFE.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Pesquisa pelo financiamento da pesquisa.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Lista de Figuras..... | i |
| Lista de Tabelas..... | iii |
| Lista de Abreviaturas e Símbolos | iv |
| Resumo..... | vi |
| Abstract..... | vii |
| | |
| Capítulo 1 Introdução..... | 01 |
| | |
| 1.1 Princípios da Engenharia de Ultra-Precisão..... | 01 |
| 1.2 Usinagem de Ultra-Precisão..... | 02 |
| 1.3 Objetivo do Projeto..... | 04 |
| 1.4 Sumário..... | 05 |
| | |
| Capítulo 2 Projeto de Máquina de Ultra-Precisão - Revisão..... | 06 |
| | |
| 2.1 Introdução..... | 06 |
| 2.2 Usinagem de Materiais Frágeis..... | 08 |
| 2.3 Controle Automático para Usinagem de Ultra-Precisão..... | 12 |
| 2.3.1 Correção de Erros..... | 12 |
| 2.3.2 Alguns Exemplos de Sistemas de Controle Automático de Erros..... | 15 |
| 2.3.3 Sistema de Controle de Posição..... | 16 |
| 2.3.4 Servo-Atuadores em Máquina de Ultra-Precisão..... | 19 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Capítulo 3 | Interferometria | 24 |
| 3.1 | Interferências | 24 |
| 3.2 | Condições de Interferência | 25 |
| 3.3 | Interferômetro Óptico | 29 |
| 3.4 | Aplicações da Interferometria Laser | 33 |
| 3.5 | Exemplo de Aplicação de Interferômetro Fizeau | 37 |
| | | |
| Capítulo 4 | Atuadores Piezoelétricos | 45 |
| 4.1 | Introdução | 45 |
| 4.2 | Funcionamento e Características | 45 |
| 4.3 | Aplicações de Atuadores na Usinagem de Ultra-Precisão | 48 |
| 4.4 | Outras Aplicações | 50 |
| | | |
| Capítulo 5 | Projeto | 51 |
| 5.1 | Introdução | 51 |
| 5.2 | Desenvolvimento de Algoritmo para Correção do Ângulo de Posicionamento da Mesa | 52 |
| 5.2.1 | Introdução | 52 |
| 5.2.2 | Hardware | 54 |
| 5.2.3 | Software: Tratamento da Imagem | 57 |
| 5.2.4 | Procedimento de Cálculo da Número de Franjas e Inclinação | 63 |
| 5.2.5 | Procedimento de Compensação | 64 |
| 5.2.6 | Procedimento para Testes do Algoritmo | 71 |
| 5.2.7 | Roteiro para o Teste do Algoritmo | 72 |

| | | |
|-------------------|---|-----------|
| Capítulo 6 | Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros..... | 76 |
| 6.1 | Conclusões..... | 74 |
| 6.2 | Sugestões para Futuros Trabalhos..... | 75 |
| | Referências Bibliográficas..... | 76 |
| | Apêndice.I..... | 84 |
| | Apêndice.II..... | 88 |
| | Apêndice.III..... | 119 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Progresso da Usinagem nos Respetivos Anos..... | 02 |
| Figura 2.1 - Comparação entre Usinagem Manual e CNC..... | 14 |
| Figura 2.2 - Correção do Erro de Realimentação..... | 16 |
| Figura 2.3 - Controle do Erro de Realimentação- Dois eixos..... | 17 |
| Figura 2.4 - Mapeamento de Erros Usando a Superfície de Referência..... | 19 |
| Figura 2.5 - Localização da Peça e da Ferramenta em Relação a Base..... | 21 |
| Figura 2.6 - Interferômetro Encurtando a Cadeia entre Peça e Ferramenta..... | 22 |
| Figura 2.7 - Correção dos Erros não Sistemáticos usando: (a) Estrutura Metrológica; (b)Correção com Referência na Própria Peça..... | 23 |
| Figura 3.1 - Duas Ondas Sinusoidais com uma Diferença de Fase de $\pi/4$ e uma Diferença de Percurso de $\lambda/8$ | 28 |
| Figura 3.2 - Interferômetro de Mach-Zender..... | 31 |
| Figura 3.3 - Interferômetro de Michelson..... | 32 |
| Figura 3.4 - (a) Interferômetro de Michelson com um Circuito Eletrônico Acoplado; (b) Interferômetro de Michelson com o Caminho Óptico Duplicado para Aumentar a Resolução..... | 36 |
| Figura 3.5 - Representação Esquemática da Estrutura Considerando Três Eixos: a Normal Superfície Referente ao Interferômetro, a do Eixo, e a Normal ao Plano da Superfície de Prova..... | 38 |
| Figura 3.6 - Interferômetro de Fizeau..... | 39 |
| Figura 3.7 - Padrões de Franjas Nulas..... | 40 |
| Figura 3.8 - Franjas com Passos Constantes..... | 41 |
| Figura 3.9 - Franjas Estacionárias..... | 42 |
| Figura 3.10 - Franjas de Passos e Inclinações Variadas..... | 43 |
| Figura 4.1 - Construção em Pilhas dos Atuadores Piezoelétricos..... | 46 |
| Figura 4.2 - Posicionamento Incerto Devido ao Efeito de Histerese em Atuadores Piezoelétricos de Cerâmica: (a)Posicionamento de Controle de Ciclo- Aberto; (b)Típica Resposta de Histerese..... | 47 |
| Figura 5.1 - Cálculo da Inclinação da Mesa..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.2 - Componentes que integram o Sistema a ser Desenvolvido..... | 54 |
| Figura 5.3 - Tipos de Vizinhanças na Representação Matricial (a) vizinhança 4-conectado, (b) vizinhança 8-conectado..... | 57 |
| Figura 5.4 - (a) Filtro Passa-alta, (b) Filtro Passa-baixa, © Filtro Passa banda, (d) Filtro Para - banda..... | 58 |
| Figura 5.5 - Thresholding..... | 59 |
| Figura 5.6 - Detectores de Bordas: (a) Sobel, (b) Robert..... | 60 |
| Figura 5.7 - Uma Região 3x3 de uma Imagem | 62 |
| Figura 5.8 - Filtro Mediana..... | 62 |
| Figura 5.9 - Cálculo do Número de Franjas pelo Método Crescimento de Regiões.. | 64 |
| Figura 5.10 - Coordenadas Ortogonais..... | 65 |
| Figura 5.11- Coordenadas Ortogonais A, B, C, Distantes de R..... | 66 |
| Figura 5.12 - Montagem para Testes do Algoritmo..... | 71 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Tolerâncias para Componentes de Produtos Modernos..... | 11 |
| Tabela 4.1 - Aplicações dos Atuadores Piezoelétricos..... | 50 |

Lista de Abreviaturas e Símbolos

- μm - Micrometro (10^{-6}m)
- mm - Milímetro(10^{-3}m)
- nm - Nanometro (10^{-9}m)
- CCD - Charge-Coupled Device
- IC - Integrated Circuit
- LSI - Large Scale Integration
- VLSI - Very Large Scale Integration
- CD - Discos Compacto
- CNC - Comando Nunérico Computadorizado.
- C_m - Custo Homem
- C_o - Outros Custos
- C_{to} - Custo Total
- C_t - Custo Ferramenta
- LVDT - “Linear Variable Differential Transformer”
- DC - Corrente Contínua
- AC - Corrente Alternada
- RVDTs - Rotary Variable Differential Transducer
- PZT - Lead Titanete Zircanate
- NC - Comando Numérico
- $I_{\text{máx}}$ - Máxima Intensidade no Centro da Franja
- I - Distribuição da Intensidade sobre a Superfície
- F - “Finura” do Sistema
- ϕ - Ângulo Iluminado
- λ - Comprimento de Onda ($\lambda=638,2\text{ nm}$)
- R - Intensidade Refletida de Duas Superfícies
- ν - Número de Ondas por Unidades de Tempo
- ω - Frequência Angular
- χ - Número de Ondas
- Y - Frente de Onda

A - Amplitude

R - Posição Radial dos Atuadores

Z_2, Z_3 - Deslocamentos dos Atuadores

RESUMO

SANTOS, D. L. (1997). Um algoritmo para comando de uma mesa de microposicionamento angular usando interferometria. São Carlos, 1997. 124p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Esse trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de microinclinação capaz de posicionar peças ou outros dispositivos em máquinas precisão e ultra-precisão. A inclinação da mesa tem acionamento através de microposicionadores (por exemplo, atuadores piezoelétricos) cujo deslocamento é monitorado por um interferômetro de Fizeau. A imagem da peça é analisada usando a técnica de crescimento de regiões, a qual calcula o número e a direção das franjas. O algoritmo é aplicado para fornecer o sinal de realimentação para os atuadores para a correção da posição da mesa. Este procedimento pode ser usado para componentes de usinagem de ultra-precisão e para o controle durante o processo obtendo alto nível de precisão em usinagem de ultra-precisão.

Palavras chave: Interferômetro de Fizeau, atuadores piezoelétricos, usinagem de ultra precisão, microposicionadores, crescimento de regiões.

ABSTRACT

This work describes the development of a micro-tilt stage monitoring system capable of positioning a workpiece on a diamond turning (grinding) machine. The micro-tilt stage will be driven by micropositioners (possibly piezoelectric actuators) whose displacement are monitored (closed loop system) by a Fizeau interferometer. The workpiece interference image is analysed using region growing techniques which deliver the number and direction of fringes. Having this information an appropriate algorithm is applied to provide convenient feedback signals to the actuators to correct the workpiece position. This procedure can be used to preset components for ultraprecision machining and, foreseeably, for in-process control in order to obtain the required high levels of precision on precision machines.

Keywords: Fizeau interferometer, piezoelectric actuators, diamond turning machine, micropositioners, region growing.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Princípios da Engenharia de Ultra-Precisão

A engenharia de ultra-precisão tem sido reconhecida como um corpo de conhecimento, um grupo de disciplinas e um avanço tecnológico que é estrategicamente importante no desenvolvimento competitivo internacional [McKeown, 1986; Duduch et al 1996]. Seu campo de atuação (produtos e processos) situa-se na linha de fronteira entre o realizável e pretendido. Usa, pois, a melhor tecnologia disponível em materiais, ferramentas e máquinas. Seu alcance muda conforme novas tecnologias se desenvolvem.

A figura 1.1 retrata bem essa característica mostrando o desenvolvimento da exatidão da usinagem nos últimos anos. Processos de remoção de material que usam ferramentas sólidas, tais como torneamento com ponta única de diamante e retificação com rebolo de diamante vêm sob a categoria de usinagem de precisão, porém hoje já se estabelece em regiões de microtecnologia onde tolerâncias estão na faixa submicrométrica, devido a avanços no projeto, construção e controle das máquinas-ferramentas

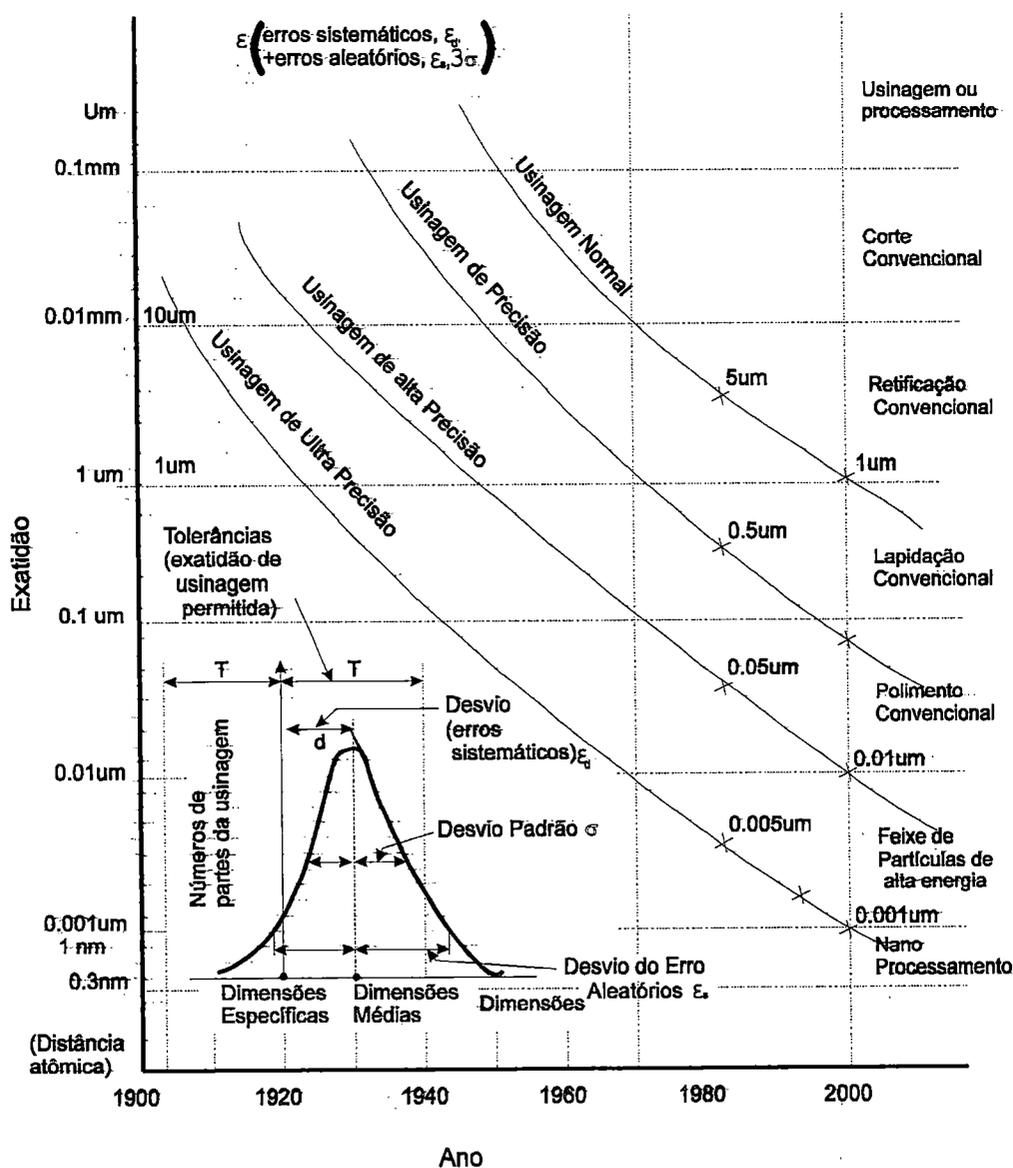


Figura 1.1 Progresso da Usinagem nos Respetivos Anos [Taniguchi, 1994].

1.2 Usinagem de Ultra-Precisão

Usinagem de ultra-precisão envolve os seguintes aspectos: alta qualidade dimensional e forma, baixa rugosidade superficial e baixo índice de danos subsuperficiais.

Desde alguns anos já é possível a usinagem com ferramenta de diamante de metais tais como níquel eletrolítico, cobre e ligas de alumínio com acabamentos superficiais, tais como lapidação, retificação, torneamento com ponta única de diamante, polimento,

abaixo de 10 nm rms. ($1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6}\text{m}$; $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9}\text{m} = 0.039 \mu\text{in}$) e com formas complexas.

O termo superfície com forma complexa exclui operações que resultam em superfícies com formas simples embora com elevada exatidão que podem ser fabricadas com procedimentos tradicionalmente utilizados. Exemplos são o polimento de lentes esféricas e as superfícies planas tais como wafer de silício para semicondutores industriais [Franse, 1990].

Um ramo particular da usinagem de ultra-precisão é o torneamento de materiais frágeis com ferramenta de diamante. Embora a usinagem de metais através dessa tecnologia já esteja bastante estabilizada, a de materiais frágeis ainda requer muitos esclarecimentos.

Materiais tais como vidro e cerâmica são classificados como frágeis porque eles são caracteristicamente suscetíveis a fraturas quando sujeitos a concentração de tensão. [Abe, 1991].

Embora a fragilidade faça com que a usinagem desses materiais se torne extremamente difícil, a demanda desses materiais para componentes de precisão tem crescido significativamente pelas suas propriedades físicas, mecânicas e ópticas superiores. Avanços nos processos de manufatura e projeto de máquina de ultra-precisão são portanto importantes para a produção econômica desses componentes.

Para alcançar dimensões e tolerâncias ópticas em produções em série, há a necessidade de rigorosos programas de pesquisa e desenvolvimento em:

- processos de usinagem de ultra-precisão;
- produção de materiais com alta pureza e homogeneidade;

- sistemas de ultra-precisão controlados numericamente por computador (CNC), exploração de sistemas de controle adequados à ultra-precisão. [McKeown, 1986; Taniguchi, 1994].

Este trabalho não visa o estudo de usinagem de ultra-precisão, mas sim contribui para melhorar a capacidade de uma máquina-ferramenta produzir superfícies que atendam à crescente exigência de acuracidade, confiabilidade e custo, permitindo e/ou facilitando a usinagem de materiais frágeis, melhorando um aspecto crítico de projeto: o posicionamento da peça na máquina.

1.3 Objetivo do Projeto

O objetivo desse trabalho é desenvolver um sistema computacional capaz de controlar, através de interferometria laser, uma mesa niveladora para o microposicionamento angular de peças ou ferramentas em máquinas de ultra-precisão, visando melhorar a capacidade dessas máquinas de produzir superfícies com qualidade óptica, especialmente em materiais frágeis.

A imagem interferométrica da própria peça ou superfície de referência na mesa é utilizada como parâmetro de controle para os atuadores que serão responsáveis pelo nivelamento da mesa com relação ao eixo óptico do interferômetro.

Esse trabalho usa superfícies planas como referência objetivando principalmente o alinhamento de peças em máquinas para usinagem de materiais frágeis, a fim de conduzirem-se testes de usinagem em operação de faceamento. Para isso é necessário alinhar o eixo do interferômetro e peça pré-usinada (plana) dentro de aproximadamente $0.5 \mu\text{rad}$ usando o interferograma da peça toda (interferômetro de Fizeau).

1.4 Sumário

Esse trabalho é dividido em cinco capítulos.

O capítulo I dá uma introdução ao assunto apresentando os princípios da usinagem de ultra-precisão, posição da usinagem de ultra-precisão em relação a outros processos de aplicação e o objetivo do trabalho.

O capítulo II apresenta revisão bibliográfica da usinagem de ultra-precisão e de requisitos necessários de projeto para a realização dessa tecnologia.

O capítulo III discute a interferometria como ferramenta para monitoramento em máquinas ferramentas da ultra-precisão.

O capítulo IV discute atuadores piezoelétricos e suas aplicações

O capítulo V mostra o tratamento da imagem interferométrica e a programação.

O capítulo VI mostra a conclusão e trabalhos futuros

A tarefa do programa apresentado é automatizar o processo de posicionamento angular de peças (ou ferramentas) tanto quanto possível, dando atenção à estratégia de controle e a capacidade computacional disponível.

CAPÍTULO 2

PROJETO DE MÁQUINA DE ULTRA PRECISÃO - REVISÃO

2.1 Introdução

Tem havido crescente interesse em máquina de ultraprecisão nos últimos anos, estimulando a atividade em pesquisas e investimentos no assunto [Tsuwa, 1979; Wills-Moren et al, 1982; McKeown, 1986; Wu & Ni, 1989; Duduch et al, 1996]. A mais evidente razão é, talvez, a necessidade de produzir produtos de alta qualidade economicamente [McKeown, 1987] e, para realizar isto, exatidão dos componentes da máquina aliada aos recursos limitados e o tempo, e o desenvolvimento de novos materiais tecnológicos.

Precisão e ultra-precisão não são definições fixas, elas mudam com o progresso e tempo. Em 1940 a mandrilhadora vertical, com repetibilidade de 1 μm provavelmente seria classificada como um equipamento de alta precisão. Meio século depois, repetibilidade melhorou de uma ordem de magnitude [Duduch, 1993].

A expressão ultra-precisão, entretanto, pode ter o significado amplo de elevada exatidão dimensional possível, com o equipamento disponível a mais.

A usinagem de ultra-precisão inclui peças cujas dimensões são da ordem de $1\mu\text{m}$ e resoluções da ordem de 1nm , por isso “nanotecnologia”. Estas ordens de magnitudes não são conseguidas por modificações ou adaptações de processos ou técnicas convencionais. Contrariamente, eles integram o desenvolvimento de novas técnicas de processamento de materiais, envolvendo:

- Materiais para estruturas de máquinas com características estáticas e dinâmicas adequadas, já que estes afetam o desempenho da máquina;
- Usinabilidade de novos materiais tecnológicos tais como cerâmicas, plásticos, germânio, zerodur, etc. [Ashkerov & Minaev, 1988; Duduch, 1992];
- Dispositivos de posicionamento - sensores, transdutores e atuadores compatíveis com a repetibilidade do posicionamento e exatidão do deslocamento exigido por cada eixo [Gee, Green & Pain, 1988];
- Sistema de controle e metrologia e conseqüentemente a resolução de cada medida do sistema para tornar possível a realização da metrologia dimensional com a exatidão esperada [Fornaro & Dow, 1988];
- Materiais para a fabricação de ferramentas e a interação entre ferramenta e a peça;

Para obter alto desempenho em máquinas ferramentas de ultra-precisão, compatível capacidade é requerida do sistema de controle de movimento e posição e, como eles são responsáveis pelo deslocamento da ferramenta em relação a peça, deve operar com resoluções nanométricas. [Kouno, 1984; Ikawa et al, 1987; Patterson & Magrab, 1985; Okazaki, 1988]

Para algumas aplicações de alta precisão, o sistema de controle de movimento é solicitado para operar a baixa velocidade, sem perdas de movimento (“backlash”). Por

outro lado, outras aplicações exigem movimentos rápidos do servo-mecanismo para seguir especificações de contorno, em tempo-real, possibilitando a correção de erros sistemáticos durante a usinagem.

Erros inerentes no acionamento, tais como 'backlash' ou outras perdas de movimento, bem como 'roll', 'pitch' e 'yaw', alguns com erros de Abbe (paralaxe), dificultam a determinação exata da ferramenta e peça [Barkman, 1980]. Os erros de Abbe são descritos como erro de "paralax". Em termos simples, erros de Abbe ocorrem quando a medição de pontos de interesse é deslocada da real localização da escala da medição, e quando os erros angulares existem em sistema de posicionamento [Steinmetz, 1990].

2.2 Usinagem de Materiais Frágeis

Nos últimos anos, a usinagem de ultra-precisão de materiais frágeis no regime dúctil (remoção plástica de material) tem recebido muita atenção. O principal objetivo destes estudos é o uso da usinagem plástica como alternativa para o uso de processos tradicionais tais como lapidação, polimento e ataque químico.

A lapidação é um processo onde o material é essencialmente removido por micro-fraturas frágeis induzindo, portanto, elevado grau de danos na superfície. Em wafers de silício, por exemplo, trincas causadas por processos frágeis (corte com serra diamantada) [Brinksmeier, 1987] e lapidação são normalmente reduzidas (e idealmente removidas) por subsequente ataque químico e polimento para manter a qualidade superficial e subsuperficial, pela remoção da maior parte das trincas subsuperficiais [Tönshoff et al, 1990]. Por razões econômicas, tem havido tendência grande no sentido de redução do tamanho de wafers e diminuição da largura entre linhas para produzir grande capacidade de memória de 'chips'. É previsto que, se esta tendência continuar, D-RAM's de um giga-bit estarão em uso no início do próximo século, requerendo wafers de 300 mm ou mais em diâmetro com superfícies com

exatidão de aproximadamente $0.1\mu\text{m}$. Este nível de precisão é necessário por causa da diferença de picos e vales deve ser igual ou menor que a profundidade de campo da técnica fotolitográfica usada na fabricação de chips de memória [Abe, 1989].

Ataque químico é usado para remover quimicamente danos subsuperficiais em superfícies serradas com diamante e lapidadas. Entretanto, o ataque químico é conhecido por aumentar erros de planicidade e paralelismo da superfícies do wafer por causa das limitações da instabilidade da taxa do ataque químico. Para wafers de diâmetros grande (200 - 300 mm), polimento por ataque pode não ser capaz de conservar a qualidade da superfície necessária sobre uma área grande. Também, a lapidação de materiais frágeis envolve altas forças normais que são responsáveis por grande deformação elástica da ferramenta e da peça, causando erros geométricos.

A taxa de remoção do polimento depende do material a ser polido, tipo e concentração de abrasivos, pressão de polimento, temperatura da superfície e reagente (químico). Um típico exemplo pode ser a operação de polimento de wafer de monocristal de silício onde a taxa de remoção de material é aproximadamente $1\mu\text{m/h}$ [Abe, 1989].

Sabe-se, através de observações em microindentação, 'ruling' que materiais podem ser deformados plasticamente antes da ruptura possibilitando, assim, o 'corte dúctil'. Isso ocorre quando a energia introduzida pela ação da ferramenta não é suficiente para iniciar e propagar trincas. A energia de deformação necessária para a formação de trincas é proporcional ao tamanho da zona deformada. Deformação plástica e remoção de material ocorrem quando o volume da zona mecanicamente deformada é pequena. Lawn e Evans (1977) propuseram um limite de indentação onde a profundidade crítica de penetração pode ser calculada em função da geometria do indentador, módulo de Young, dureza do material e resistência à fratura. Puttick, Shahid e Hosseini (1979) preveram uma dimensão crítica do volume de material sob tensão abaixo da qual a iniciação de trincas é suprimida e deformação plástica é energeticamente mais favorável. A partir disso, Puttick (1980) propôs uma

profundidade crítica de corte em função do módulo de Young, tensão de escoamento, trabalho específico por unidade de área para propagação de trincas e geometria do indentador. Essa profundidade (ou dimensão), para os materiais frágeis de interesse se encontra na faixa submicrométrica.

A obtenção da remoção plástica em materiais frágeis é resultado da união de parâmetros de usinagem convenientes, geometria de ferramentas e habilidade de a máquina ferramenta manter a zona deformada abaixo do valor da dimensão crítica para o material.

A usinagem com ponta única de diamante é considerada uma opção viável para trabalhar materiais frágeis, mesmo quando altas taxas de remoção são necessárias [Duduch et al, 1992; Duduch et al, 1996].

Considere, como exemplo, a fabricação de wafers de silício. A força axial durante o torneamento com profundidade de corte de aproximadamente $0.7\mu\text{m}$ e avanço da mesma ordem, é menor que 20g (Puttick et al, 1989). Nessas condições, danos substanciais são praticamente inexistentes. Para obterem-se os mesmos resultados, através do polimento (taxa de remoção de $1\mu\text{m}/\text{h}$, em média, para o silício), num componente de 50 mm, uma força axial de 2kgf seria necessária (Tönshsff et al, 1990) e, para remover $0.7\mu\text{m}$, seria necessária aproximadamente 1h. Considerando um avanço de $0.3\mu\text{m}/\text{rev}$, o tempo requerido para remover $1\mu\text{m}$ de espessura em 50 mm de diâmetro seria inferior a 15min.

A tabela 2.1 adaptado de McKeown [1987], reproduzido de Tanigushi, [1983]. classifica a usinagem convencional, de precisão e ultraprecisão de acordo com as tolerâncias alcançadas e produtos na indústria mecânica, eletrônica e óptica para que o leitor possa identificar melhor a abrangência do termo ultraprecisão nos dias atuais.

| | Tolerância | Mecânica | Eletrônica | Óptica |
|----------------------------|---------------------|--|--|--|
| Usinagem Normal | 200 μm | Aparelhos domésticos, ajustagem automotor | Partes de trabalho geral em eletrônica, motores e conectores | Câmara, telescópio e corpo binocular. |
| | 50 μm | Parte mecânica para máquina de escrever, máquinas | Transistores, diodos, cabeça magnética para fita de gravador. | Máquina fotográfica, porta lentes para câmeras e telescópio. |
| Usinagem de Precisão | 5 μm | Relógio mecânico, Mancais de máquina ferramenta, engrenagens | Relé eletrônico, resistores, condensadores, máscara para TV colorida | Lentes, prismas, fibras ópticas e conectores |
| | 0.5 μm | Mancais de esfera e de rolos, arame estirado de precisão, válvulas servos hidráulica, mancais aerostáticos, bico de tinta a jato, mancais de giroscópio aerodinâmico | Cabeça magnética (vídeo cassette) Escala magnética, oscilador de quartzo, CCD, ampôla para memória magnética, magnetron, IC, transdutor de pressão para filme, cabeça de impressão térmica, disco de cabeça para filme | Lentes de precisão e prisma, escala óptica, máscara de exposição IC, (foto, raio-X), espelho para raio-X, espelho deflexão elástica, conectores e fibra óptica monomodo. |
| Usinagem de Ultra-Precisão | 0.05 μm | Calibrador de bloco, indutor de ponta de diamante, mesa X-Y de ultra-precisão | Memórias IC, disco de vídeo eletrônico, LSI, tubo de micro vácuo, TFT-LCD | Plano óptico, lentes de Fresnel de precisão, rede de difração óptica, disco de vídeo óptico (CD). |
| | 0.005 μm | | VLSI | rede de difração óptica |

Tabela 2.1 Tolerâncias para Componentes de Produtos Modernos

Em termos amplos, para realizar usinagem de ultra-precisão nesses níveis de dimensão (submicrométrica) é necessário ter controle absoluto das dimensões de corte (tamanho da zona deformada), requerendo:

- Alta estrutura de rigidez (estática e dinâmica) e longa estabilidade do material;
- Alta resolução do servo-acionamento e sistema de controle, alta resposta e largura de banda e erro de seguimento nulo em sistemas multi-eixo;
- Minimização da variação da temperatura ou compensação de desvios térmicos;
- Movimentos precisos da máquina incluindo fusos, carros, transdutores de deslocamento direto (PZT);
- Correções de erro (estático e dinâmico) e compensação.

2.3 Controle Automático para Usinagem de Ultra-Precisão

2.3.1 Correção de Erros

O controle durante o processo em máquinas ferramentas tem-se desenvolvido principalmente em resposta ao aumento da precisão da máquina, já que com o aumento da precisão, dificuldades e custos envolvidos também aumentam (exponencialmente) com a precisão realizada ou visada [Tönshoff et al, 1988]. Com o uso de controle durante o processo torna-se possível melhorar a precisão de máquinas já existentes [Thompson et al, 1982; Duduch et al, 1996].

Usinagem pode alcançar alto nível de precisão com o uso adequado de sensores e atuadores com alta exatidão e sensibilidade. Estes elementos apropriadamente associados têm um potencial para correção de erros inerentes em máquinas e processos, os quais podem requerer excessivo esforço para serem eliminados ou atenuados no projeto.

Infelizmente, a maioria dos sistemas de controle disponíveis não são capazes de eliminar os erros totalmente, logo o desenvolvimento de sensores, controladores e atuadores é aspecto crucial da tecnologia de usinagem de ultra-precisão.

Aplicando correção de erros, a precisão da máquina ferramenta passa a depender da habilidade dos sensores e transdutores utilizados para as medições exatas das variações do processo incluindo erros de máquinas e interações entre ferramenta e a peça. A eficiência da correção de erros é também afetada pelo tempo requerido pelo controlador para fazer as transformações matemáticas do sinal de entrada e a exatidão e velocidade dos atuadores em responder ao sinal enviado pelos controladores.

A figura 2.1 [Tönshoff et al, 1988] compara usinagem convencional e usinagem controlada numericamente por computador com relação às condições de corte ótimas. Como pode ser visto claramente na figura 2.1, as condições de corte ótimas tornam-se mais críticas em termos de custo em usinagem CNC do que em usinagem convencional. Isto é somente um exemplo para mostrar que, por causa dos maiores investimentos associados ao uso de máquinas-ferramentas sofisticadas em comparação com usinagem convencional, as curvas o custo - tempo e o custo - ferramenta crescem mais rapidamente. Como consequência destes efeitos, a seleção das condições do processo apropriadas tais como profundidade de corte, velocidade de avanço, velocidade, etc., torna-se mais crítica com o aumento da complexidade e a velocidade da máquina-ferramenta. Também, em casos onde ultra-precisão é solicitada, o uso de sistemas de monitoramento e controle torna-se indispensável para obter resultados satisfatórios já que o monitoramento manual é extremamente difícil, especialmente quando peças grandes e/ou complexas são usinadas tais como no torneamento de diamante de telescópios espaciais, espelhos, onde erros de forma

acima das restritas especificações não são permitidos já que o realinhamento após inspeção para re-trabalho pode demandar muito trabalho e custo elevado.

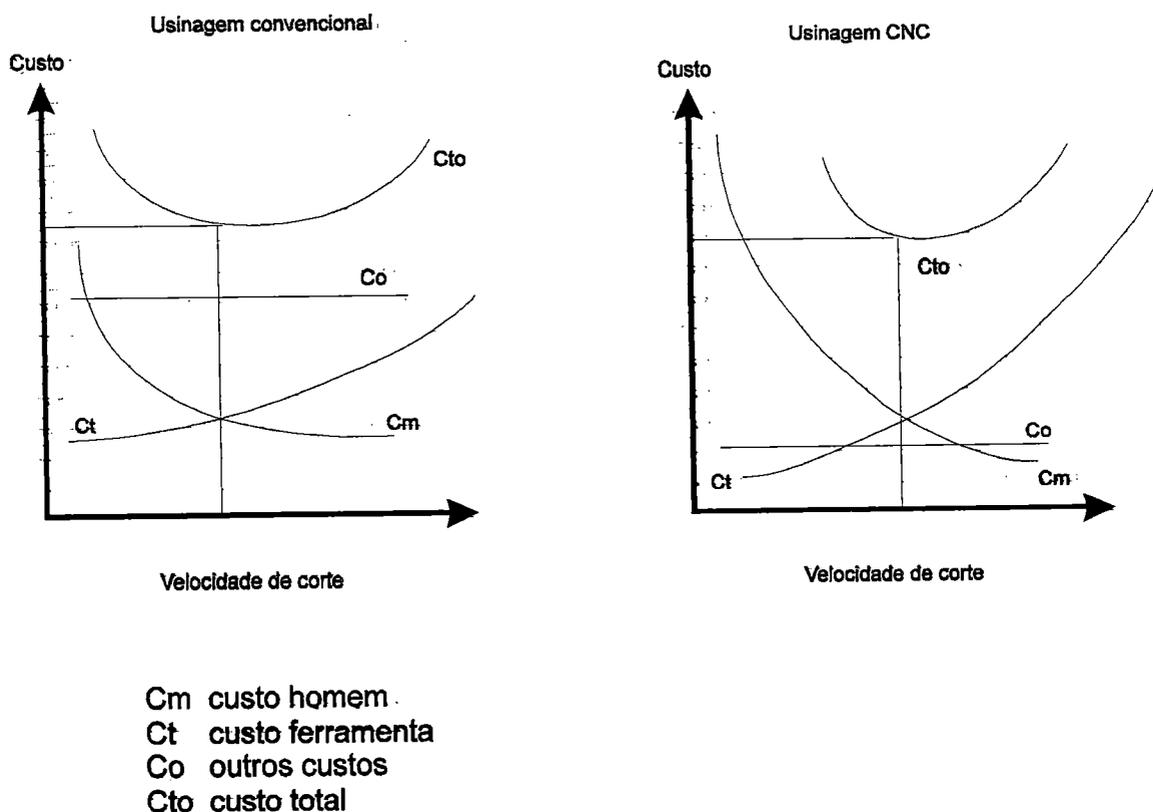


Figura 2.1 Comparação entre Usinagem manual e CNC

A correção de erros pode envolver medições de erros durante o processo (“in-process”), sendo necessário o monitoramento contínuo das variações do processo, necessário processamento em tempo real (on-line) para a análise de resultados de medidas e cálculo do erro equivalente. Medições de erros e processamento de sinais de erros por um controlador (ou computador) bem como a resposta dos atuadores para o comando de correção (sinal do controlador ou do computador) devem ocorrer em tempo real. Implementação da correção de erro, entretanto, não é uma tarefa trivial, embora promissora em virtude do notável progresso da exatidão dos sensores, das velocidades dos computadores e da capacidade dos atuadores.

2.3.2 Alguns Exemplos de Sistemas de Controle Automático de Erros

É importante salientar que o emprego de sistemas de controle automáticos em máquinas ferramentas de ultraprecisão não é somente para facilitar o projeto e a fabricação de tais máquinas, embora isto ocorra. O fato que realmente faz o uso desses recursos indispensável é que mesmo com muita atenção sendo dada ao projeto, manufatura, e a seleção dos componentes críticos tais como rolamentos e guias, erros inevitáveis estarão sempre presentes, exigindo correção para obtenção de peça de ultra-precisão. [Fornaro, 1988].

Correção de erros vai desde o controle com realimentação, para a correção de erros de cada movimento da máquina (de forma independente), até sistemas de posicionamento complexos, controlando vários eixos de movimento ao mesmo tempo; desde medição após o processo com realimentação até medições durante o processo e sistemas de controle com referência na própria peça [Kohno et al, 1989 - a; Kohno et al, 1989 - b; Kohno et al, 1988] e controle com previsão ('feed forward') [Thompson et al, 1982; Wu & Ni, 1989; Duduch et al, 1996].

Na seção seguinte, exemplos de controle automático de erros são dados para mostrar o aumento da complexidade do sistema de correção de erros em usinagem de ultra-precisão.

2.3.3 Sistemas de Controle de Posição

A figura 2.2 mostra a idéia básica da correção de erro com realimentação.

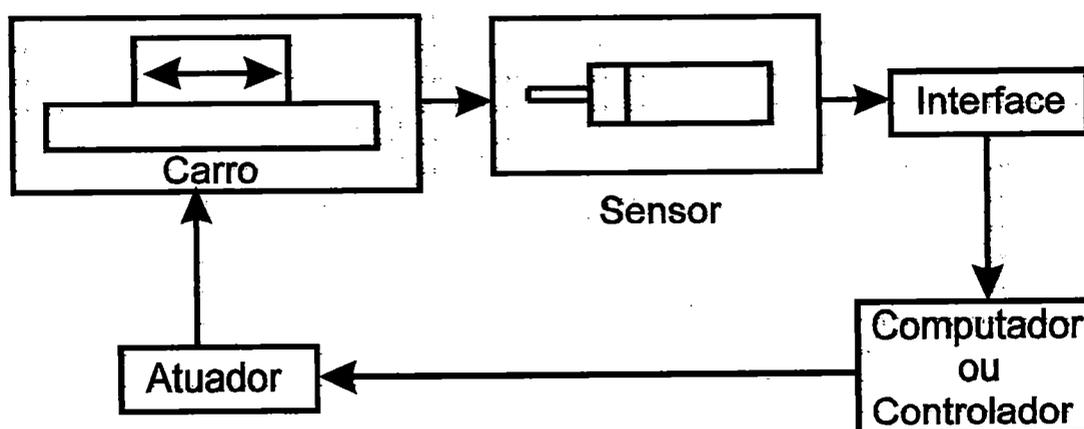


Figura 2.2 Correção do erro de realimentação

A posição do transdutor, eg, LVDT, transdutor capacitivo, interferômetro laser, etc, é empregado tipicamente para medição da posição do carro da máquina. O sinal de posição do transdutor é então convertido em um sinal digital por uma interface, o qual é usado por um controlador que executa o cálculo da diferença entre a posição medida do carro e a posição desejada, gerando sinal de erro. Este sinal do controlador é então convertido em um sinal analógico, amplificado por um driver e finalmente realimentado para o atuador do carro. Sistemas mais complexos são encontrados em uso corrente como mostrado na figura 2.3 [Fornaro & Dow, 1988]. Este arranjo pode ser usado durante o processo como sistema de correção para erros sistemáticos de movimentos de elevada precisão da máquina como descrito a seguir.

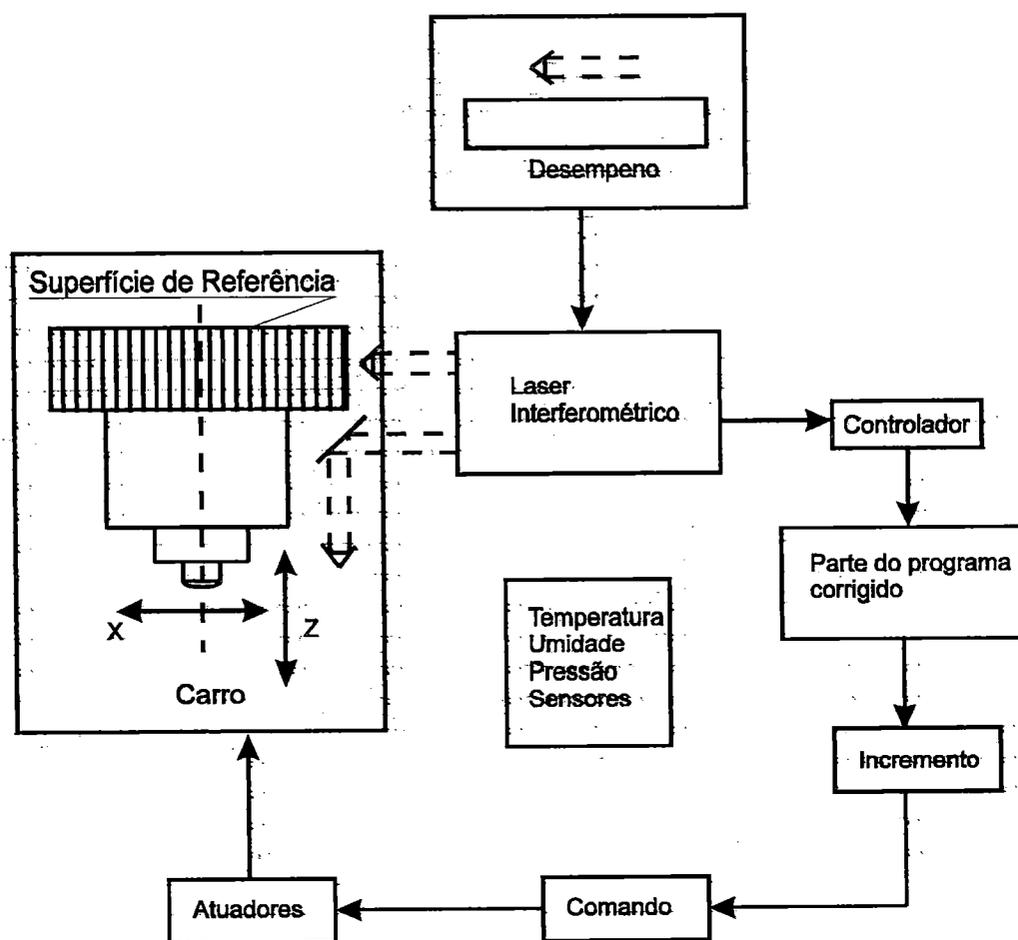


Figura 2.3 Controle do erro de realimentação - Dois Eixos

No exemplo particular representado esquematicamente na figura 2.3, a posição do carro o eixo X (avanço-transversal) e Z (avanço), são continuamente monitorados por um interferômetro o qual trabalha como um encoder linear.

A variação na temperatura, pressão e umidade, afetam a exatidão com que o interferômetro executa a medida já que afetam o índice de refração do ar nos arredores do caminho óptico. A correção dessa classe de erro é também comercialmente disponível [Barkman, 1980], então as variações das condições do meio que afetam o caminho do laser são corrigidas por dispositivos-padrão.

O sinal derivado do interferômetro baseado na contagem do número de franjas e a interpolação entre franjas é devolvido para o controlador CNC (ou um computador) através de uma interface eletrônica. Quando um sistema igual ao da figura 2.3 é requerido para gerar um contorno, o controlador deve gerar sinais de comando necessários para produzir uma série de incrementos no eixo X e no eixo Z, de modo que a máquina siga o contorno desejado. O sinal de comando deve variar para produzir uma forma desejada. Para cada atualização, novo sinal de velocidade compensado pela posição corrente do carro e o erros geométricos do movimento do carro, alimenta o amplificador do acionamento do atuador do carro, até que o fim do movimento seja alcançado, isto é, o controlador manda um comando proporcional à velocidade requerida para produzir incrementos na direção do eixo X e Z no passo da ferramenta. Então, nenhum outro comando para X e Z é produzido até que o comando de velocidade prévio seja ativado para compensar o erro geométrico e o erro de posição do carro simultaneamente. Os incrementos dependerão da velocidade de avanço, velocidade do fuso, tempo de atualização do controlador, textura da superfície requerida e, mais importante, o tempo de resposta dos elementos mecânicos envolvidos na atuação.

O interferômetro que está representado esquematicamente na figura 2.3 é capaz de monitorar o movimento do carro continuamente. Erros no sistema de posicionamento (fuso de avanço, motor, etc) podem ser então corrigidos como descrito acima. Erros remanescentes, tais como, erros geométricos das guias que são importantes em usinagem de ultra-precisão, podem ser corrigidos pelo mapeamento, usando, por exemplo, uma régua como referência e registrando os dados em um microcomputador [Moriyama, 1991] para gerar o programa (para aplicações de CNC [Fornaro & Dow, 1988]) o qual compensa erros do movimento do carro.

Além dessa técnica, erros de contorno podem ser mapeados usando uma superfície de referência no lugar da peça e um sensor de alta precisão (capacitivo, indutivo, interferométrico, óptico) no lugar da ferramenta (ou porta-ferramentas), como mostra esquematicamente a figura 2.4.

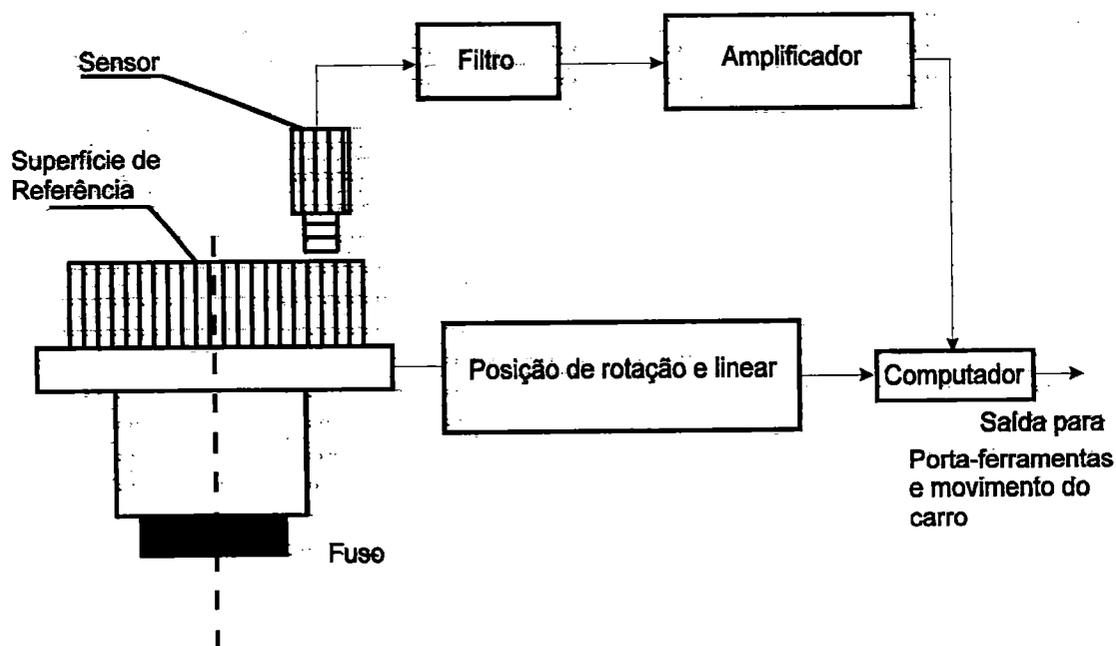


Figura 2.4 Mapeamento de Erros usando a superfície de referência

Para erros sistemáticos, o computador é capaz de produzir novo programa e usá-lo para corrigir os erros como descritos no exemplo acima. Entretanto, a substituição da ferramenta pelo sensor de deslocamento não representa uma situação real de corte: isto pode ser feito através da usinagem de uma peça, medição dos erros, e a criação de um programa de correção baseado na diferença de forma entre a superfície real e a superfície ideal. Este método de correção de erro é incapaz de efetuar correções eficientes quando as condições de usinagem mudam. O número de pontos de correção dependerá da exatidão desejada e da constante de tempo dos atuadores e dos componentes mecânicos associados, bem como a resposta de frequência de outros elementos integrantes.

2.3.4 Servo-Atuadores em Máquina de Ultra-Precisão

Várias pesquisas foram feitas no sentido de desenvolver servo mecanismos com baixa constante de tempo para trabalhar em grande largura de banda [Patterson & Magrab,

1985; Okazaki, 1988; Chen & Yang, 1989; Hara et al, 1990; Duduch & Gee, 1990; Gee et al, 1991]. Estes seriam capazes de corrigir erros randômicos usando realimentação de sensores de alta precisão e características dinâmicas compatíveis, monitorando a posição da ferramenta (ou porta-ferramentas) com respeito à peça em tempo real. Há necessidade de ter-se uma referência para os sensores. Esta referência pode ser uma estrutura metrológica independente [Fornaro, 1988], a própria peça [Kohno et al, 1989], ou uma régua (espelho plano) [Moriyama, 1991].

A figura 2.5 mostra uma cadeia básica entre a peça e a ferramenta de corte em uma máquina ferramenta a qual é composta da própria peça, um mandril, fusos (rolamentos, fusos e acoplamentos), base, carro, porta-ferramenta e ferramenta.

É importante que a influência dos erros destes elementos individuais na superfície usinada seja minimizada, assim é bastante desejável que o sistema metrológico esteja posicionado tão próximo quanto possível do componente que está sendo usinado [Kouno et al, 1984]. Baseado nesse princípio, o uso de interferômetro para correção do erro de posicionamento encurta a cadeia entre a peça e ferramenta (figura 2.6).

Em uma máquina-ferramenta com a configuração como a figura 2.5, o erro total será a soma de erros de cada elementos independente e dependerá da resposta dinâmica (como um todo) e o alinhamento entre elementos interativos. Características térmicas também influenciam na exatidão total, (assim como os elementos mecânicos, entre a ferramenta e a peça). Alta rigidez (estática e dinâmica) são, entretanto, necessária tanto quanto a alta precisão das guias. Estes requisitos são obviamente muito relevantes para usinagem de ultra-precisão, especialmente de materiais frágeis, onde a dimensão de corte está na faixa sub-micrométrica.

O controle com realimentação torna-se gradualmente parte integral do sistema da máquina ferramenta. O controle com realimentação para cada eixo individual (como mostra a figura 2.5), está colocado, em termos de complexidade, para às máquinas sem sistema de controle. Com a necessidade de aprimoramento na engenharia de

precisão, sistemas complexos de monitoramento tornam-se imperativos. Um exemplo de evolução, é a estrutura de metrologia proposta por Donaldson & Patterson [1983] e Moriyama [1991]. Esse esquema encurta a 'distância metrologica' entre a base da máquina e o porta-ferramenta (figura 2.7-a), de modo que a posição do porta-ferramenta seja corrigida em relação à base diretamente e não a correção de cada eixo individualmente.

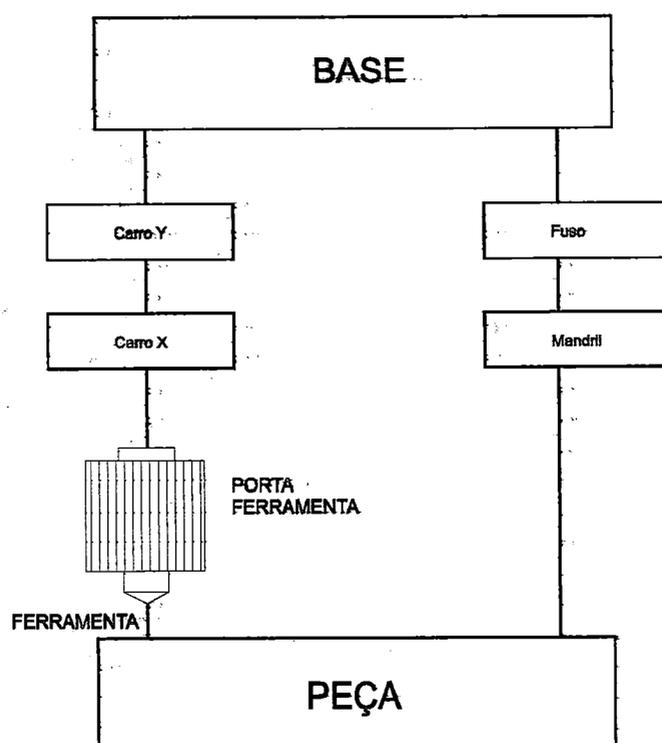


Figura 2.5 Localização da peça e da ferramenta em relação a base.

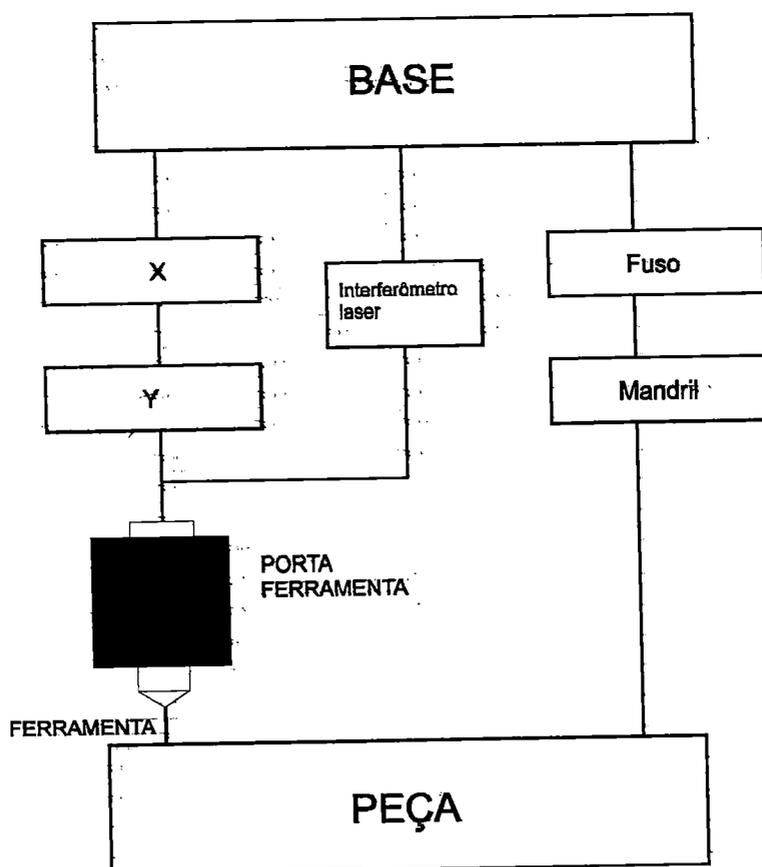


Figura 2.6 Interferômetro encurtando a cadeia entre peça e ferramenta

Isto é uma ilustração de como erros não-sistemáticos podem ser corrigidos. A estrutura metrológica da figura 2.7 -a, é usada como referência para determinar a posição da ferramenta em relação à peça em tempo real independentemente da estrutura principal da máquina. O potencial de correção de erros de fontes desconhecidas, bem como, a fabricação de peças rotacionalmente não-simétricas.

Como discutido acima, apesar de os erros serem atribuídos aos elementos de máquinas, a forma dos componentes é determinada pela posição relativa entre a ferramenta e o componente. Isto sugere a utilização de um sistema de controle com referência na peça, como proposto por Kohno et al [1989], mostrado esquematicamente na figura 2.7-b.

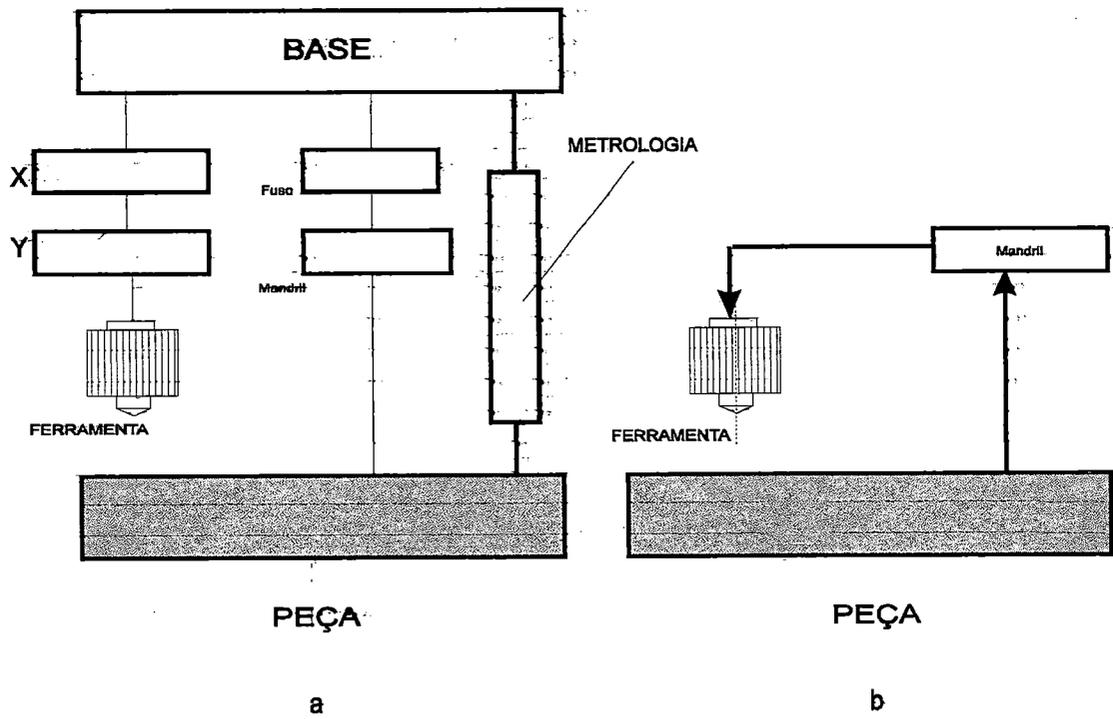


Figura 2.7 Correção dos erros não sistemático usando: a) estrutura metrológica e b) correção com referência na própria peça

CAPÍTULO 3

INTERFEROMETRIA

3.1 Interferências

Os padrões de cores que recobrem as manchas de óleo em pavimentos de asfalto molhados constituem uma das manifestações mais comuns dos fenômenos de interferência. À escala macroscópica, este fenômeno ocorre igualmente com ondas em tanques cheios de água: é conhecido quão complexo podem ser os padrões que se geram quando as ondas se sobrepõem. Em algumas regiões de sobreposição entre duas ondas, pode ocorrer aniquilação total ou parcial das ondas interferentes; noutras regiões, todavia, o padrão parece bem mais marcado, com vales e cristas mais definidos. Quando as ondas deixam de interferir e continuam a propagar-se, nada resta da situação de interferências em que participavam.

Os fenômenos de interferência óptica não são explicáveis no quadro de um modelo meramente corpuscular. A teoria ondulatória que descreve a natureza eletromagnética da luz constitui, todavia, um ponto de partida natural para a análise destes fenômenos. As perturbações ópticas parecem ser 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, e, em qualquer ponto do espaço em que duas ou mais ondas se sobrepõem, é igual à soma

vetorial das ondas intervenientes. A interferência óptica consiste pois na interação entre duas ou mais ondas luminosas, com geração de um padrão em que a irradiância total difere da soma das individuais.

Os fenômenos de interferência podem ser criados com sistemas ópticos muito diversos - serão aqui apresentados apenas alguns dos mais importantes. Considerar-se-ão dois tipos de interferômetros: interferômetro de divisão de frente de onda e interferômetro de divisão de amplitude. No primeiro caso partes distintas da frente de onda primária permitem gerar ondas secundárias, quer diretamente, quer com o auxílio de sistemas ópticos adicionais; estas ondas secundárias são feitas interferir posteriormente. Nos interferômetros de divisão de amplitude, a própria onda primária dá origem a duas ondas com a mesma estrutura que se propagam ao longo de trajetórias distintas e que, uma vez sobrepostas, interferem.

3.2 Condições de Interferência.

É útil ter sempre presente que duas fontes luminosas não têm de estar necessariamente em fase para poder gerar um padrão de interferências observável. Um desfaseamento arbitrário entre as fontes, desde que constante, permite ainda obter padrões idênticos, embora um pouco desviados relativamente ao padrão anterior. Fontes deste tipo dizem-se coerentes.

Tendo em vista que a natureza corpuscular do processo de emissão tem como consequência que a luz emitida por fontes quase monocromáticas seja constituída por trens de onda independentes uns dos outros. Em qualquer ponto do espaço, o campo eletromagnético total oscila cerca de 1 milhão de vezes em menos de 10 ns e a fase varia harmonicamente. Mas, no novo ciclo que de imediato se pode desencadear, a fase terá variado aleatoriamente, sem qualquer relação com o seu passado próximo. A coerência temporal é uma medida do intervalo ao longo do qual o campo luminoso varia harmonicamente.

O tempo de coerência da radiação representa pois o valor médio do intervalo de tempo durante o qual é possível prever o comportamento do campo luminoso.

Pode-se constatar em qualquer ponto do espaço o comportamento quase senoidal do campo luminoso ao longo de um certo número de oscilações, entre instantes em que a fase varia abruptamente. O conceito de comprimento de coerência foi utilizado para referir-se a extensão espacial do trem de ondas, ao longo da qual a fase varia de um modo determinista.

Para que um padrão de interferência seja estável, é necessário que as frequências de ambos os feixes sejam muito próximas uma da outra. Qualquer diferença significativa entre frequências traduz-se numa diferença de fase rapidamente variável no tempo e no anulamento do valor médio da intensidade durante o intervalo de tempo de detecção.

Todavia, se tratar de uma fonte de luz branca, as componentes vermelhas podem interferir entre si, o mesmo se passando com as demais componentes monocromáticas. Estes diversos padrões de interferência, semelhantes entre si embora ligeiramente deslocados uns em relação aos outros, sobrepõem-se e podem produzir um padrão único de luz branca.

Franjas de Fizeau originadas da interferência de múltiplos raios refletidos e são descritos pela fórmula de 'AIRY' que dão a distribuição da intensidade sobre a superfície:

$$I = \frac{I_{max}}{1 + F \sin^2 \pi [(2nt \cos \phi) / \lambda]}$$

onde $I_{m\acute{a}x}$ é a máxima intensidade no centro da franja; nt é a distância óptica equivalente (incluindo o desvio de fase em reflexão) entre as duas superfícies

refletidas, ϕ o ângulo iluminado, λ o comprimento de ondas observadas, e F a “finura” do sistema definido por

$$F = 4R / (1 - R)^2,$$

com $R = |r_1||r_2|$ dando a intensidade refletida de duas superfícies [Palik, 1985].

O período espacial é conhecido como comprimento de onda e é denotado por λ . O período é o número de unidades de tempo por onda, o inverso do que é a frequências ν ou o número de ondas por unidade de tempo.

$$\nu = \frac{1}{\tau} \text{ (ciclos ou Hertz)}$$

$$\nu = \nu \lambda \text{ (m/s)}$$

Há duas outras quantidades que são freqüentemente usadas em literatura do movimento onda e estes são a freqüência angular.

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} \text{ (rad/s)}$$

e o número de onda

$$\chi = \frac{1}{\lambda} \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

[Hecht & Zajac, 1974]

A diferença de percurso entre as duas ondas que se movem na mesma direção ao longo do mesmo caminho, como na figura 3.1, é a distância na direção do movimento

entre pontos semelhantes em cada onda e tem uma dimensão de comprimento. A diferença de percurso é dada pela equação:

$$\text{diferença de percurso} = \frac{(\text{diferença de fase em radianos})}{2\pi}$$

onde λ é o comprimento de onda

Na figura 3.1, a diferença de fase é $\pi/4$, e a substituição na equação acima dá uma diferença de percurso de $\lambda/8$ de comprimentos de onda.

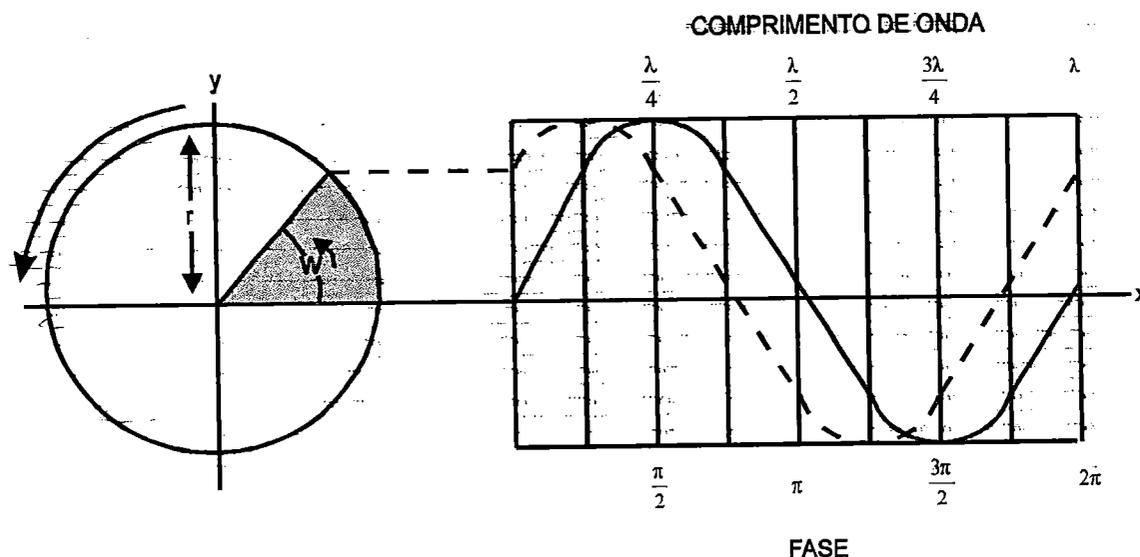


Figura 3.1 Duas ondas sinusoidais com uma diferença de fase de $\pi/4$ e uma diferença de percurso de $\lambda/8$.

Dado que a diferença de percurso expressa em comprimentos de onda inteiros ou fracionários também exprime a diferença de fase, existe a tendência de usar as expressões como sinônimos e indicar tanto a diferença de percurso como a diferença de fase em comprimentos de onda. A diferença de percurso entre duas ondas é chamada algumas vezes atraso, termo que se refere ao fato que uma onda ou ficou

para trás ou avançou à frente de outra por um certo número de comprimentos de onda inteiros ou fracionários. [Wahlstrom, 1969]

Peças com formas esféricas ou anesféricas são freqüentemente manufaturadas com máquina de corte de ultra precisão. Os resultados mostram que o interferômetro de Fizeau pode ser usado para medições de forma de peças, quando uma máquina de corte de ultra precisão estava estacionária e a turbulência de ar na parte óptica era desprezível, porém com a máquina em funcionamento, a interferência de franjas não pôde ser observada devido a turbulência de ar e a vibrações na máquina. [Nomura, et al, 1993].

3.3 Interferômetro Óptico

O interferômetro óptico é um instrumento de medição que utiliza o fenômeno da interferência, baseado na propriedade das ondas de luz, podendo ser usado em medições de distâncias, velocidades ou formas de texturas superficiais. Quando duas frentes de ondas com a mesma frequência (ω), amplitude (A) e velocidade percorrem diferentes caminhos, recombinando-se, sobrepõem-se, interferindo de forma positiva ou negativa, originando franjas interferométricas [Duduch, 1993]. A frente de onda resultante pode ser expressa como:

$$Y = 2A \cos(\phi/2) \sin(kx - \omega t - \phi/2)$$

onde $K = 2\pi/\lambda$

Uma importante característica do modelo de franjas de interferência é o fator de escala do interferograma, i.e., quando o espaçamento das franjas corresponde a $\lambda/2$, λ , ou a outros múltiplos de λ . As frente de ondas percorrem diferentes caminhos, recombinando-se construtivamente ou destrutivamente. As franjas geralmente podem ser foto-detectadas e eletronicamente contadas ou interpoladas [Road, 1984].

Qualquer interferômetro pode ser afetado por ruídos mecânicos e acústicos, embora o sistema incorpore uma quantidade de hardware e software que reduzem sensivelmente o efeito da vibração, obtendo um melhor resultado para um nível de ruído baixo. Vibrações mecânicas são usualmente transmitidas para a mesa, causando a interferência de franjas para vibrações de alta frequências. A amplitude da vibração depende da força da vibração transmitida pelo interferômetro [Tucson].

Os elementos de transmissão são acessórios constituintes dos interferômetros, os quais, são os divisores de feixes e estes produzem frentes de ondas de referência refletidas com formas esféricas ou planas e uma frente de ondas de mesma dimensão da transmitida.

Interferômetro de Mach-Zender

Uma placa de vidro semi espelhada N separa um feixe em dois feixes que formam ângulo retos entre si.

Os espelhos M e M' refletem ambos feixes em uma segunda placa semi espelhada N' . Na direção $N'O$, o feixe que é refletido por M e parcialmente refletido por N' superpõem-se ao feixe que é refletido por M' e parcialmente transmitido por N' ; a superposição destes feixes coerentes dá lugar a efeitos de interferência [Rossi, 1973].

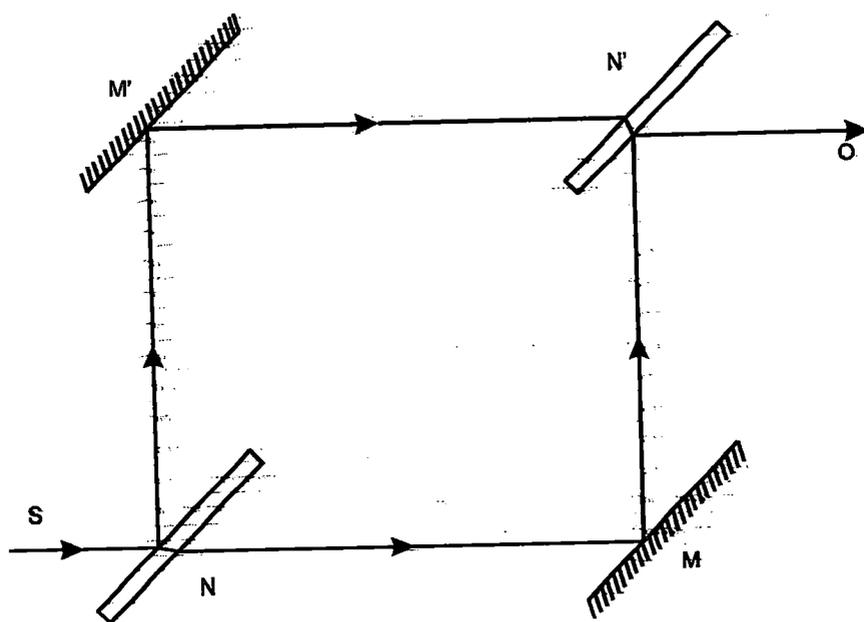


Figura 3.2 Interferômetro de Mach-Zender

Interferômetro de Michelson

O físico Americano Albert A. Michelson (1852-1931) foi o primeiro a introduzir a interferometria como uma ferramenta de medida, sua idéia de dividir um feixe de luz em um de referência e um de medição é usada nos modernos interferômetros de laser.

O interferômetro, ver figura 3.3, é composto de um divisor de feixe fixo (espelho parcialmente prateado) e um espelho plano móvel. O feixe de luz de uma fonte laser é dividido em dois feixes no divisor de feixes. Metade da amplitude do feixe original é transmitida (feixe de medição) e a outra metade é refletida em um ângulo reto (feixe de referência). O feixe de medição varia o seu ângulo de fase de 180° com relação ao feixe de referência, de modo que ocorre uma interferência construtiva quando a diferença do comprimento do caminho é um múltiplo ímpar de meio comprimento de onda.

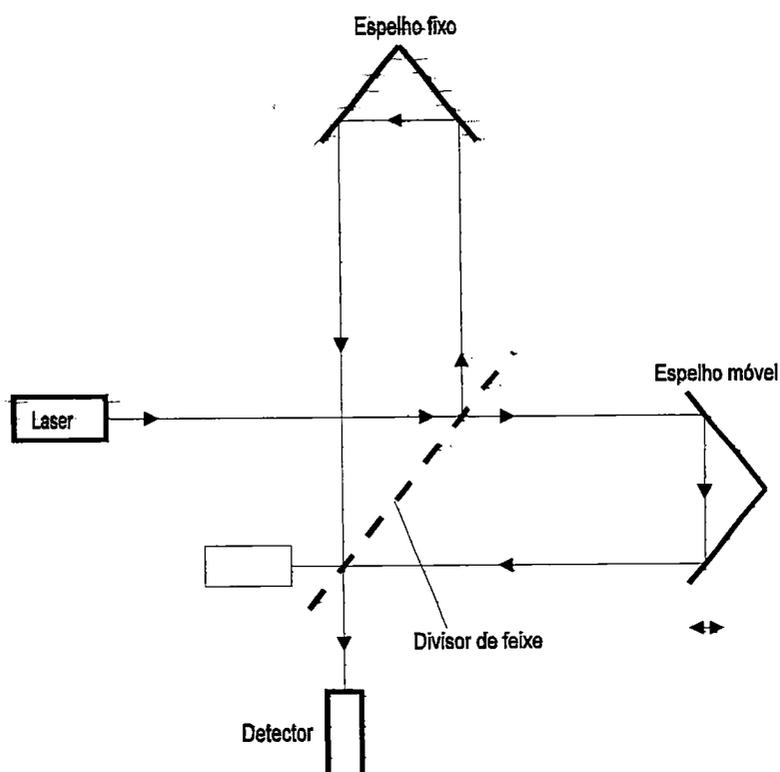


Figura 3.3 Interferômetro de Michelson

O deslocamento do espelho móvel pode ser medido pela contagem das franjas de interferência de $\lambda/2$.

A distância entre duas franjas escuras é de $\lambda/2$, por outro lado, a resolução da franja é de $\lambda/4$. O comprimento do caminho óptico varia de duas vezes a distância deslocada pelo alvo, logo a movimentação do alvo pode ter uma resolução de $\lambda/8$. Por outro lado, com as modernas técnicas de detecção óptica, resoluções da ordem de $(\lambda/2)^8$ podem ser facilmente conseguidas, porém para esta resolução ser satisfatória o projeto mecânico deve ser capaz de responder adequadamente e variar com o índice de refração deve ser compensado para variações ambientais.

Interferômetro de Fizeau

O interferômetro óptico de Fizeau é utilizado para a verificação da qualidade de forma de uma superfície e para isso utiliza abertura-completa, e.g., perfil de superfícies espelhadas e distorções em lentes, e para avaliar a planicidade de superfícies reflexivas ou semi reflexivas, envolvendo uma completa análise do interferograma, tanto com inspeção visual ou análise por computador.

O instrumento de Fizeau disponível é o WYKO 6000, com dois conjuntos de controle de 'Alinhamento/Teste' e abertura 120mm. A superfície do ensaio de prova é montada em uma mesa ajustável. O módulo de ajuste permite o retorno do ponto de luz refletida pelo espelho de referência e teste para ser observada e alinhada, através do alinhamento aproximado do feixe. Regulando a abertura apropriada as franjas são reveladas [Road. 1984].

Quando são requeridas frentes de ondas planas, a consideração básica na seleção do plano de transmissão adequado é a abertura, para acomodar a dimensão da superfície a ser medida. Para formas esféricas, esferas de transmissão são selecionadas de modo que o cone da luz laser produzido seja suficiente para iluminar completamente a superfície, côncava ou convexa, a ser medida quando ela está localizada de modo que seu centro de curvatura seja coincidente com a esfera de transmissão focal [Duduch, 1993].

3.4 Aplicações da Interferometria Laser

A utilização de interferômetros Laser em equipamentos tais como máquinas de torneamento ou retificação com diamante é hoje essencial para a geração de componentes de precisão, já que a saída dos interferômetros ópticos pode ser interpolada eletronicamente fornecendo deslocamentos com resoluções da ordem de 2.5nm, tornando possível tanto tolerâncias de posicionamento boas quanto permitindo

a localização de uma ferramenta em relação à peça a ser usinada mais diretamente que é conseguido com outros transdutores de posição [Siddal & Baldwin, 1984]. Entretanto, esta resolução pode ser afetada pelas variações no índice de refração do meio causadas pelas mudanças de temperatura, pressão e umidade, alinhamento do laser, compensação dos erros de Abbe minimizados e a distância entre o divisor de feixe e a face do prisma móvel.

Para obtenção de resultados precisos com interferômetros laser é necessário que as variações ambientais sejam compensadas sem, entretanto, degradar a qualidade do sistema. O alinhamento do laser deve ser feito cuidadosamente para evitar erros de paralaxe e minimizar erros de Abbe.

Sistemas automáticos de compensação são disponíveis, os quais percebem as variações ambientais e corrigem os valores de saída, entretanto, estes sistemas podem causar a redução da exatidão dos interferômetros [Barkman, 1980]. Refratômetros especiais eletrônicos/ópticos que percebem as variações nos comprimentos de caminhos fixados e estabelecem a compensação adequada sem degradar a exatidão do sistema são disponíveis [Barkman, 1980].

Outro importante fator que influencia os dados de saída do interferômetro laser é o gradiente de temperatura dentro do caminho do feixe. Para prevenir ou minimizar o efeito do gradiente de temperatura, o feixe laser pode ser protegido por um invólucro ou, alternativamente, o ar do caminho pode ser misturado para fornecer uma distribuição de temperatura uniforme [Siddal & Baldwin, 1984].

Um significativo aumento na resolução dos interferômetros laser pode ser conseguido através da multiplicação do caminho percorrido pelo feixe é a passagem [Siddal & Baldwin, 1984]. Basicamente, estes consistem da duplicação de ambos os feixes de referência e de medição (ao mesmo tempo) usando os mesmos componentes ópticos. Esta técnica permite evitar erros introduzidos pelos movimentos adicionais dos componentes ópticos necessários para a duplicação do caminho quando ele não é

comum aos feixes de referência e medição, Este arranjo duplica a resolução sem degradar a estabilidade medida.

A resolução de um interferômetro pode ser melhorada através de interpolação eletrônica entre as franjas de interferência. Entretanto, se, por exemplo, a resolução é duplicada por este meio, a estabilidade decresce pela mesma quantidade já que alguns deslocamentos dos componentes ópticos, causados, por exemplo, por expansão térmica, são também duplicados pelo interpolador eletrônico e o contador [Tanimura, 1983]. No entanto, para fazer o método de interpolação eletrônica satisfatória seria necessário que os elementos ópticos fossem criticamente montados e posicionados com a temperatura ao redor sendo controlada.

Duplicar o feixe laser para aumentar o caminho óptico pode resultar em comparativamente melhor estabilidade térmica. A influência da expansão térmica na estabilidade do interferômetro pode ser demonstrado pela comparação dos dois arranjos mostrados na figura 3.4 [Tanimura, 1983]. A figura 3.4 - a mostra a interferômetro usual de Michelson incorporando um circuito eletrônico capaz de interpolar a resolução do deslocamento por um fator de dez. A figura 3.4 - b, por outro lado, mostra um interferômetro similar o qual a resolução é aumentada pelo mesmo fator (dez vezes), não eletronicamente, mas por meio da duplicação do caminho óptico com um par de prismas especialmente projetados e arranjados a fim de que o feixe atravessasse o espaço entre os prismas retrorefletor e dianteiro 10 vezes e finalmente retorne ao interferômetro. Se a temperatura da base do suporte aumenta, a expansão térmica será multiplicada por 10 para o interferômetro da figura 3.4 - a, enquanto para o interferômetro da figura 3.4 b o valor será reduzido para 2 [Tanimura, 1983].

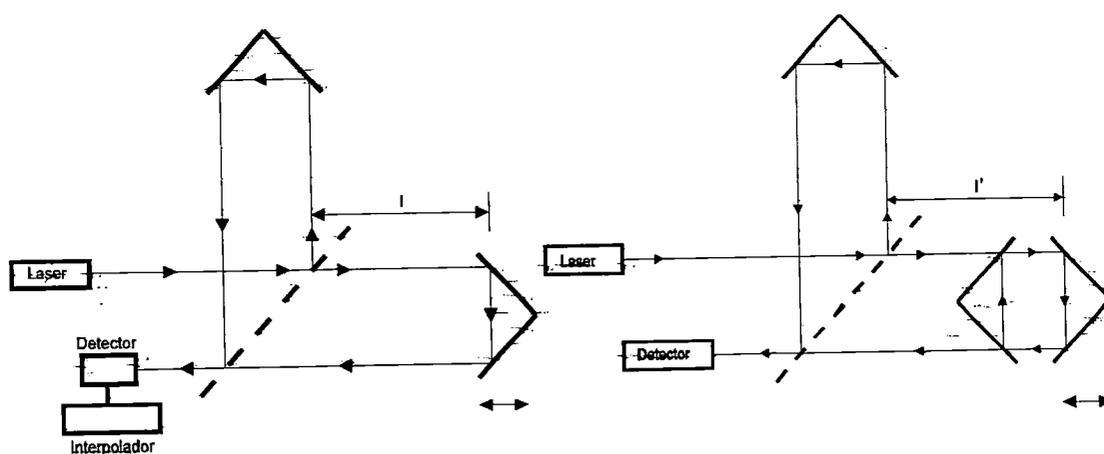


Figura 3.4 a) Interferômetro de Michelson com um circuito eletrônico acoplado
 b) Interferômetro de Michelson com o caminho óptico duplicado para aumentar a resolução

Como a distância do caminho entre o divisor de feixe e a face do prisma móvel dos interferômetros é aproximadamente a mesma ($l=10l'$) eles são similarmente afetados pelas variações no índice de refração do ar fazendo o interferômetro mostrado na figura 3.4 - b 10 vezes mais estável neste sentido.

Embora a duplicação do caminho óptico para aumentar a resolução de um interferômetro mostre vantagens relativamente a métodos eletrônicos com respeito à estabilidade, duplicar os feixes de medição e os de referência simultaneamente trazem vantagens sobre os dois métodos, onde o movimento relativo entre o interferômetro e os componentes ópticos ao duplicar os feixes não afetam o valor de saída, virtualmente eliminando o efeito de expansão térmica [Siddal & Baldwin, 1984].

A interferometria Laser é largamente usada para fornecer informações da posição em máquinas ferramentas de ultra precisão, tais como a localização relativa da peça e o deslocamento de saída. Esta informação do deslocamento realizado do conjunto laser é interfaceada por uma unidade de controle [Barkman, 1980] resultando em um sistema de controle de realimentação da posição. A unidade de controle interpola um programa gerando um sinal de comando da posição (dentro do CNC) o qual é

comparado com o dado da posição de realimentação do interferômetro para fechar o ciclo e corrigir o caminho da ferramenta convenientemente.

O uso de um interferômetro laser em um ciclo fechado muito importante em aplicações de formas, particularmente onde os erros não ocorrem dentro da posição medida pelo servo-ciclo que controla a posição dos carros. Fechando o ciclo com a da posição realimentada de um interferômetro a Laser capacita o sistema a manter o caminho correto da ferramenta continuamente corrigido atuando em cada um dos eixos da máquina.

O interferômetro Laser pode ser usado como um sensor de posição (para os eixos de uma máquina ferramenta) e a qualidade de uma superfície usinada pode ser aumentada como uma consequência da habilidade do sistema de controle para compensar os possíveis erros (em subseqüentes passes, quando eles são repetitivos) modificando do programa (CNC e aplicações de NC) ou corrigindo em tempo real.

3.5 Exemplo de Aplicação de Interferômetro de Fizeau

A figura 3.4 mostra um interferômetro de Fizeau montado sobre o suporte de uma ferramenta de corte experimental com a função de monitorar o eixo árvore e pré-alinhar o sistema (peça/placa), garantindo dinamicamente o movimento perfeitamente concêntrico [Gee et. al., 1989]. Em uma montagem rígida (figura 3.5), com a superfície de referência do interferômetro fixa, um plano de ensaio será montado sobre o eixo. Quando o eixo gira as franjas realizam vários tipos de movimento dependendo do alinhamento da normal da superfície de prova e da superfície de referência do interferômetro com relação ao eixo [Gee et. al., 1991].

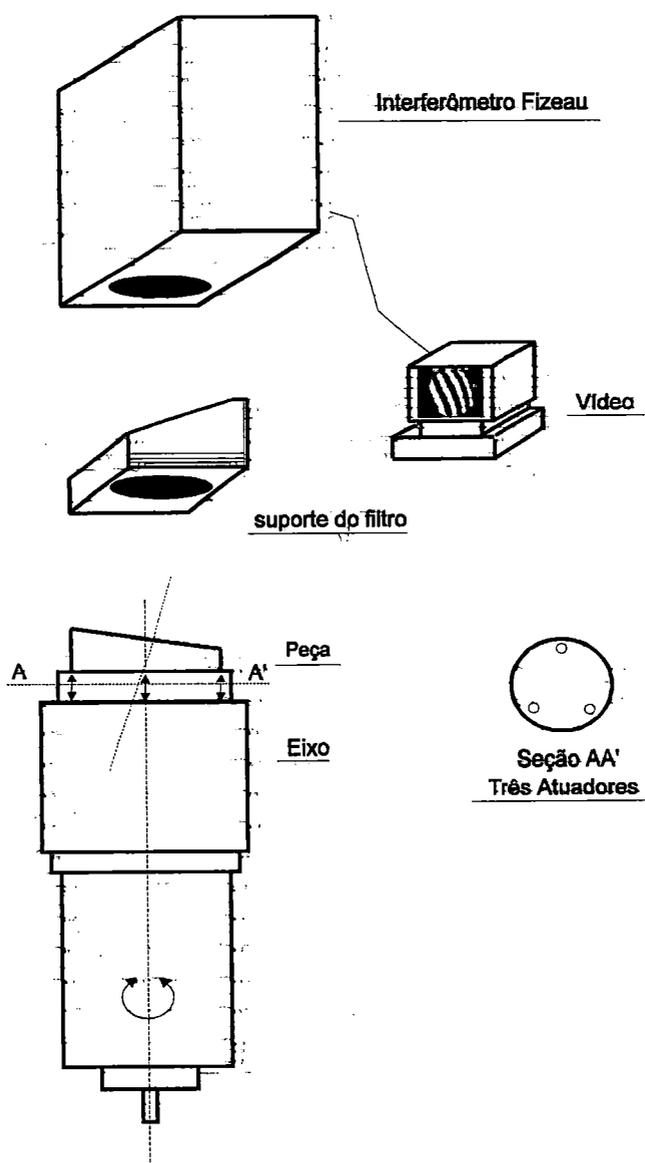


Figura 3.5 Representação esquemática da estrutura considerando três eixos: normal superfície referente ao interferômetro, a do eixo, e a normal ao plano da superfície de prova.

Um feixe laser de Hélio-Neônio é expandido e colimado. O feixe de luz em abertura total colimado é parcialmente refletido pela superfície externa de um plano óptico. O feixe de luz remanescente desloca-se para ser retro-refletido pelo corpo de teste, de onde retorna ao plano óptico para ser transmitido e interferir com parte do feixe refletido pelo plano de referência. Um padrão de interferência resulta de parte da

frente de onda deslocando-se em diferentes distâncias antes de serem refletidos, observando a forma da superfície reflexiva. O interferômetro de Fizeau é tipicamente usado para estimar planicidades de superfícies reflexivas (ou semi-reflexivas). Esta técnica não se reduz somente à medição do deslocamento através da contagem de franjas de um interferograma como um todo através de uma inspeção visual ou análise por computador.

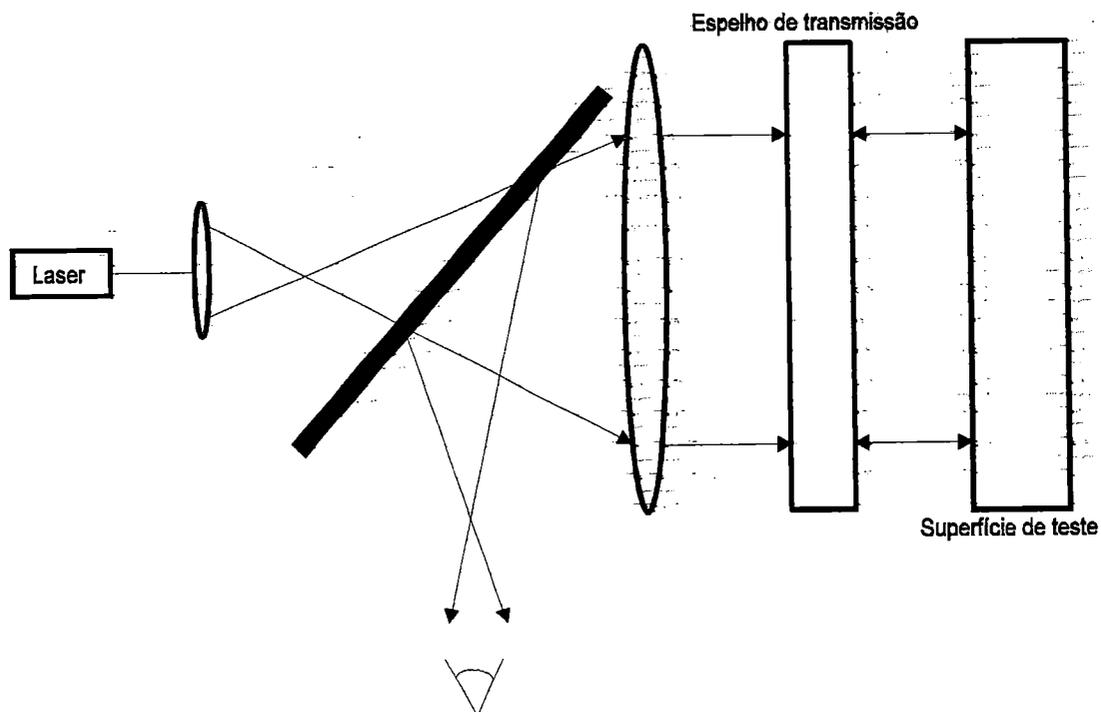


Figura 3.6 Interferômetro de Fizeau

Quando a superfície sob teste for perfeitamente plana e paralela com o plano óptico, os dois feixes são perfeitamente superpostos resultando em um padrão de interferência de intensidade uniforme, logo, nenhuma franja pode ser observada.

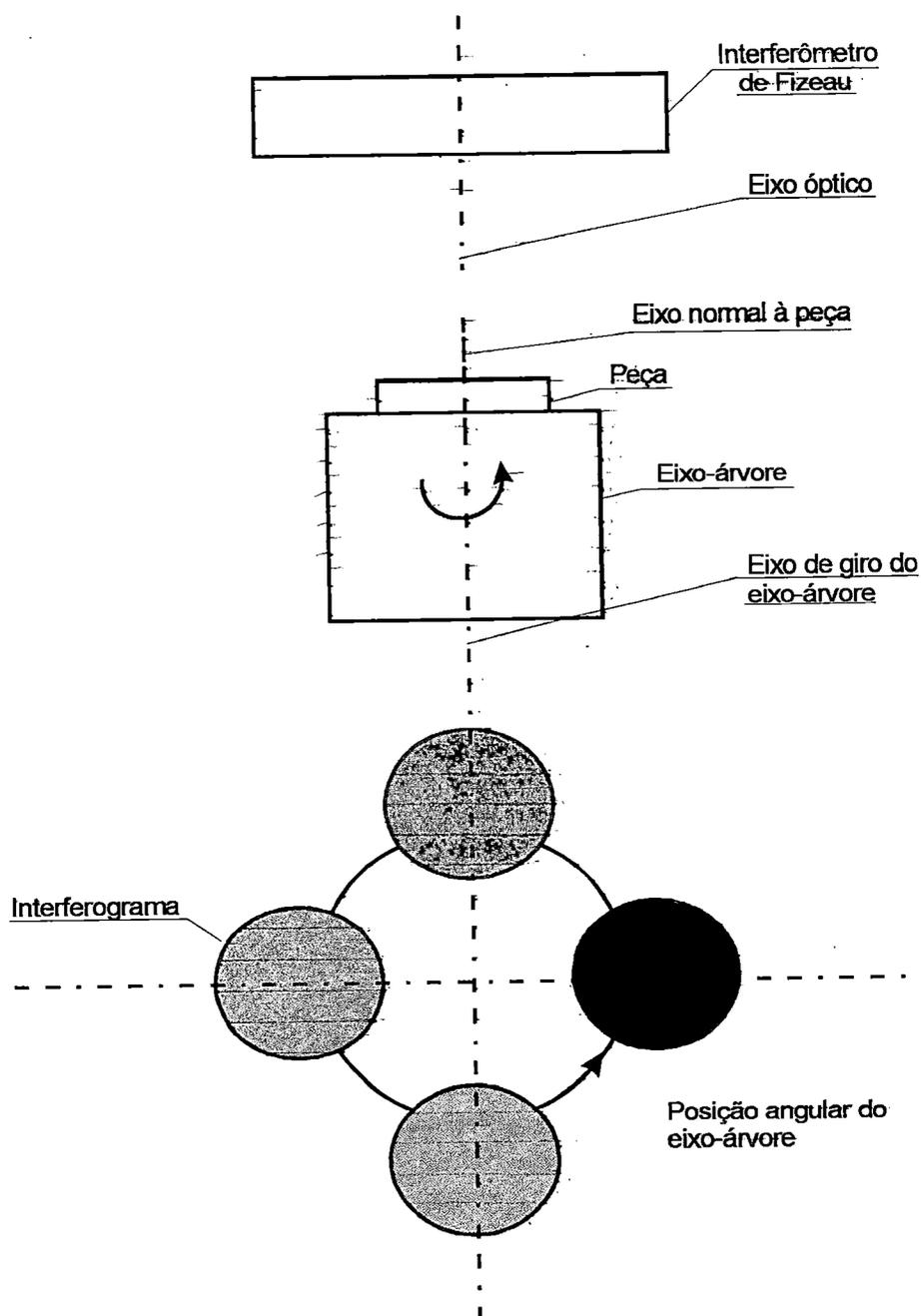


Figura 3.7 Padrões de franjas nulas

Se a superfície é plana, porém levemente inclinada em relação ao plano óptico de teste, uma família de linhas igualmente espaçadas e franjas paralelas resultarão. O espaçamento de franjas é proporcional à inclinação.

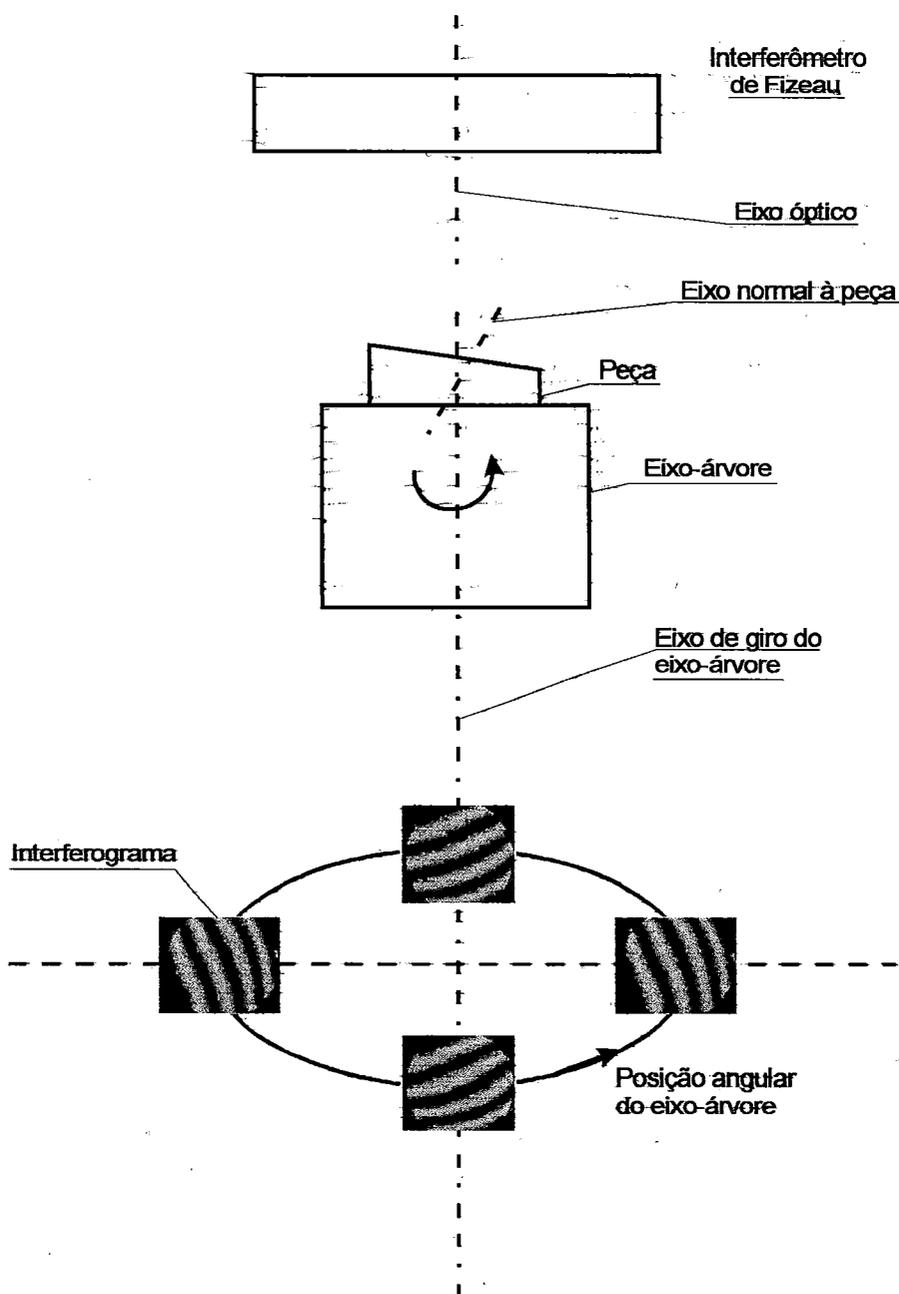


Figura 3.8 Franjas com passos constantes

Com um desvio angular da normal ao plano de referência do interferômetro (eixo óptico), e com a superfície de prova e o eixo alinhados em paralelo; obtêm-se franjas estacionárias.

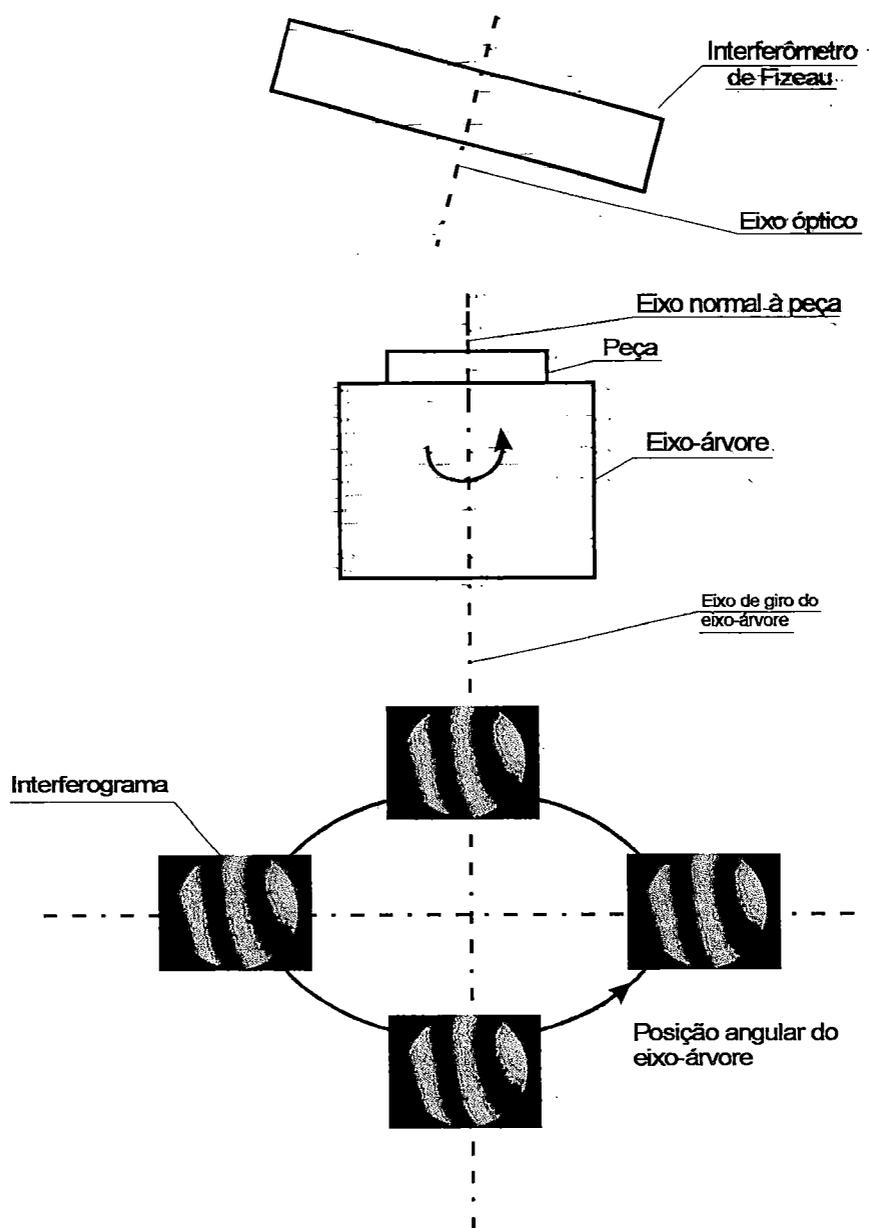


Figura 3.9 Franjas estacionárias

Com um desalinhamento em ambas superfícies (eixo óptico e normal à peça desalinhados com respeito ao eixo), inclinações e passos de variações cíclicas serão observadas [Gee et. al., 1991].

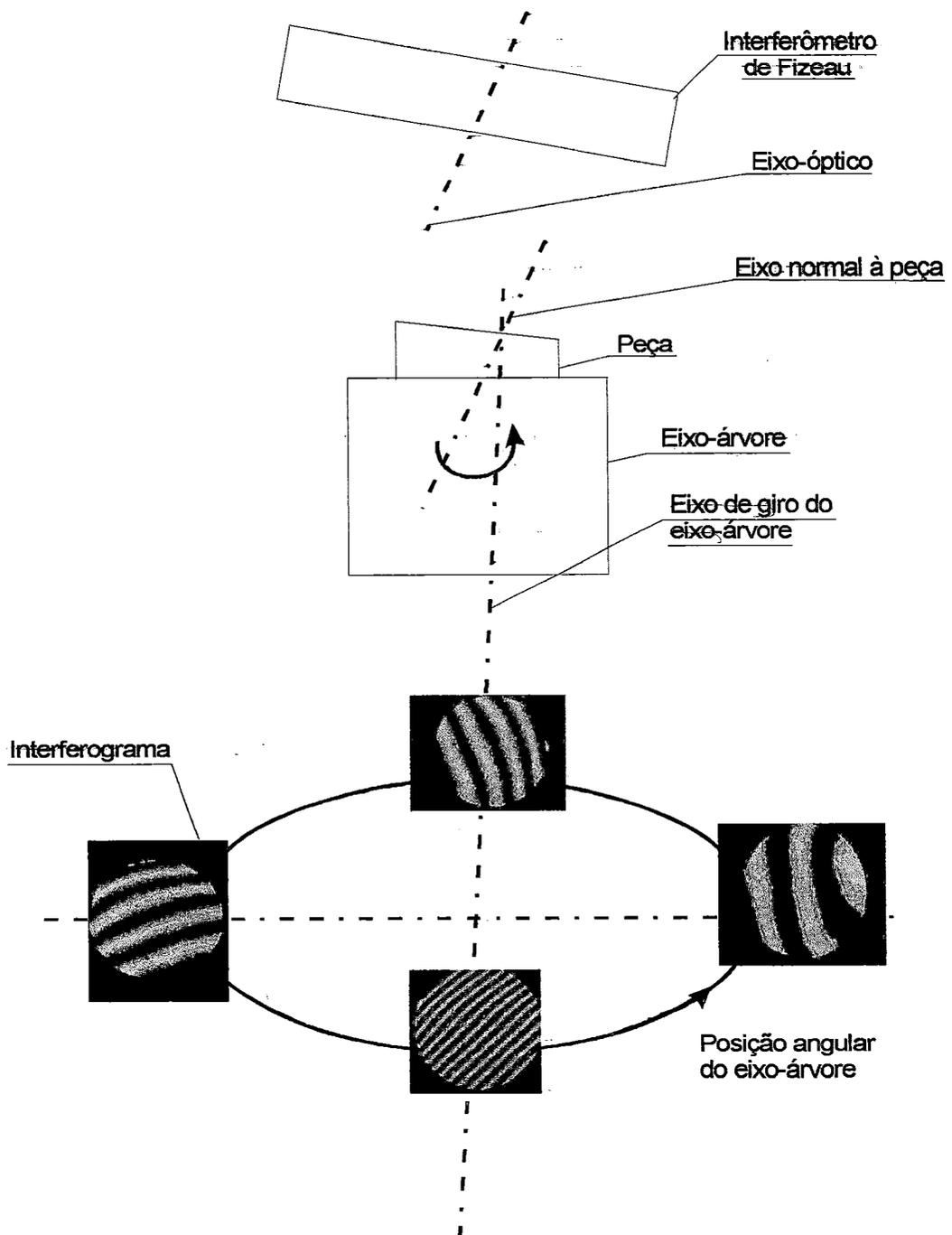


Figura 3.10 Franjas de passos e inclinações variadas

Para outros perfis, o interferograma apresentar-se-á como um conjunto de linhas remontando um mapa topográfico. Se a superfície rotacionar ao redor de um eixo definido, as franjas talvez possam ou não rotacionar dependendo do seu alinhamento com relação ao eixo óptico e a normal à superfície de teste. Isto pode ser usado no arranjo e calibração de uma máquina de precisão tão bem quanto no controle do processo.

CAPÍTULO 4

ATUADORES PIEZOELÉTRICOS

4.1 Introdução

Unidades de acionamento piezoelétricos são apropriadas para a tecnologia de posicionamento na atualidade. Estes elementos de micro posicionamento substituem os sistemas de posicionamento tradicionais, não somente no âmbito de pesquisa e desenvolvimento, mas também em termos de produção industrial; marcando a rapidez da máquina e a exatidão.

4.2 Funcionamento e Características

Mudanças pequenas na operação da voltagem são convertidas em livres movimentos linear de choque. Não há voltagem na entrada que possam influenciar os movimentos constantes.

Sua expansão é baseada puramente na deformação do estado-sólido e mostra sinais de envelhecimento.

Materiais piezoelétricos sintéticos, e.g., PZT [$\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$] podem ser manufaturados em muitos tamanhos e formas, estes incluem placas, chapas, blocos, discos, semi-esferas, tubos e anel, sendo que alguns podem ser usados sozinhos ou em combinações [King et al, 1990; Catálogo; PI]. Para pequenos alcances ($1\text{-}50\mu\text{m}$) mas com alta força e rapidez de resposta (micro segundos) um disco único ou uma pilha de discos podem ser usados. Em uma construção de pilhas, que dão grande sensibilidade, os discos são conectados eletricamente em paralelo mas operam mecanicamente em série como mostra a figura 4.1. Estes atuadores são extremamente usados em microposicionamento por exemplo, em válvulas de controle de fluidos e interferômetros ópticos. [Newcomb & Flinn, 1982]

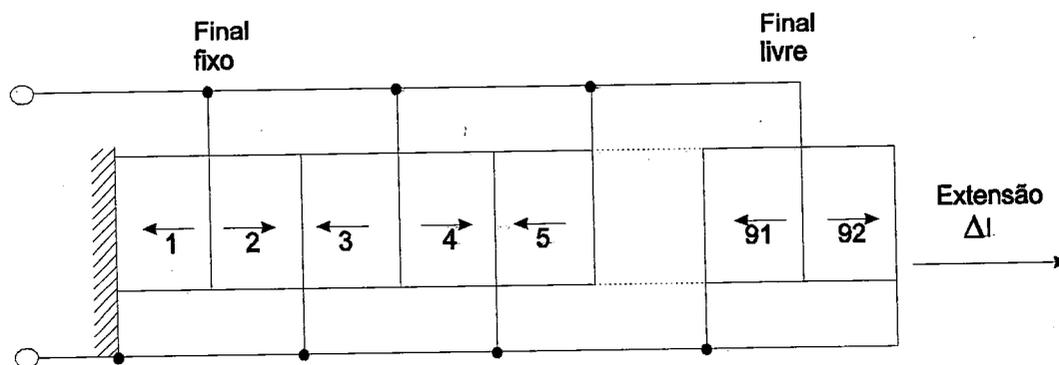
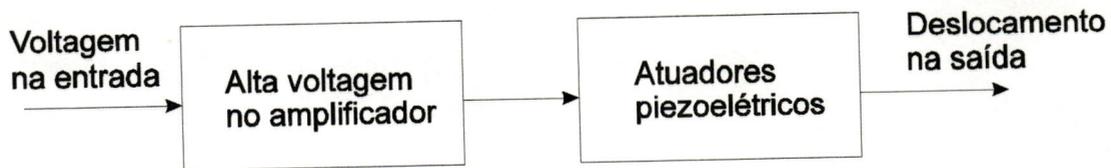
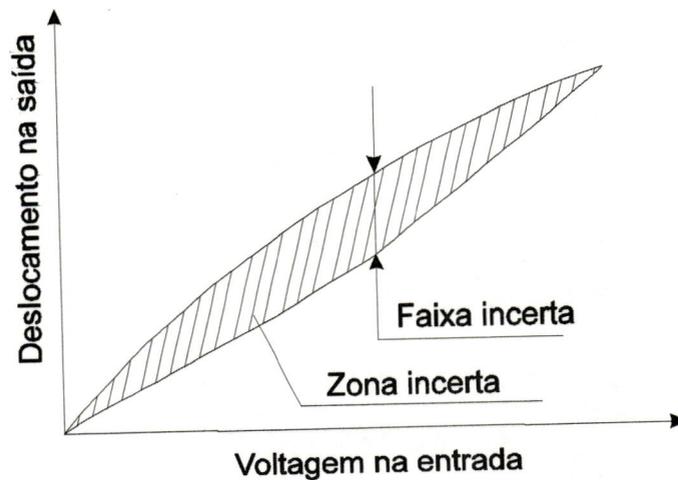


Figura 4.1 Construção em pilhas dos Atuadores Piezoelétricos

Materiais piezoelétricos sintéticos são preferivelmente utilizados devido à vantagem de manufatura. Entretanto, PZT's mostram um significant valor de histerese, que exige controle de ciclo fechado como mostra a figura 4.2 [Jung & Kim, 1994].



A)



B)

Figura 4.2 Posicionamento incerto devido ao efeito de histerese em atuadores PZT de cerâmica. (a) posicionamento de controle de ciclo-aberto (b) típica resposta de histerese.

A expansão do elemento piezoelétrico é proporcional à diferença de potencial aplicada. O coeficiente de proporcionalidade, chamado de coeficiente de deformação do material piezoelétrico, medido em $\mu\text{m}/\text{V}$, normalmente representado por d , expressa a razão entre a deformação ao longo de um eixo e ao campo elétrico aplicado. O coeficiente d , entretanto, não é constante, mas depende do tempo (envelhecimento), campo elétrico aplicado e temperatura. Conseqüentemente, a expansão de um material piezoelétrico não é completamente linear. As não-linearidades apresentadas são saturação, deriva e histerese.

A saturação ocorre porque voltagens acima de um determinado valor não produzem mais alinhamento dos dipolos do material. Essa não-linearidade pode ser desprezada se o campo elétrico for limitado abaixo do ponto de saturação.

A deriva se caracteriza pela continuação da expansão do material piezoelétrico na mesma direção da expansão inicial. O tempo de resposta de um material piezoelétrico é da ordem de uma fração de segundo (praticamente instantânea) seguida de uma deriva de aproximadamente 1% a cada 10s de modo que se torna desprezível depois de poucos segundos.

Histerese pode ser definida como a máxima diferença de expansão, (na reversão) expressa como uma porcentagem da expansão máxima. A magnitude de histerese é proporcional à amplitude da expansão, ao contrário da histerese mecânica ("backlash") onde a perda de movimento na reversão é constante.

Dadas as não-linearidades (principalmente histerese), elementos piezoelétricos para aplicações em posicionamento absoluto de alta precisão, requerem sistemas de controle de malha fechada. Sensores de posição de alta precisão tais como: capacitivos, indutivos e interferométricos são normalmente utilizados para esse fim.

4.3 Aplicações de Atuadores Piezoelétricos na Usinagem de Ultra Precisão

Os sistemas de controle dos movimentos e os dispositivos de posicionamento são partes essenciais de uma máquina ferramenta de ultra precisão, pois estes são responsáveis pelos deslocamentos da peça e da ferramenta os quais, no caso de uma máquina de ultra precisão, devem operar na faixa sub-micrométrica.

Em algumas aplicações de ultra precisão, os sistemas de controle dos movimentos das massas são solicitados a trabalhar em faixas de velocidades muito baixas, enquanto em outras, servo-atuadores muito rápidos são necessários para seguir formas específicas

em tempo real [Dow et al, 1991]. Sistemas interferométricos de laser, sensores capacitivos e indutivos são normalmente empregados para posicionamento que necessitem de alta resolução.

Sistemas interferométricos dependem da alta estabilidade do laser, normalmente, 1 parte em 10^9 e 256 bits de resolução eletrônica. Sensor capacitivos podem ter resolução da ordem de 2.5nm [McCue, 1983].

[Kouno, 1984] divulgou o projeto e a construção de um atuador piezoelétrico de ultra precisão incorporando um transdutor diferencial linearmente variável (LVDT) para atenuar os efeitos da histerese e da expansão térmica. Este atuador é potencialmente disponível para o uso em porta ferramenta para servo correção de erros sistemáticos em usinagem de ultra precisão. As características registradas são: resolução de 10nm para alcance de $0.5\mu\text{m}$, largura de banda de 50Hz e rigidez axial de $300\text{N}/\mu\text{m}$. O último trabalho apresentado por [Patterson & Magrab, 1985] apresenta um atuador similar incorporando um sensor capacitivo padrão com alcance de posicionamento de $\pm 1.27\mu\text{m}$, resolução de 2.5nm, largura de banda de 100Hz e rigidez (todos três eixos) de $175\text{N}/\mu\text{m}/10^6\text{lb/in}$.

4.4 Outras Aplicações

A tabela 4.1 mostra um resumo das aplicações de atuadores piezoelétricos mais comuns.

| Mecânica de Precisão e Engenharia Mecânica | Óptica e Tecnologia de Medição |
|---|--------------------------------|
| ajuste de ferramenta | posicionamento do espelho |
| correção desgaste | holografia |
| controle de injeção | interferometria |
| micro-bombas | laser para torneamento |
| acionamento linear | posicionamento de fibra óptica |
| piezo martelo(hammers) | scanner de espelho |
| ferramenta de extrusão | estabilização de imagem |
| sistema de microgravura | auto foco |

| Medicina | Microeletrônica |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| micro manipulação | posicionamento da máscara e wafer |
| penetração de células | microlitografia |
| microdosagem | sistema de inspeção |
| estimulação audio fisiológica | |
| geração de onda de choque | |

Tabela 4.1 Aplicações dos Atuadores Piezoelétricos



CAPÍTULO 5

UM ALGORITMO PARA COMANDO DE UMA MESA DE MICROPOSICIONAMENTO ANGULAR USANDO INTERFEROMETRIA

5.1 Introdução

Em correlação com a necessidade de posicionamento (nivelamento) de peças para a usinagem de ultra-precisão, bem como do monitoramento e correção de erros durante o processo, encontra-se em desenvolvimento e em fase de pesquisa, o projeto de uma mesa niveladora de trabalho, usando atuadores piezo-elétricos para ajustar a altura e a orientação (ângulo) de peças ou ferramentas quando posicionadas para usinagem. Seguindo os princípios básicos de projeto em engenharia de ultra-precisão, é sugerido que as partes móveis da mesa devam ser suportadas por elementos flexíveis da maneira que diminuam as perdas de movimento em reversões, causadas por elementos deslizantes (mancais), fusos, contatos mecânicos etc. Elementos piezoelétricos são sugeridos para atuação por se tratarem de atuadores de estado sólido ('solid state') com alta rigidez e baixo tempo de resposta. Sugere-se que atenção deva ser dada ao projeto mecânico de modo a permitir boa dinâmica do sistema a fim de que se obtenham respostas rápidas (alta largura de banda), possibilitando o uso da mesa para a correção de erros além do preciso posicionamento da peça no 'set up'. O monitoramento da mesa será feito através de interferometria (interferômetro de Fizeau) e do software apresentado neste trabalho o qual analisa a imagem interferométrica de uma superfície de referência plana manda sinal para os atuadores.

5.2 Desenvolvimento de Algoritmo para Correção do Ângulo de Posicionamento da Mesa

5.2.1 Introdução

Nesta fase será desenvolvido um algoritmo matemático para, através da análise do interferograma da superfície de referência sobre a mesa niveladora, determinar a quantidade e direção de sua inclinação. O algoritmo considera o eixo do interferômetro, eixo de rotação da superfície de referência e a normal da peça. O sistema deverá ser capaz de calcular esta inclinação tanto com a mesa estacionária quanto em rotação durante o processo de corte. O sistema de controle dos atuadores piezoelétricos deverá receber um sinal para acionar um ou mais atuadores conforme a magnitude e direção da inclinação. Será considerada uma peça (superfície de referência) plana cuja normal é paralela ao eixo óptico (normal ao plano de referência do interferômetro). Nessas condições o interferograma será uma família de franjas paralelas. Conforme a disposição do interferômetro de Fizeau (Wyko), a distância entre uma franja corresponde a meio comprimento de onda ($\lambda/2$) do Laser utilizado (He-Ne) de diferença de passo óptico, ie, variação da altura da peça em relação ao plano óptico. Se for tomada a direção normal às franjas, como mostra a figura 5.1, vê-se que a diferença de altura total do plano será

$$n \frac{\lambda}{2}$$

onde n é o número de franjas contadas nessa direção

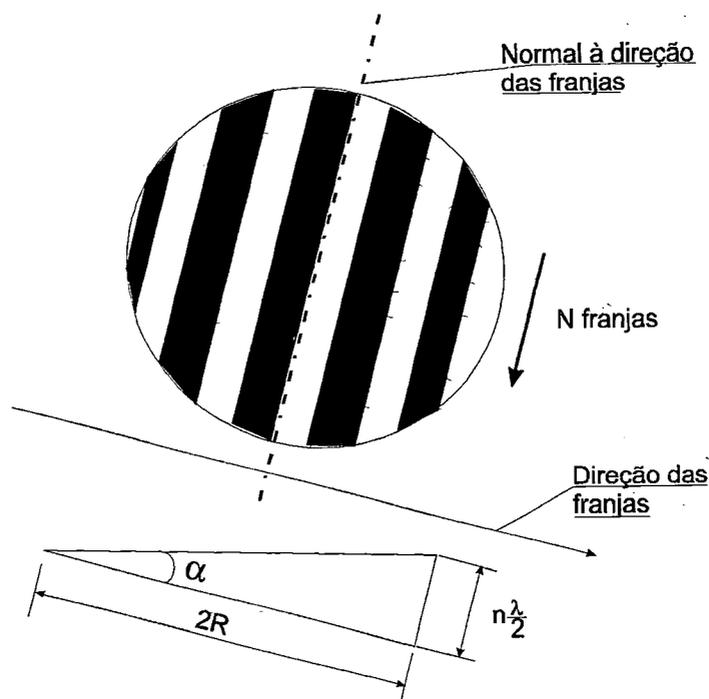


Figura 5.1 Cálculo da inclinação da mesa.

Se a peça for circular de raio R , o ângulo α de inclinação com respeito ao plano óptico será dado por

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{n \frac{\lambda}{2}}{2R}$$

Não é possível saber se a mesa está inclinada para um ou outro sentido pois o interferograma é igual para ambos.

Quando a peça (mesa) gira, a família de franjas gira com mesma velocidade e sentido sem alterar o número e espaçamento.

5.2.2 Hardware

Os componentes que integram parte do sistema do projeto a ser desenvolvido são:

- Computador; 486 DX2
- Conversor digital / analógico (D/A);
- Placa de vídeo (Video Blaster).
- outros componentes de 'hardware'.

Sistema de alimentação dos piezoelétricos

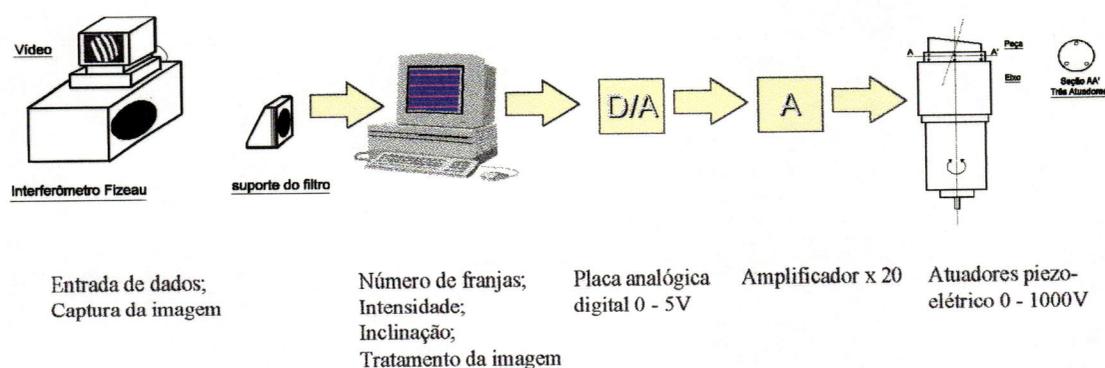


Figura 5.2 Componentes que integram o sistema a ser desenvolvido

Video Blaster

A configuração necessária para instalação da placa Video Blaster FS200 é:

- IBM 386SX, 386, 486, PS/2 (modelos 25 e 30 ou 100% compatível);
- 4 MB RAM (mínimo);
- 2 MB espaço livre no disco rígido (mínimo);
- monitor VGA;
- cartão VGA com VESA conector compatível;
- versão do DOS 3.1 ou posterior;
- versão do Windows 3.1 ou posterior.

- Característica do conector VGA

Este é um conector de 26 pinos que conecta a placa VGA por meio do cabo do conector VGA. Quando conectado, sinais podem ser enviados da placa VGA para a placa do vídeo.

- Saída do VGA

Este é um conector de 15 pinos D-Shell, conectado ao monitor VGA por meio do cabo do monitor VGA. Quando conectado, o sinal analógico pode ser enviado para o monitor VGA.

- Entrada do Vídeo VGA

Este é um conector de 15-pinos D-Shell, quando conectados ao cartão VGA e a fonte do vídeo com a tampa RCA, por meio do cabo de interface do vídeo. Quando conectados, o sinal do VGA bem como o sinal do vídeo RCA podem ser enviados para o cartão do vídeo.

- Cabos do vídeo

Dois cabos de vídeo são incluídos no pacote da placa de vídeo. Eles são o cabo de interface do vídeo e o cabo conector do VGA.

Conversor Digital-Analógico.

O mundo em que vivemos é baseado em domínio analógico no qual as variáveis (pressão, corrente, voltagem, velocidade, aceleração etc) são quantidades naturais que mudam continuamente. No mundo digital, a corrente ou voltagem não representam a magnitude da variável, já que há somente dois níveis, o nível “on” (ou lógico “1”), e o nível “off” (ou lógico “0”). Entretanto a magnitude da variável pode ser representada pela combinação de vários níveis on/off.

Um sinal digital tem entretanto somente um número finito de valores, e podem mudar somente em passos discretos.

No computador digital '0' e '1' são representados como mudanças em voltagem. Outros aparelhos eletrônicos/elétricos, tais como sensores, transdutores, atuadores requerem sinal analógico para operar.

O objetivo do conversor D/A é traduzir o sinal digital em analógico (voltagem ou corrente) (usualmente na saída do aparelho).

A imagem interferométrica da peça, depois de analisada, fornece dados para o cálculo da inclinação da mesa e, portanto, dos valores da expansão necessária dos atuadores. O sinal digital fornecido pelo micro-computador é, então, convertido para um sinal analógico proporcional à expansão.

Supondo um conversor digital/analógico, cujo tamanho de palavra é de 12 bits, a variável é dividida em $2^{12} = 4096$ unidades (-2048 a 2047 se o sinal analógico for bipolar ou 0 a 4095 se ele for unipolar).

O procedimento de amostragem é executado a cada intervalo de tempo T e o valor da variável mais próximo do valor real correspondente ao sinal analógico para cada ponto no tempo tomado.

Quanto maior a frequência de amostragem maior será a exatidão do sinal digital. Também quanto mais fina for a escala que representa a variável, mais representativo será o sinal digital. Isso significa que um conversor D/A de 12 bits opera com maior exatidão que um de 8 bits.

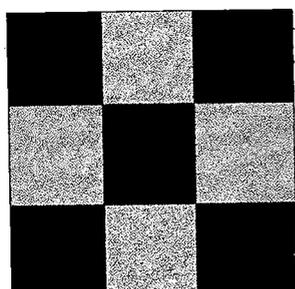
Para escolher o conversor D/A mais apropriado as seguintes características devem ser levadas em consideração:

- velocidade (frequência);
- resolução;
- exatidão (não-linearidade, estabilidade);
- número de saídas independentes (número de canais);
- fundo de escala de saída;
- compatibilidade

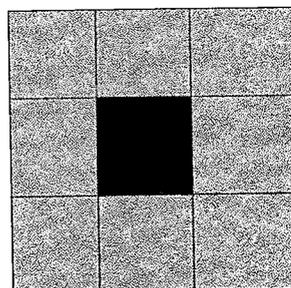
5.2.3 Software: Tratamento da Imagem

Representação Matricial

A estrutura do formato determina implicitamente uma relação de uma topologia para o domínio da imagem de acordo com dois tipos de vizinhança discretas. Essas vizinhanças são denominadas de 4-conectada e 8-conectada. Dado um elemento a_{ij} , a vizinhança 4-conectada é o conjunto dos elementos $a_{i-1,j}$, $a_{i+1,j}$, $a_{i,j-1}$, $a_{i,j+1}$, conforme ilustrado na figura 5.3 (a). A vizinhança 8-conectada é o conjunto dos elementos da vizinhança 4-conectada mais os elementos $a_{i-1,j-1}$, $a_{i+1,j-1}$, $a_{i-1,j+1}$, $a_{i+1,j+1}$.



(a) vizinhança 4-conectado



(b) vizinhança 8-conectado

Figura 5.3 Tipos de vizinhança na representação matricial

Filtragem e Frequência

É comum dividir o domínio da frequência de um sinal em duas regiões: uma vizinhança da origem, que é chamada de região de baixas frequências, e o seu complemento, que é chamada de região de alta frequência. É claro que o conceito de baixas e altas frequências e, portanto, o tamanho da vizinhança acima, depende diretamente da aplicação. Em algumas aplicações é útil se tomar uma partição do domínio de frequências, dividindo-o em diversas regiões disjuntas de forma a obter uma decomposição do sinal em diversas bandas do espectro de frequências.

Seja L um filtro f um sinal. Dizemos que L é de passa-alta, ou filtro de agudização, quando a operação de filtragem subtrai as baixas frequências do sinal. O filtro é de passa-baixa, ou filtro de suavização, quando o sinal filtrado não possui altas frequências. O filtro L é de 'para-faixa', ou 'para-banda', quando ele elimina as frequências em uma determinada faixa do espectro. Finalmente, L é de 'passa banda', ou 'passa faixa', se $L(f)$ possui apenas frequências em uma determinada região do espectro [Gomes & Velho, 1994; Gonzales & Woods, 1993].

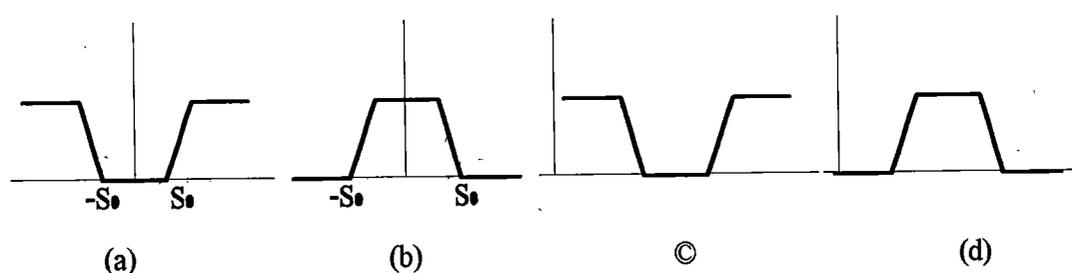


Figura 5.4 (a) filtro passa-alta (b) filtro passa-baixa
 © filtro passa-banda (d) filtro para-banda

Filtro Gaussiano

No caso unidimensional, no domínio contínuo, o filtro gaussiano tem um núcleo $G_\sigma(x)$ dado pela função de distribuição gaussiana

$$G_\sigma(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}},$$

com média 0 e variância σ . No caso bidimensional o núcleo é definido por

$$G_\sigma(x, y) = \frac{1}{2\sigma^2\pi} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}},$$

Uma análise rápida no domínio contínuo, mostra que o filtro gaussiano é um filtro de passa-baixa. [Gomes & Velho, 1994]

Limiarização (“Tresholding”)

Consiste em determinar um ponto de separação dos pixels (limiar) do histograma de uma imagem, abaixo do qual os pixels são transformados no máximo de intensidade.

Por exemplo se em uma imagem de 256 níveis de cinza nós escolhermos um valor de tresholding de 120, então deve-se setar todos os pontos da imagem abaixo de 120 para 0 e os pontos acima de 120 para 255. Este processo por sua simplicidade de implementação é muito eficaz quando nós temos uma imagem com os objetos de interesse possuindo cores bem distintas do fundo da imagem e desejamos obter uma imagem binarizada com estes objetos em destaques. [Gonzales & Woods, 1993]

É um método simples de ser implementado. Pode ser usado para: remover gradações indesejáveis na imagem (agrupamento ou quantização do histograma); para melhorar o contraste (“splitting”/equalização).

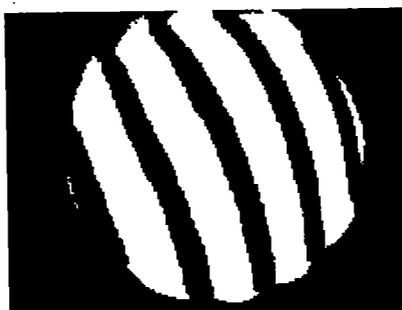


Figura 5.5 Thresholding

Detectores de Bordas (“Edge Detection”) com Sobel e Robert

Consiste na convolução da imagem com templates que tem por objetivo reforçar as bordas da imagem. Estes operadores atuam sobre a fronteira, pois consideram a borda como fronteira entre duas regiões com propriedades distintas de nível de cinza. Assumem que as regiões em questão são suficientemente homogênea, de modo que a

transição entre elas pode ser determinadas com base somente na descontinuidade do nível de cinza. Estes operadores reforçam as bordas da imagem.

A diferença em relação a manipulação do histograma é que estes detectores operam sobre a fronteira da imagem reforçando-a e não operando sobre a região inteira do objeto como no método do thresholding, sendo portanto mais aconselhável quando nós desejamos obter somente o contorno dos objetos.

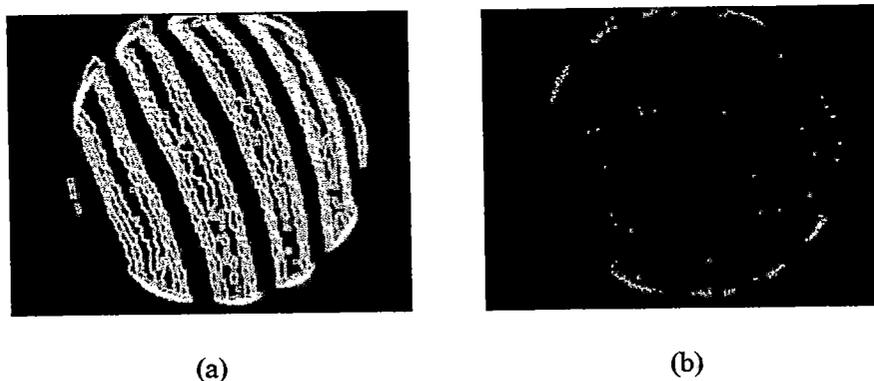


Figura 5.6 Detectores de Bordas: (a) Sobel, (b) Robert

Sobel utiliza dois templates, um em x e o outro em y. Aplica-se os templates na imagem com o intuito de realçar (reforçar) as bordas, isto é feito de forma bastante simples, aplicando-se a seguinte equação:

$$b_{ij} = \left| a_{i-1,j-1} + 2a_{i-1,j} + a_{i+1,j+1} - a_{i+1,j-1} - 2a_{i+1,j} - a_{i+1,j+1} \right|$$

$$\left| a_{i-1,j-1} + 2a_{i,j-1} + a_{i+1,j-1} - a_{i+1,j+1} - 2a_{i,j+1} - a_{i+1,j+1} \right|$$

[Gonzales & Woods, 1993]

Filtro de Suavização (“Smoothing”)

São usados para borramento e para redução de ruídos. Borramento é usado em passo de pré-processamento, tal como remoção de pequenos detalhes de uma imagem e para extração do objeto.

$$g(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{(m,n) \in S} f(m, n)$$

S: conjunto de coordenadas de pontos da vizinhança de (x, y) , incluindo (x, y) ;

M: número total de ponto da vizinhança considerada.

O borramento produzido pelo alizamento pode ser reduzido por um procedimento de corte (thresholding)

assim:

$$g(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{(m,n) \in S} f(m, n) & \text{se } |f(x, y) - g(x, y)| < T \\ f(x, y) & \end{cases}$$

T: limiar não negativo

Operação de Suavização \rightarrow filtro passa baixa

Filtro Mediana

Quando o nível de cinza de cada pixel é substituído pela mediana do nível de cinza na vizinhança de cada pixel.

O método mais comum de diferenciação em aplicações de processamento de imagem é o gradiente. Para a função $f(x, y)$, o gradiente de f da coordenadas (x, y) é definido pelo vetor

$$\nabla f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}$$

A magnitude deste vetor,

$$\nabla f = \text{mag}(\nabla f) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

é a base para várias aproximação para diferenciação da imagem. Considerar a região da imagem mostrada na figura 5.7 (a), onde z 's denota os valores de níveis de cinza. A equação acima pode ser aproximada ao ponto z_5 em um número de direção. Para o uso da diferença ($z_5 - z_8$) na direção de x e ($z_5 - z_6$) na direção de y , combinado como:

$$\nabla f = \left[(z_5 - z_8)^2 + (z_5 - z_6)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Note que o gradiente de uma imagem está baseado na obtenção da derivada parcial $\partial f/\partial x$ e $\partial f/\partial y$ para toda localização do pixel. Entretanto o operador de Sobel tem a vantagem de fornecer ambas as diferenciações e o efeito de suavização.

| | | |
|-------|-------|-------|
| z_1 | z_2 | z_3 |
| z_4 | z_5 | z_6 |
| z_7 | z_8 | z_9 |

(a)

Figura 5.7 Uma região 3x3 de uma imagem (o z 's são os valores de nível de cinza).

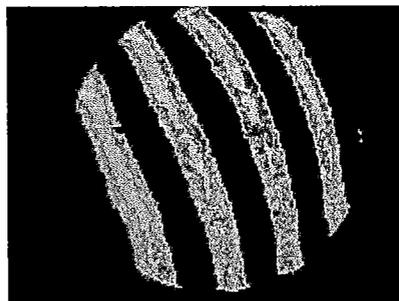


Figura 5.8 Filtro Mediana

5.2.4 Procedimento de Cálculo do Número de Franjas e Inclinação

Como visto no item anterior, para conhecer-se a inclinação da mesa é necessária a determinação do número de franjas (e direção) do interferograma. Para tanto foi adotado o método de Crescimento de Regiões.

O método de Crescimento de Regiões consiste na segmentação baseada-se em descontinuidades (bordas e fronteiras) e em similaridades das propriedades dos pixels. O crescimento de região por agregação de pixel (vizinhança) consiste no agrupamento de pixels com propriedades similares (nível de cinza, textura, cor, etc), visando detectar toda a região. Inicia-se com um conjunto de sementes em torno da qual as regiões crescem.

Primeiro passa thresholding, depois escolhe-se uma característica, por exemplo, um nível de cinza o qual deve ser comum à todos os elementos que pertençam a região, em seguida escolhe-se um pixel que possua estas características (pixels preto) como semente para esta região. A partir daí deve-se analisar os pontos pretos em torno dessas regiões, quando encontro uma região crescida obtendo um possível valor menor que cem (100) pixels preto com alguma intensidade são encontrados em sucessões é assumido que o ruído está presente e não uma franja.

Para o cálculo da inclinação, efetua-se o método de crescimento de regiões a partir da semente de coordenadas (x,y).

Verifica-se um dos pontos extremos da região, e calcula-se a distância da diferença dos extremos de maior X, maior Y, menor X e menor Y. Entre as seis distâncias, pegamos a quarta maior distância e calculamos a inclinação.

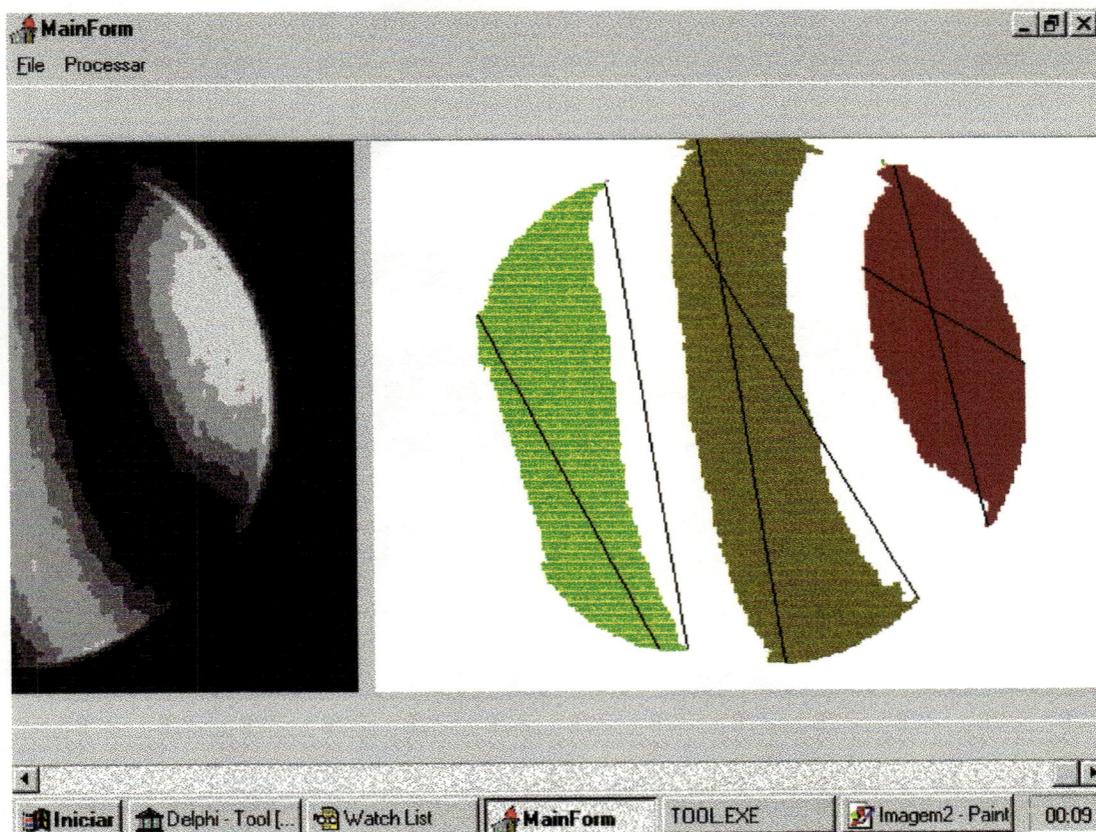


Figura 5.9 Cálculo do número de franjas pelo método Crescimento de Regiões

5.2.5 Procedimento de Compensação

A fim de calcular-se a voltagem que deve ser aplicada aos atuadores a inclinação (que pode ser calculada através do número de franjas da imagem) e a direção da inclinação (normal à direção das franjas) devem ser conhecidas. O método descrito acima fornece esses valores.

Para estabelecer um procedimento para correção da inclinação, através de atuadores, é necessário a fixação da disposição dos atuadores. Considerando a disposição representada na figura 5.10, dois atuadores estão posicionados diametralmente opostos nos pontos B e C. O ponto A não possui atuador. É um sistema de dois atuadores e dois eixos.

Suponha um sistema de coordenadas ortogonal x, y, z como o da figura 5.10. O plano (A, B, C) representa a superfície da peça de referência (ou mesa).

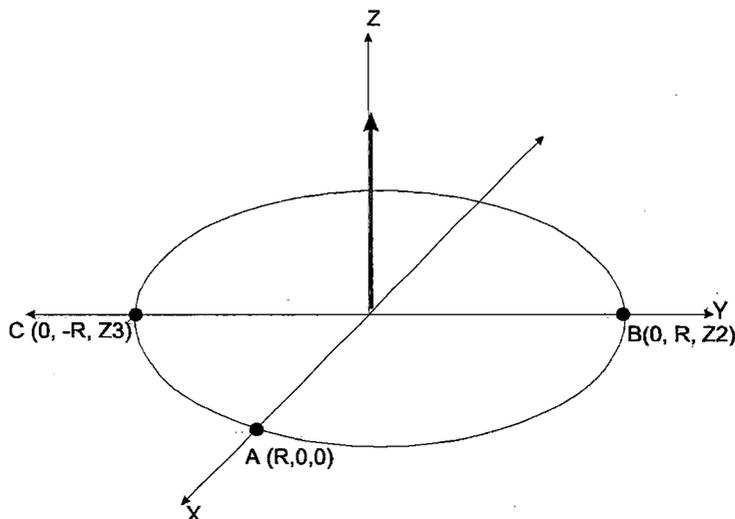


Figura 5.10 Coordenadas Ortogonais

O eixo Z é coincidente com o eixo de giro da peça (centro de giro do eixo-árvore) que se deve fazer também coincidente com o eixo óptico (eixo do interferômetro) o que é feito por um simples ajuste do plano de referência do interferômetro.

O ponto A é fixo, ou seja, é simplesmente pivotado, permitindo giros, mas não deslocamentos (não há atuador nesse ponto). Os pontos B e C têm atuadores que alteram a coordenada Z (altura) responsável pela posição angular da peça. Se B e C são dispostos diametralmente opostos à distância R do centro da mesa e A a 90° de B e C, também distante de R do centro da mesa, as coordenadas de A, B e C são respectivamente $(R, 0, 0)$, $(0, R, Z_2)$ e $(0, -R, Z_3)$, como mostra a figura 6.9.

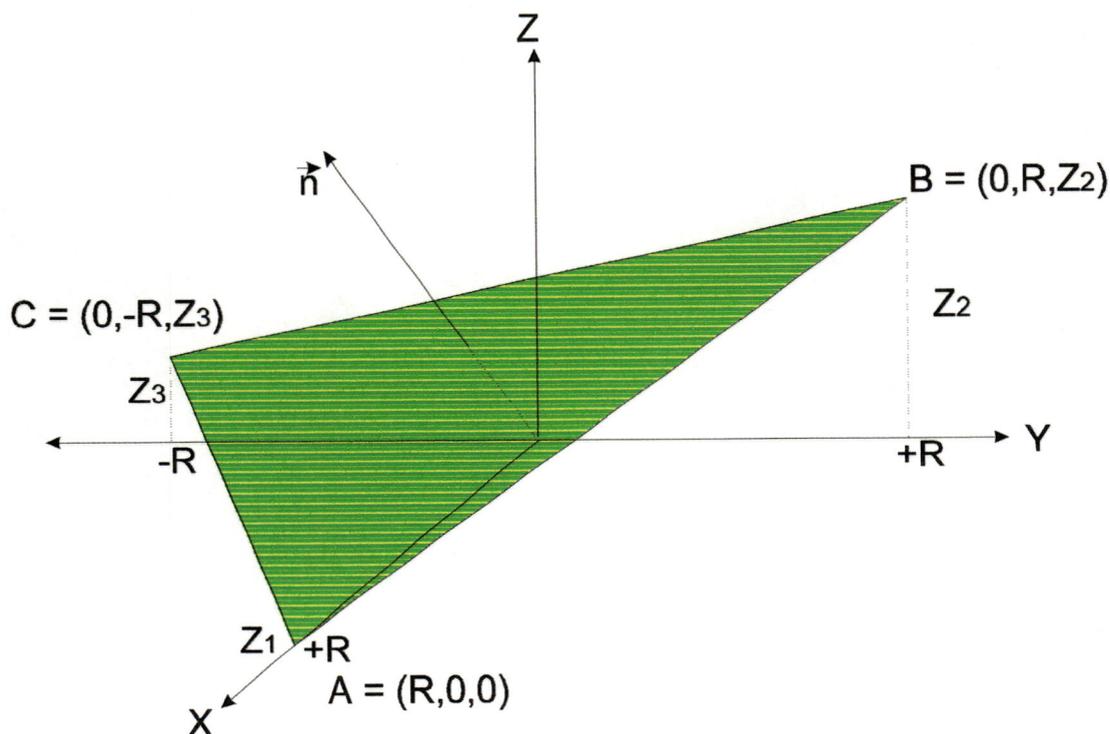


Figura 5.11 Coordenadas A, B, C, Distantes de R

R = posição radial dos atuadores;

Z_2, Z_3 - deslocamentos dos atuadores (sinal contrário), supondo $z_1 = 0$

A função da mesa é fazer (A, B, C) ficar paralelo a xy, logo, o deslocamento dos atuadores posicionados em B e C deve ser, respectivamente, $-Z_2$ e $-Z_3$, fazendo A fixo ($Z_1=0$).

As equações paramétricas do plano que passa por A, B e C, ou seja, o plano que passa por $A = (R, 0, 0)$ e é paralelo aos vetores $\vec{AB} = (-R, R, Z_2)$ e $\vec{AC} = (-R, -R, Z_3)$ são:

$$x = R + \lambda(-R) + \mu(-R)$$

$$y = 0 + \lambda(R) + \mu(-R)$$

$$z = 0 + \lambda(Z_2) + \mu(Z_3)$$

Se um ponto $X = (x, y, z)$ pertence a esse plano, então \vec{AX} , \vec{AB} e \vec{AC} são mutuamente independentes, logo

$$\begin{vmatrix} x-R & y-0 & z-0 \\ -R & R & Z_2 \\ -R & -R & Z_3 \end{vmatrix} = 0$$

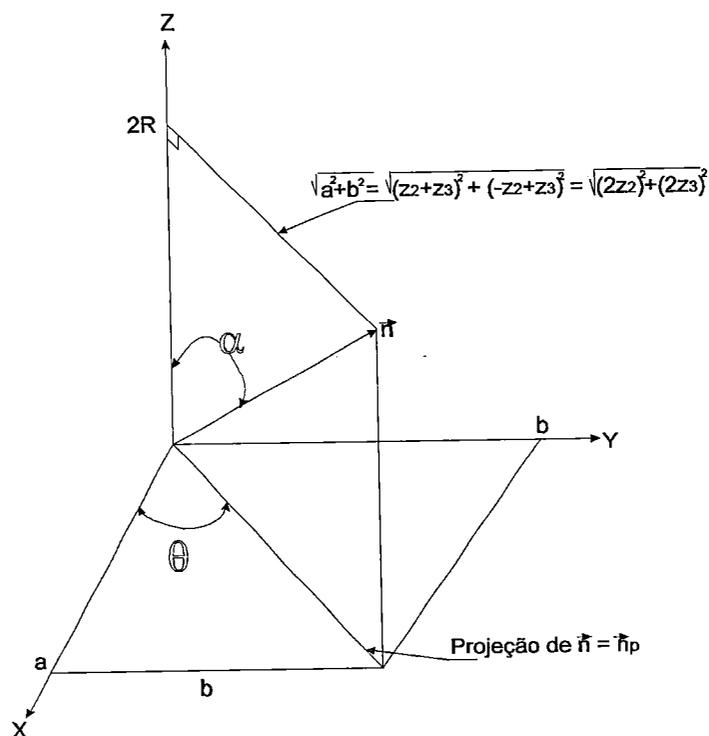
portanto, a equação geral do plano é:

$$R(Z_2 + Z_3)x + R(-Z_2 + Z_3)y + 2R^2Z - R^2(Z_2 + Z_3) = 0$$

$$(Z_2 + Z_3)x + (-Z_2 + Z_3)y + 2RZ - R(Z_2 + Z_3) = 0$$

O vetor normal \vec{n} a esse plano é:

$$\vec{n} = ((Z_2 + Z_3), (-Z_2 + Z_3), 2R)$$



Se $a > 0$ e $b > 0$:

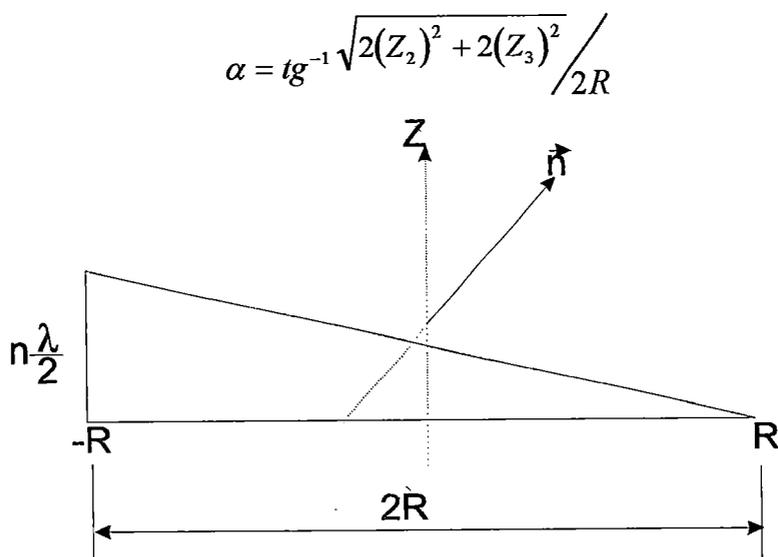
$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{b}{a} = \operatorname{tg}^{-1} \left| \frac{-Z_2 + Z_3}{(Z_2 + Z_3)} \right|$$

Se $a < 0$

$$b > 0 \quad \theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{b}{a} = \operatorname{tg}^{-1} \left| \frac{-Z_2 + Z_3}{(Z_2 + Z_3)} \right| + 90$$

Se $a > 0$

$$b < 0 \quad \theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{b}{a} = \operatorname{tg}^{-1} \left| \frac{-Z_2 + Z_3}{(Z_2 + Z_3)} \right| + 270$$



$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left| \frac{-Z_2 + Z_3}{(Z_2 + Z_3)} \right| \quad \text{eq. (1)}$$

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\left(\frac{n\lambda}{2} \right)}{2R} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{n\lambda}{4R}$$

sendo

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{2(Z_2)^2 + 2(Z_3)^2}}{2R} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{n\lambda}{4R} \quad \text{eq. (2)}$$

com a equação(1) e a equação(2) obteremos os valores do deslocamentos Z_2 e Z_3 .

$$Z_2 = \frac{nB\lambda}{2\sqrt{2B^2 + 2A^2}} \quad \text{eq.(3)}$$

$$Z_3 = \frac{nA\lambda}{2\sqrt{2B^2 + 2A^2}} \quad \text{eq.(4)}$$

onde:

$$A = \operatorname{tg}\theta + 1$$

$$B = 1 - \operatorname{tg}\theta$$

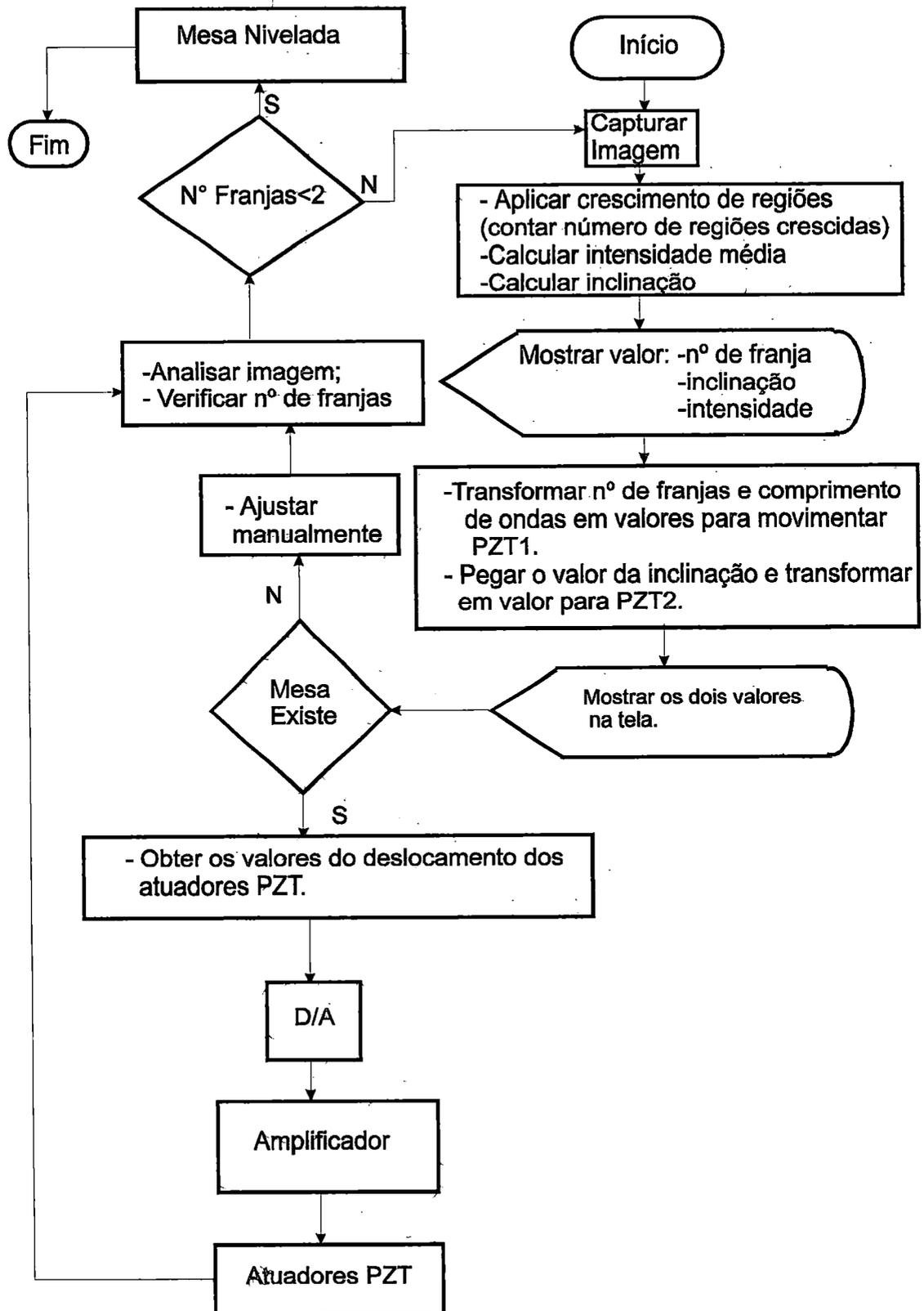
Pela análise da imagem são conhecidos θ e n , sabendo-se λ e adotando-se R tem-se Z_2 e Z_3 .

Os sinais de Z_2 e Z_3 devem ser invertidos para o deslocamentos contrário dos atuadores.

Os valores de Z_2 e Z_3 podem ser dados em μm ou em V (proporcional ao deslocamento) considerando o ganho do atuador e amplificação usada.

A seguir é mostrado o fluxograma do programa para detecção do número de franjas, direção das franjas, intensidade e, com esses elementos e o algoritmo apresentado no item anterior, fornecer valores para o deslocamento dos atuadores (ou valores proporcionais, dependendo do atuador e amplificador) que são responsáveis pelo posicionamento da mesa,

Fluxograma



5.2.6 Procedimento para Testes do Algoritmo

A figura 5.12 mostra a montagem para testes do algoritmo de controle de posicionamento da mesa.

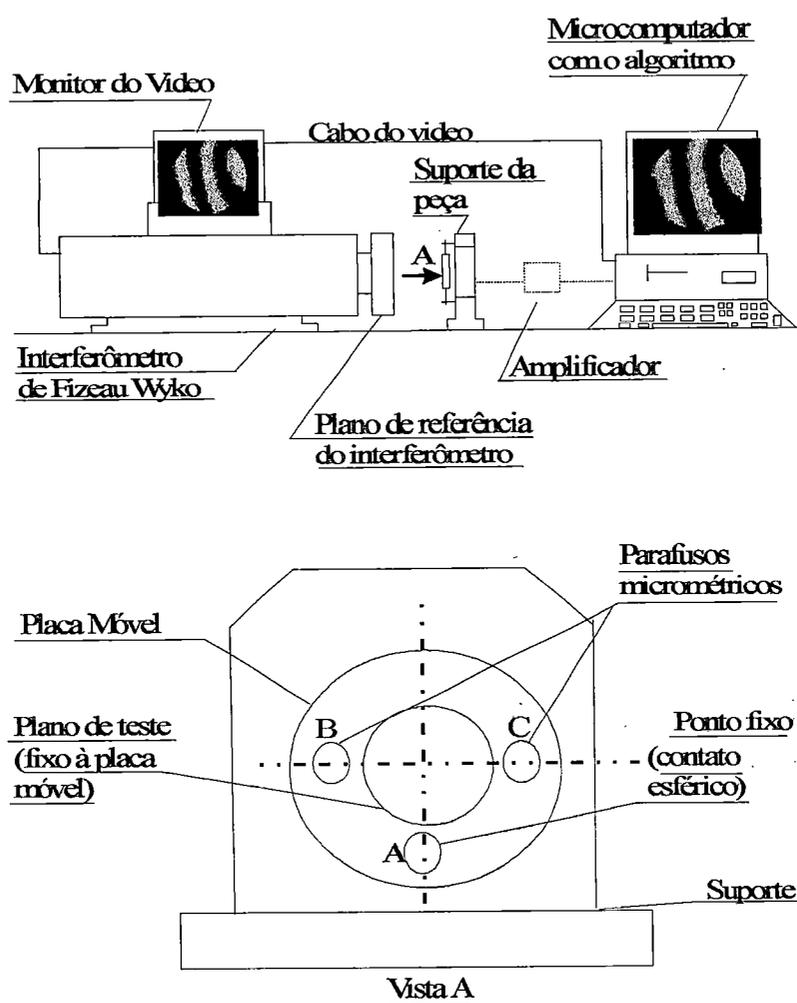


Figura 5.12 Montagem para Testes do Algoritmo

A disposição dos parafusos micrométricos e do ponto fixo da figura 5.12 corresponde ao arranjo utilizado para formulação do algoritmo descrito no item 5.2.3

Os parafusos substituem os atuadores para fim de testes. O deslocamentos axial dos parafusos é monitorado através de sensores de deslocamentos tipo indutivo (ou relógio comparadores micrométricos).

O microcomputador contém o aplicativo para o método de crescimento de regiões e o algoritmo de controle.

A peça é presa no suporte inclinado com relação ao plano de referência do interferômetro. Uma família de franjas paralelas e eqüidistantes cuja imagem pode ser vista no monitor são formadas. A imagem é capturada pela placa Video Frame Blaster e então analisada. O programa fornece os deslocamentos dos pontos B e C necessários para o ajuste da inclinação da peça. Os parafusos são, então, ajustados e um novo interferograma se forma. Se este for uma franja nula o processo é terminado, se não outra análise e ajuste são executados. O algoritmo funcionou como esperado.

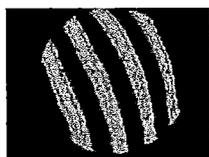
Esse procedimento deverá ser automático com a instalação da mesa e atuadores. A realimentação está representada por linha tracejada na figura 5.12.

5.2.7 Roteiro para o Teste do Algoritmo

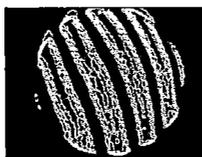
- Fixar a peça no suporte do interferômetro de Fizeau;
- Capturar a imagem no monitor do interferômetro



- No microcomputador com o algoritmo, fazer pré-processamento caso seja necessário, utilizando filtros: mediana, Sobel, Robert, Thresholding, etc.



Mediana



Sobel



Robert



Thresholding

- Com o método Crescimento de Regiões, calcular o número de franjas, intensidade média e a inclinação;
- Aplicar o algoritmo e mostrar na tela os seguintes valores obtidos: número de franja, inclinação, intensidade média, os deslocamentos dos atuadores PZT₁, PZT₂ e PZT₃;
- Ajustar manualmente os valores do deslocamento dos atuadores PZT₁, PZT₂ e PZT₃ nos parafusos micrométricos no suporte da peça (ver figura 5.12);
- Verificar o número de franjas e fazer nova análise da imagem;
- Caso o número de franjas for maior que 2, capturo outra imagem e recomeço nova análise; se imagem for menor que 2, então o programa foi bem sucedido.

Observação: Este programa foi feito para análise de peças de superfícies planas, onde é possível obter números de franjas menor que dois.

E com a construção do projeto da mesa posicionadora piezoelétrica, será possível a aplicação do software, havendo uma interface, podendo o programa ser realizado em tempo real, onde deverá ser apresentado um novo fluxograma e um novo roteiro para o teste do algoritmo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O desenvolvimento deste projeto surgiu com a necessidade de criar determinada infraestrutura para a realização de cortes de ultra-precisão, principalmente de materiais frágeis onde a espessura do cavaco removido não deve exceder certa dimensão crítica (normalmente submicrométrica).

A fim de obter os altos níveis de precisão requeridos, é necessário o alinhamento da peça num eixo alinhado com um transdutor externo (e.g., interferômetro).

Foi proposto um algoritmo, utilizando o método de crescimento de regiões para análise do interferograma da peça e monitoramento da mesa.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Aumento da eficiência do processamento para permitir correções 'in process' da posição da peça.
- Construção de uma mesa posicionadora piezoelétrica e aplicação do software apresentado nessa trabalho.
- Testes de uma mesa posicionadora piezoelétrica, controlada pelo software apresentado nesse trabalho em condições reais de corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) ABE, T. (1991). A future technology for silicon wafer processing for ULSI. PRECISION ENGINEERING, v. 13; n. 4, out, p. 251 - 255.
- 2) ASHKEROV, Y. V.; MINAYEV, A. I. (1988). Standing dor diamond turning of aspherical optical surfaces. Sov. J. Opt. Technol., v. 55, e. 5, p. 319-321.
- 3) BARKMAN, W. E. (1980). Laser-Interferometer position feedback for precision machine tools. Proc. J. T. Autom Control Conf., S. Francisco, CA, ago., p. WA7-E
- 4) BLACKLEY, W. S.; SCATTERGOOD, R. O. (1991). Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials, PRECISION ENGINEERING, v. 13; n. 2, abr, p. 95 - 103.
- 5) BRINKSMEIER, E. (1989). State-of-the-art of non-destructive measurement of sub-surface material properties and damage, PRECISION ENGINEERING, v.11, n.4, out, p. 211-224.
- 6) BRINKSMEIER, E.; SCHMIEDEN, W. (1987). Id-cut-off grinding of brittle materials. Annals of the CIRP. v. 36, p. 219-222.
- 7) CHEN, M. Q.; YANG, C. H. (1989). Dynamic compensation technology of the spindle error motion of a precision lathe. PRECISION ENGINEERING, v. 11; n.3, jul, p. 135 - 138.
- 8) DONALDSON, R. R.; PATTERSON, S. R. (1983). Design and construction of a large vertical-axis diamond turning machine. Lawrence Livermore National Laboratory Report 89738, ago.

- 9) DONALDSON, R. R.; PATTERSON, S. R.(1988). Design and construction of a large, vertical-axis diamond turning machine. Livermore, CA; Lawrence Livermore National Laboratory, ago, p.
- 10) DOW, T. A.; MILLER, M. H.; FALTER, P. J. (1991). Application of a fast tool servo for diamond turning of nonrotationally symmetric surfaces, PRECISION ENGINEERING, v. 13; n. 4, out, p. 243 - 250.
- 11) DOW, T. A.; SCATTERGOOD, R. O.(1990). Ductile / Brittle transition and development of ductile mode grinding technology. JSPE, p. 18 - 22.
- 12) DUDUCH, J.; GEE, A. E. (1990). Hysteresis in piezoelectric actuators: Implications for precision servo design. Proc. ASPE Annual Conf. , Rochester, NY; set, p. 170.
- 13) DUDUCH, J. (1993), Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle materials. Cranfield Thesis (Ph.D), Cranfield Institute of Technology.
- 14) DUDUCH, J.; GEE, A.E.; CHAO C.-L. (1992). Machining of Glasses in the Sub-Micrometre Ductile Mode. Applied Optics & Opto - Electronics, Leeds, set, p. 14-17.
- 15) DUDUCH, J.; PORTO, A.J. V.; GEE, E.; JASINEVICIUS, R. (1996). Model of Brittle Materials Single Point Machining with High Removal Rates. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas - Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences. V XVIII.,
- 16) FALTER, P. J.; DOW, T. A.(1987). Design and performance of a small-scale diamond turning machine, PRECISION ENGINEERING, v.9; n.4, out, p. 185-190.

- 17) FORNARO, R. J.; DOW, T. A. (1988). A high-performance machine tool controller. *Proc. IEEE*, p. 1429-1439
- 18) FRANSE, J.(1990). Manufacturing techniques for complex shapes with submicron accuracy, p. 1051-1057
- 19) FUJII, A.; MAUER, A.; CHUNG, C.; LI, H.; AUSLANDER, D. M. (1992). Fine motion Control: Nanometer Positioning of an XY table, *Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers*, p. 1 - 6.
- 20) GEE, A. E, et. al. (1991). Microtilt controlled chuck faceplate for ultra-precise single-point diamond machining. In: *ASPE MEETING*, Santa Fé, NM, out. 1991. (s. i.) s. p.
- 21) GEE, A, et al. (1989). On-axis interferometric measurement for tool positioning in ultra-precision single-point machining. *Proceedings of SPIE*, v. 1121, s. p.
- 22) GEE, A.E.; GREEN, D.; PAIN, D.(1988). An in-process tool proximity sensor for ultra - fine machining. *SURFACE TOPOGRAPHY*, v. , february, p. 183 - 191.
- 23) GONZALEZ, R.C.; WOODS, R. E. (1993). *Digital Imagem Processing*. Addison - Wesley Publishing Company. p. 189.
- 24) GONZALEZ, R.C.; WOODS, R. E. (1993). *Digital Imagem Processing*. Addison - Wesley Publishing Company. p. 443-444.
- 25) GONZALEZ, R.C.; WOODS, R. E. (1993). *Digital Imagem Processing*. Addison - Wesley Publishing Company. p. 189-192.

- 26) HARA, Y.; MOTONISHI, S.; YOSHIDA, K. (1990). A new micro - cutting device with high stiffness and resolution. *Annals of the CIRP*, v. 39; n. 1, p. 375 - 378.
- 27) HECHT, E; ZAJAC, A,(1974). Mathematics of wave motion, In: HECHT, E; ZAJAC, A. *Optics*, Addison-Wesley, Cap. 2, p.2-28.
- 28) IKAWA, N.; SHIMADA, S.; MOROOKA, H.(1987). Photoelectronic displacement sensor with nanometre resolution, *PRECISION ENGINEERING*, v. 9; n. 2, abr, p. 79 - 82.
- 29) JONAS, G.; VELHO, LUIZ. (1994). Computação Gráfica: Imagem, IMPA - *Instituto de Matemática Pura e Aplicada* e SBM - *Sociedade Brasileira de Matemática*. p. 203.
- 30) JONAS, G.; VELHO, LUIZ. (1994). Computação Gráfica: Imagem, IMPA - *Instituto de Matemática Pura e Aplicada* e SBM - *Sociedade Brasileira de Matemática*. p. 38.
- 31) KING, T. G.; PRESTON, M. E.; MURPHY, B. J. M.; CANNELL, D. S. (1990). Piezoelectric ceramic actuators: A review of machinery applications, *PRECISION ENGINEERING*, v. 12; n. 3, jul, p. 131 - 136.
- 32) KOHNO, T.; OKAZAKI, Y.; OZAWA, N.; MITUI, K.; OMODA, M. (1989) In-process measurement and a workpiece-referred form accuracy control system (WORFAC): concept of the method and preliminary experiment, *PRECISION ENGINEERING*, v,11; n. 1, jan, p. 9 - 14.
- 33) KOHNO, T.; OZAWA, N.; MIYAMOTO, K.; MUSHA, T. (1988). High precision optical surface sensor. *J. Appl. Opt.*, v.27; p. 103-109.

- 34) KOUNO, E. (1984). A fast response piezoelectric Actuator for Servo Correction of systematic errors in Precision Machining, *Annals of the CIRP*, v. 33; n.1, p. 369 - 372.
- 35) LAWN, B. R.; EVANS, A. G. (1977). A model for crack initiation in plastic/elastic indentation fields. *J. Mater. Sci.*, v. 12, p.1195.
- 36) MAEDA, Y.; UCHIDA, H.; YAMAMOTO, A. (1989). Measurement of the geometric features of a cutting tool edge with the aid of a digital image processing technique, *PRECISION ENGINEERING*, v. 11; n. 3, jul, p. 165 - 171.
- 37) McCUE, H. K. (1983) The motion control system for the large optics diamond turning machine (LODTM). *Proc.SPIE*, Int. Soc. Opt. Eng; San Diego, CA, USA, v.433; p. 68-75.
- 38) McKEOWN, P. A. (1986). High precision manufacturing and the British economy. *Proceedings of IME*, v. 200; n. 76, p. 1 - 19.
- 39) McKEOWN, P. A.(1987). The role of precision engineering in manufacturing of the future. *Annals of the CIRP*, v. 36; n.2, p. 495 - 501.
- 40) MILLER, M. H.; GARRARD, K. P.; DOW, T. A.; TAYLOR, L.W. (1994). A controller architecture for integrating a fast tool servo into a diamond turning machine, *PRECISION ENGINEERING*, v.16; n.1, jan, p. 42 - 48.
- 41) MILLS, A. A.; HURST, A. W.(1981). A piezoceramic fine-movement control, Apparatus and Techniques, v. 14; jun.

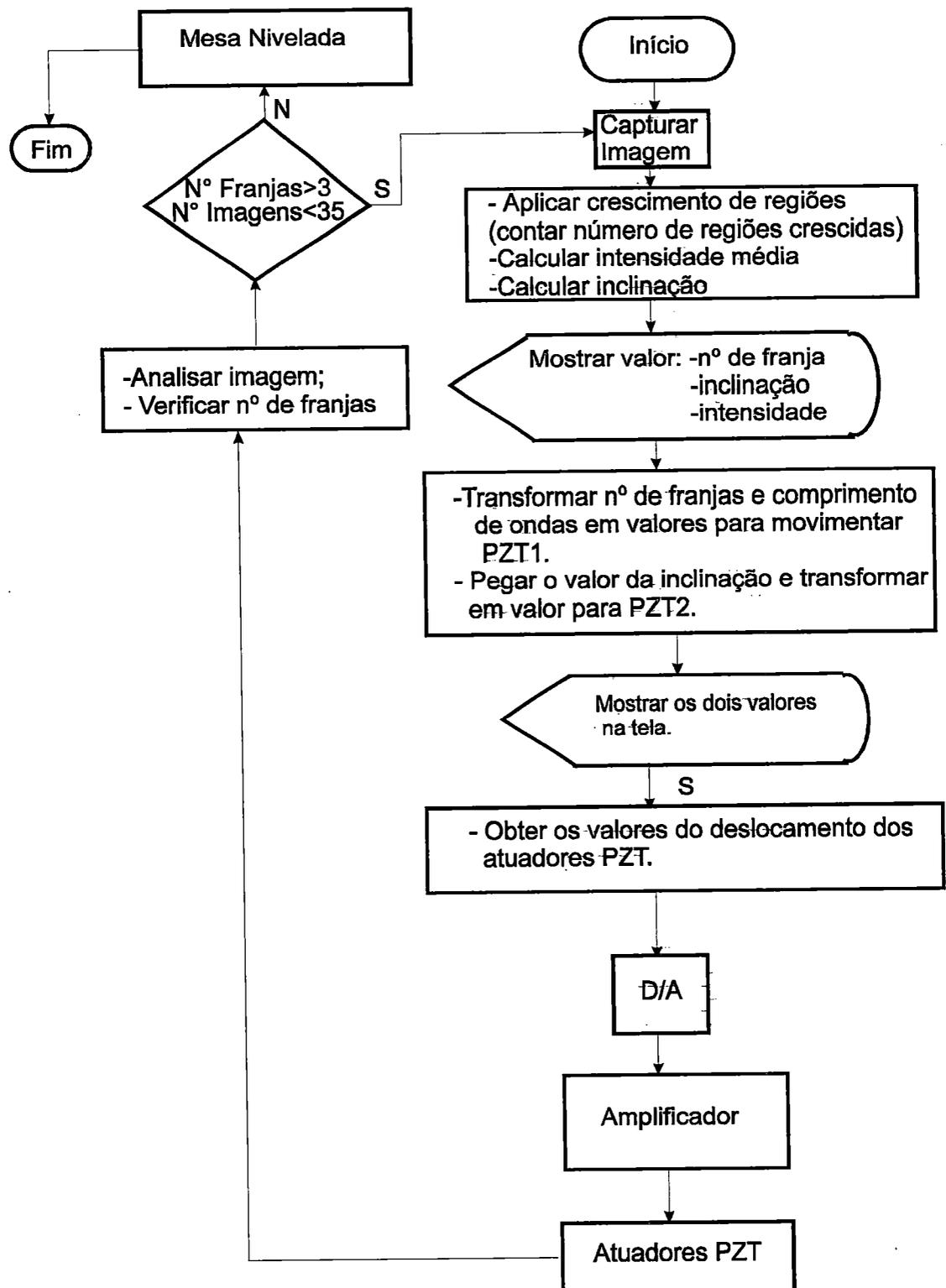
- 42) MIZUNO, H.; FLYNN, K. (1990). Trabalho "MOA-MSc Course in Metrology and Quality Assurance and CAMS- MSc Course in Computer Applications in Management Science". Cranfield. p.1.30.
- 43) MIZUTANI, K.; KAWANO, T.; TANAKA, Y. (1990). A piezoelectric-drive table and its application to micro-grinding of ceramic materials, PRECISION ENGINEERING, v. 12; n. 4, out, p. 219 - 226.
- 44) MORIYAMA, S. (1991). Precision aspheric generators for off-axis X-ray mirrors and asymmetric aspheric lenses. Proc. of the 6th international Precision Engineering Seminar (IPES6), Braunschweig, W. Germany, mai, p. 243-254.
- 45) NEWCOMB, C. V.; FLINN, I. (1982). Improving the linearity of piezoelectric ceramic actuators, ELECTRONICS LETTERS, v.18; n.11, mai, p. 442 - 443.
- 46) NOMURA, T, et al (1993). Shape measurement of workpiece surface with zone-plate interferometer during machine running, Precision engineering, v.15, p.86-92.
- 47) PALIK, E.D.(1985). Handbook of optical constants of solids. Academic Press INC, p.117.
- 48) PATTERSON, S. R.; MAGRAB, E. B.(1985). Design and testing of a fast tool servo for diamond turning, PRECISION ENGINEERING, v. 7; n. 3, jul, p. 123 - 128.
- 49) PÉREZ, J.P(1984).Optique géométrique et ondulatoire, Masson,4.e., p.279
- 50) PHYSIK INSTRUMENTE (19__). Piezo Guide - piezo positioning technology, p. 5.6 - 5.19.

- 51) PUTTICK, K. E. (1980). The correlation of fracture transmissions. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, v. 13, p. 2249-2262.
- 52) PUTTICK, K. E.; RUDMAN, M. R.; SMITH, K. J.; FRANKS, A.; LINDSEY, K. (1989). Single - point diamond machining of glasses. *Proceeding R. Soc. Lond A.*, v. 426, fev, p. 19 - 30.
- 53) PUTTICK, K. E.; FRANKS, A.(1990). The physics of ductile - brittle machining transitions: single - point theory and experiment. *JSPE*, p. 12 - 16.
- 54) ROAD, L. B.(1984). *Interferogram interpretation and evaluation handbook*, 3.e.Zygo Corporation, p.2-6.
- 55) ROSSI, Bruno.(1973). *Fundamentos de Óptica*, Addison-Wesley, p.137-142
- 56) SIDDAL, G. J.; BALDWIN, R. R. (1984). Developments in laser interferometry for precision sensing. *Precision Engineering*, v. 6; e. 4, p. 175-180.
- 57) SMITH, F.G.; THOMSON, J.H.(1973).*Optics*, John Wiley & Sons, p.1-2.
- 58) STEINMETZ, C. R. (1990). Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometry, *PRECISION ENGINEERING*,v.12, n.1, p. 12-24.
- 59) TANIMURA, Y. (1983). A new differential laser interferometer with a multiplied optical path difference. *Annals Of the CIRP*, v. 32; p. 449-452.
- 60) TANIGUCHI, N. (1983). Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing, *Annals of the CIRP*, v. 32; n. 2, p. 573 - 583.

- 61) TANIGUCHI, N. (1994). The state of the art of nanotechnology for processing of ultraprecision and ultrafine products, *PRECISION ENGINEERING*, v. 16; n.1, jan, p.5 - 24.
- 62) THOMPSON, D. C.; CHRISLOCK, J. L.; NEWTON, L. E. (1982). Development of an inexpensive, high - accuracy diamond turning machine. *PRECISION ENGINEERING*, v. 4; n.2, abr, p. 73 - 77.
- 63) THONSHOFF, H.K.; WULFSBERG, J. P.; KALS, H.J.J.; KONING W; Van LUTTERVELT, C.A. (1988). *Annals of the CIRP*, v.37; e.2, p.611-622.
- 64) TONSHOFF, H.K.; SCHIMIEDEN, W.V.; INASAKI, I.; KONING, W.; SPUR, G. (1990). Abrasive machining of silicon. *Annals of the CIRP.*, v.39; e.2, p.621-635.
- 65) TUCSON, E.E.Road. *User's manual for the WYKO 6000*, 3.e., p.2.1-2.6.
- 66) TSUWA, H. (1979). A personal view of ultra-precision machining in Japan. *Precision Engineering*, p. 39-43.
- 67) WAHLSTROM, E.E.(1969). *Cristalografia Óptica*, John Wiley & Sons, p.29.
- 68) WILLS-MOREN, W. S.; MODJARRAD, H.; READ, R. F. J. (1982). Some aspects of the design and development of a large high precision CNC Diamond turning machine, *Annals of the CIRP*, v. 31; n. 1, p. 409-414.
- 69) WU, S. M.; NI, J. (1989). Precision Machining without Precise Machinery, *Annals of the CIRP*, v.38; p. 533-536.

APÊNDICE I

Fluxograma do Programa para Análise da Imagem Interferométrica

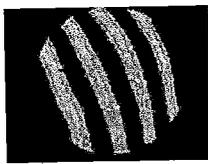


Roteiro para o Teste do Algoritmo

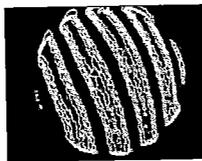
- Fixar a peça no suporte do interferômetro de Fizeau;
- Capturar a imagem no monitor do interferômetro



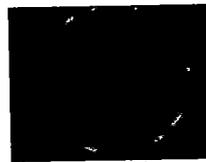
- No microcomputador com o algoritmo, fazer pré-processamento caso seja necessário, utilizando filtros: mediana, Sobel, Robert, Thresholding, etc.



Mediana



Sobel



Robert



Thresholding

- Com o método Crescimento de Regiões, calcular o número de franjas, intensidade média e a inclinação;
- Aplicar o algoritmo e mostrar na tela os seguintes valores obtidos: número de franja, inclinação, intensidade média, os deslocamentos dos atuadores PZT₁, PZT₂ e PZT₃;
- Placa digital/analógica;
- Amplificador;
- Textar os valores obtidos nos atuadores piezoelétricos;
- Analisar a imagem e verificar o número de franjas
- Caso o número de franjas for maior que três e os números de imagens analisadas for menor que trinta e cinco, então capturar nova imagem e recomeçar o programa; e para franjas menor que três e com o números de imagens menor que trinta e cinco , então o programa foi bem sucedido.

Algoritmo

1. Colocar peça;
2. Capturar imagem;
3. Aplicar crescimento de regiões;
4. Calcular número de franjas;
5. Transformar o número de franjas em valores para movimentar os atuadores PZT;
6. Placa digital/analógica;
7. Amplificador
8. Movimentar atuadores PZTs;
9. Analisar nova imagem e verificar o número de franjas;
10. se
11. nº de franjas for >3 e nº de imagens analisadas menor que 35;
12. então capturar outra imagem e recomeçar todo o procedimento;
13. se
14. nº de franjas for < 3 e nº de imagens analisadas menor que 35;
15. então mesa nivelada;
16. fim

Observação: Este fluxograma deverá ser implementado junto com a interface da mesa microposicionadora.

APÊNDICE II

**Programa para Análise da Imagem Interferométrica e Controle dos Atuadores da Mesa
Microposicionadora Angular**

```
unit Main;
```

```
interface
```

```
uses Windows, SysUtils, Classes, Graphics, Forms, Controls, Menus,
    StdCtrls, Printers, Clipbrd, Dialogs, Buttons, Messages, ExtCtrls, ComCtrls, ChildWin,
    Resul, Sobre, Person, Relogio, Tempo, Opcao, hist;
```

```
type
```

```
template_3 = array [-1..1, -1..1] of real;
```

```
template_2 = array [0..1, 0..1] of real;
```

```
Vetor = Array[0..32000] of integer;
```

```
PVetor = ^Vetor;
```

```
const
```

```
V_Media :template_3 = ((1/9, 1/9, 1/9),
    (1/9, 1/9, 1/9),
    (1/9, 1/9, 1/9));
```

```
V_Person :template_3 = ((0, 1, 2),
    (3, 4, 5),
    (6, 7, 8));
```

```
V_Horizontal :template_2 = ((1, 1), (-1, -1));
```

```
V_Vertical :template_2 = ((1, -1), (1, -1));
```

```
V_Ponto :template_3 = ((-1, -1, -1),
    (-1, 8, -1),
    (-1, -1, -1));
```

```
Melhoria_Ponto :template_3 = ((0.75, 0.75, 0.75),
    (0.75, 1, 0.75),
    (0.75, 0.75, 0.75));
```

```
Correcao_Gama :integer = 0;
```

```
Threshold :integer = 0;
```

```
Selecao :Boolean = False;
```

```
type
```

```
TPrincipal = class(TForm)
```

```
    MainMenu1: TMainMenu;
```

```
    File1: TMenuItem;
```

```
    FileNewItem: TMenuItem;
```

```
    FileOpenItem: TMenuItem;
```

```
    FileCloseItem: TMenuItem;
```

```
    Window1: TMenuItem;
```

Help1: TMenuItem;
FileExitItem: TMenuItem;
WindowCascadeItem: TMenuItem;
WindowTileItem: TMenuItem;
WindowArrangeItem: TMenuItem;
HelpAboutItem: TMenuItem;
OpenDialog: TOpenDialog;
FileSaveItem: TMenuItem;
FileSaveAsItem: TMenuItem;
Edit1: TMenuItem;
CutItem: TMenuItem;
CopyItem: TMenuItem;
PasteItem: TMenuItem;
WindowMinimizeItem: TMenuItem;
SpeedPanel: TPanel;
OpenBtn: TSpeedButton;
SaveBtn: TSpeedButton;
CutBtn: TSpeedButton;
CopyBtn: TSpeedButton;
PasteBtn: TSpeedButton;
ExitBtn: TSpeedButton;
StatusBar: TStatusBar;
PrintSetupItem: TMenuItem;
PrintItem: TMenuItem;
Processamento1: TMenuItem;
SegItem: TMenuItem;
ScreenImg: TMenuItem;
SaveDialog1: TSaveDialog;
NovoBtn: TSpeedButton;
SaveAsBtn: TSpeedButton;
SaveAs2Btn: TSpeedButton;
PrinterSetupDialog2: TPrinterSetupDialog;
PrintDialog2: TPrintDialog;
PrintBtn: TSpeedButton;
PrintSetupBtn: TSpeedButton;
HelpContentBtn: TSpeedButton;
HelpAboutBtn: TSpeedButton;
Contedo1: TMenuItem;
N2: TMenuItem;
N3: TMenuItem;
AuxiliarCorrente: TMenuItem;
PrProcessamento1: TMenuItem;
Filtros2: TMenuItem;
DetectoresdeBorda2: TMenuItem;
Mediana2: TMenuItem;

```

Mdia1: TMenuItem;
Personalizar1: TMenuItem;
GradienteDeRoberts1: TMenuItem;
Sobell: TMenuItem;
Horizontal1: TMenuItem;
Vertical1: TMenuItem;
Pontos1: TMenuItem;
Melhoria1: TMenuItem;
Histograma1: TMenuItem;
Equalizao1: TMenuItem;
q1: TMenuItem;
inf1: TMenuItem;
Volta1: TMenuItem;
SpeedButton21: TSpeedButton;
VoltaBtn: TSpeedButton;
MostraResultado1: TMenuItem;
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure FileNewItemClick(Sender: TObject);
procedure WindowCascadeItemClick(Sender: TObject);
procedure UpdateMenuItems(Sender: TObject);
procedure WindowTileItemClick(Sender: TObject);
procedure WindowArrangeItemClick(Sender: TObject);
procedure FileCloseItemClick(Sender: TObject);
procedure FileOpenItemClick(Sender: TObject);
procedure FileExitItemClick(Sender: TObject);
procedure FileSaveItemClick(Sender: TObject);
procedure WindowMinimizeItemClick(Sender: TObject);
procedure FormDestroy(Sender: TObject);
procedure SegItemClick(Sender: TObject);
procedure ScreenImgClick(Sender: TObject);
procedure SaveAs2BtnClick(Sender: TObject);
procedure CutBtnClick(Sender: TObject);
procedure CopyBtnClick(Sender: TObject);
procedure PasteBtnClick(Sender: TObject);
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
procedure PrintSetupItemClick(Sender: TObject);
procedure PrintItemClick(Sender: TObject);
procedure HelpAboutItemClick(Sender: TObject);
procedure HelpContentBtnClick(Sender: TObject);
procedure Personalisar1Click(Sender: TObject);
procedure Mediana1Click(Sender: TObject);
procedure AuxiliarCorrenteClick(Sender: TObject);
procedure Mdia1Click(Sender: TObject);
procedure Horizontal1Click(Sender: TObject);
procedure Vertical1Click(Sender: TObject);

```

```

procedure Pontos1Click(Sender: TObject);
procedure GradientedeRoberts1Click(Sender: TObject);
procedure Melhoria1Click(Sender: TObject);
procedure Sobel1Click(Sender: TObject);
procedure Equalizao1Click(Sender: TObject);
procedure e1Click(Sender: TObject);
procedure q1Click(Sender: TObject);
procedure inf1Click(Sender: TObject);
procedure Volta1Click(Sender: TObject);
procedure Dilao1Click(Sender: TObject);
procedure Eroso1Click(Sender: TObject);
procedure MostraResultado1Click(Sender: TObject);

```

private

```

{ Private declarations }
procedure CreateMDIChild(const Name: string);
procedure ShowHint(Sender: TObject);

```

public

```

ImagemModificada, Marcar, MResul: Boolean;
cor, cont, inicio: integer; {Variáveis de controle da Pilha.}
desloc1, desloc2, desloc3, raio_pecas, inclinacao, comp_onda : real;
VX, VY: Pvetor; {Vetores da pilha.}
Vcores : array[0..255] of longint; {Vetor de cores.}
MaiorX, MaiorY, MenorX, MenorY, {Variáveis para armazenar os }
YMaiorX, XMaiorY, YMenorX, XMenorY, {extremos das regiões.}
NivelMedio : real; {Nível médio da região.}
NumPontos : integer; {Número de pontos da região.}
Dist : array[1..6] of real; {Vetor de distancias.}
Pontos : array[1..6, 1..4] of real;
Ordem : array[1..6] of integer;
inclinacoes : array[1..100] of real;
ni_medio : array[1..100] of real;
cont_franjas : integer;
inclinacao4 : real;
CurrentImage: Integer;
TotPto: integer;

```

```

procedure Cr3 (x,y : integer);
procedure AplicarCr (xs, ys : integer);
procedure Segmentar;
procedure Aplicar_Template_IA (var temp: template_3; descricao:string);
procedure Aplicar_Template (var temp: template_3; descricao :string);
procedure Aplicar_Template_2 (var temp: template_2; descricao :string);

```

```

procedure Ordenar_Vetor (var vetor: array of longint);
procedure iniciar_indicador (descricao : string; margem: integer);
Procedure MostraTempo;
procedure ImgAuxToPr;
procedure ImgPrToAux;
procedure LimpaImgAux;
procedure MostraResultado;

```

```
end;
```

```
var
```

```
Principal: TPrincipal;
```

```
implementation
```

```
{ $R *.DFM }
```

```
{ Descrição : Este procedimento efetua o crescimento de região  
a partir da semente de coordenadas x,y. }
```

```
procedure TPrincipal.Cr3 (x,y : integer);
var xa, ya : integer;
```

```
{ Descrição: Este procedimento adiciona o ponto (x, y) na fila. }
```

```
procedure Adxy (x1, y1 : integer);
```

```
Begin
```

```
  Begin
```

```
    cont := cont + 1;
```

```
    if cont > 32000 then cont := 0;
```

```
    VX^[cont] := x1;
```

```
    VY^[cont] := y1;
```

```
  End;
```

```
End;
```

```
{ Este procedimento salva o ponto atual nos parametros xl, yl. }
```

```
procedure AtPto (var x1, y1 : real);
```

```
Begin
```

```
  xl := xa;
```

```
  yl := ya;
```

```
End;
```

```
Begin
```

```
{ Zera o contador e inicia a fila. }
```

```
cont := 0;
```

```
inicio := -1;
```

```

VX^[cont] := x;
VY^[cont] := y;

{ Enquanto a fila nao estiver vazia faça ... }
while cont <> inicio do
begin
  { Retira o ponto atual da fila. }
  inicio := inicio + 1;
  if inicio > 32000 then inicio := 0;
  xa := VX^[inicio];
  ya := VY^[inicio];

  with ActiveMdiChild as TMDIChild do
  begin
    if (GetRValue(Im1.Canvas.Pixels[xa, ya]) > 30) and
      (GetRValue(Im2.Canvas.Pixels[xa, ya]) = 255) then
    begin
      { Seta a cor do ponto na imagem auxiliar. }
      Im2.Canvas.Pixels[xa, ya] := VCores[cor];
      NumPontos := NumPontos + 1;
      NivelMedio := NivelMedio + GetRValue(Im1.Canvas.Pixels[xa, ya]);
      { Verifica se e' um dos pontos extremos da região. }
      if xa > MaiorX then AtPto (MaiorX, YMaiorX);
      if xa < MenorX then AtPto (MenorX, YMenorX);
      if ya > MaiorY then AtPto (XMaiorY, MaiorY);
      if ya < MenorY then AtPto (XMenorY, MenorY);

      { Adiciona os pontos vizinhos na fila. }
      if cont mod 300 = 0 then Application.ProcessMessages;
      if xa > 0 then AdXY (xa-1, ya);
      if xa < Im1.Width - 1 then Adxy (xa+1, ya);
      if ya > 0 then AdXY (xa, ya-1);
      if ya < Im1.Height - 1 then adXY (xa, ya+1);
    end;
  end;
end;

end;

procedure TPrincipal.AplicarCr (xs, ys : integer);
var i,j,k, auxordem, P3, P4 :integer;
    aux, inclinacao3 : real;
begin
  NumPontos := 0;
  MaiorX := 0;  MaiorY := 0;

```

```

MenorX := 10000; MenorY := 10000;
Cr3(xs,ys);
if numPontos < 100 then
  exit;
if numPontos =0 then numPontos := 1;
NivelMedio := NivelMedio / numPontos;

for i:=1 to 6 do ordem[i] := i;

Pontos [1,1] := maiorX; Pontos [1,2] := YmaiorX;
Pontos [1,3] := XmaiorY; Pontos [1,4] := maiorY;
Pontos [2,1] := maiorX; Pontos [2,2] := YmaiorX;
Pontos [2,3] := XmenorY; Pontos [2,4] := menorY;
Pontos [3,1] := maiorX; Pontos [3,2] := YmaiorX;
Pontos [3,3] := MenorX; Pontos [3,4] := YMenorX;
Pontos [4,1] := MenorX; Pontos [4,2] := YmenorX;
Pontos [4,3] := XmenorY; Pontos [4,4] := menorY;
Pontos [5,1] := MenorX; Pontos [5,2] := YMenorX;
Pontos [5,3] := XmaiorY; Pontos [5,4] := maiorY;
Pontos [6,1] := XmenorY; Pontos [6,2] := MenorY;
Pontos [6,3] := XMaiorY; Pontos [6,4] := MaiorY;

Dist[1] := sqrt(sqr (MaiorX - XMaiorY) + sqr (MaiorY - YMaiorX));
Dist[2] := sqrt(sqr (MaiorX - XMenorY) + sqr (MenorY - YMaiorX));
Dist[3] := sqrt(sqr (MaiorX - MenorX) + sqr (YMenorX - YMaiorX));
Dist[4] := sqrt(sqr (MenorX - XMenorY) + sqr (MenorY - YMenorX));
Dist[5] := sqrt(sqr (MenorX - XMaiorY) + sqr (MaiorY - YMenorX));
Dist[6] := sqrt(sqr (MenorY - MaiorY) + sqr (XMenorY - XMaiorY));

for i:=1 to 5 do
  for j:= 1 to 5 do
    if Dist[j] < Dist[j+1] then
      Begin
        aux:=Dist[j];
        Dist[j]:=Dist[j+1];
        Dist[j+1]:=aux;
        auxordem:=ordem[j];
        ordem[j]:=ordem[j+1];
        ordem[j+1]:=auxordem;
      End;

p3 := ordem[1];
p4 := ordem[4];

```

```

with ActiveMdiChild as TMDIChild do
begin
  Im2.Canvas.Moveto(round (Pontos[p3,1]), round (Pontos[p3,2]));
  Im2.Canvas.Lineto(round (Pontos[p3,3]), round (Pontos[p3,4]));
  Im2.Canvas.Moveto(round (Pontos[p4,1]), round (Pontos[p4,2]));
  Im2.Canvas.Lineto(round (Pontos[p4,3]), round (Pontos[p4,4]));
end;
Inclinacao3 := abs (Pontos[p3, 1] - Pontos[p3, 3]) /
  abs (Pontos[p3, 2] - Pontos[p3, 4]);
Inclinacao4 := abs (Pontos[p4, 1] - Pontos[p4, 3]) /
  abs (Pontos[p4, 2] - Pontos[p4, 4]);

end;

```

```

procedure TPrincipal.Segmentar;
var i,j, conti: integer;
Begin
  cont_franjas := 0;
  cor := 0;
  conti:= 0;
  with ActiveMdiChild as TMDIChild do
  begin
    Iniciar_indicador ('Segmentação p/ Cresc.Região', 1);
    for i:=0 to Im2.Width -1 do
      begin
        for j := 0 to Im2.Height -1 do
          Im2.Canvas.Pixels[i,j] := RGB (255, 255, 255);
          Application.ProcessMessages;
          FRelogio.indicador.progress := conti + i;
        end;

        for i:=0 to Im1.Width -1 do
          begin
            for j := 0 to Im1.Height -1 do
              begin
                if (GetRValue(Im1.Canvas.Pixels[i,j]) > 30) and
                  (GetRValue(Im2.Canvas.Pixels[i,j]) = 255) then
                  begin
                    cor := cor + 1;
                    if cor > 255 then cor :=0;
                    AplicarCr(i,j);
                    if NumPontos > 500 then

```

```

begin
    cont_franjas := cont_franjas + 1;
    {para ignorar ruido na contagem das franjas}
    if cont_franjas > 100 then cont_franjas := 0;
        inclinacoes[cont_franjas] := inclinacao4;
        ni_medio[cont_franjas] := NivelMedio;
    end;

    end;
end;
Application.ProcessMessages;
FRelogio.indicador.progress := conti + i;
screen.cursor := crDefault;
ImagemModificada := True;

end;
end;
end;
{===}

```

```

procedure TPrincipal.FormCreate(Sender: TObject);
var i : integer;
begin
    Application.OnHint := ShowHint;
    Screen.OnActiveFormChange := UpdateMenuItems;
    CurrentImage:= 1;
    New (VX);
    New (VY);
    TotPto:= 0;

    ImagemModificada := FALSE;
    ScreenImg.Enabled := false;
    AuxiliarCorrente.Enabled := false;
    MostraResultado1.Enabled := false;
    MResul := False;

    for i:=0 to 63 do
        begin
            Vcores [i*4] := RGB (i+128, 0, 0);
            Vcores [i*4+1] := RGB (0, i+128, 0);
            Vcores [i*4+2] := RGB (0, 0, i+128);
            Vcores [i*4+3] := RGB (i+128, i+128, 0);
        end;
    Volta1.Enabled := false;

```

```

    VoltaBtn.Enabled := false;

end;

procedure TPrincipal.ShowHint(Sender: TObject);
begin
    StatusBar.SimpleText := Application.Hint;
end;

procedure TPrincipal.CreateMDIChild(const Name: string);
var
    Child: TMDIChild;
    i: integer;
begin
    { create a new MDI child window }
    Child := TMDIChild.Create(Application);
    Child.Caption := Name;

    { Application.OnHint := ShowHint;
    New (VX);
    New (VY);

    for i:= 0 to 63 do
        begin
            Vcores [i*4] := RGB (i+128, 0, 0);
            Vcores [i*4+1] := RGB (0, i+128, 0);
            Vcores [i*4+2] := RGB (0, 0, i+128);
            Vcores [i*4+3] := RGB (i+128, i+128, 0);
        end;
    }
end;

procedure TPrincipal.FileNewItemClick(Sender: TObject);
begin
    CreateMDIChild('imagem' + IntToStr(MDIChildCount + 1));
end;

procedure TPrincipal.FileOpenItemClick(Sender: TObject);
begin
    { Se o usuario escolheu um arquivo ...}
    if OpenFileDialog.Execute then
        begin
            { Cria uma nova janela filha .}
            CreateMdiChild (OpenDialog.FileName);
            { Carrega o arquivo para o bitmap. }
        end;
    end;
end;

```

```

with ActiveMdiChild as TMDIChild do
begin
  Im1.picture.loadfromfile (OpenDialog.FileName);
  {Para voltar a imagem depois}
  Volta.height:= im1.height;
  Volta.width:= im1.width;
  Volta.left:= im1.width + 20;
  Volta.top:= im1.top;
  Volta.visible:= false;
  volta.canvas.draw (0, 0, Im1.picture.bitmap);
end
end;
end;

procedure TPrincipal.FileCloseItemClick(Sender: TObject);
begin
  if ActiveMDIChild <> nil then
    ActiveMDIChild.Close;
end;

procedure TPrincipal.FileSaveItemClick(Sender: TObject);
var componente :TImage;
begin
  with ActiveMdiChild as TMDIChild do
  begin
    {if CurrentImage = 1 then}
    if imagemModificada = False then
      Im1.picture.savetofile (OpenDialog.FileName)
    else
      if SaveDialog1.Execute then
        begin
          Im1.picture.savetofile(SaveDialog1.FileName);
          ActiveMdiChild.caption := SaveDialog1.FileName;
        end;
      end;
    end;
    ImagemModificada:=False;
  end;
end;

procedure TPrincipal.FileExitItemClick(Sender: TObject);
begin
  Close;
end;

procedure TPrincipal.WindowCascadeItemClick(Sender: TObject);
begin

```

```
Cascade;
end;
```

```
procedure TPrincipal.WindowItemClick(Sender: TObject);
begin
  Tile;
end;
```

```
procedure TPrincipal.WindowArrangeItemClick(Sender: TObject);
begin
  ArrangeIcons;
end;
```

```
procedure TPrincipal.WindowMinimizeItemClick(Sender: TObject);
var
  I: Integer;
begin
  { Must be done backwards through the MDIChildren array }
  for I := MDIChildCount - 1 downto 0 do
    MDIChildren[I].WindowState := wsMinimized;
end;
```

```
procedure TPrincipal.UpdateMenuItems(Sender: TObject);
begin
  FileCloseItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
  FileSaveItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
  FileSaveAsItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
  PrintItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
  PrintBtn.Enabled := MDIChildCount > 0;
  CutItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
  CopyItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
  PasteItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
  {ScreenImg.Enabled := MDIChildCount > 0;}
  SegItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
  SaveBtn.Enabled := MDIChildCount > 0;
  SaveAs2Btn.Enabled := MDIChildCount > 0;
  CutBtn.Enabled := MDIChildCount > 0;
  CopyBtn.Enabled := MDIChildCount > 0;
  PasteBtn.Enabled := MDIChildCount > 0;
  FileNewItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
  NovoBtn.Enabled := MDIChildCount > 0;
  Filtros2.Enabled := MDIChildCount > 0;
  DetectoresdeBorda2.Enabled := MDIChildCount > 0;
  Histograma1.Enabled := MDIChildCount > 0;
  SegItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
```



```

WindowCascadeItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
WindowTileItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
WindowArrangeItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
WindowMinimizeItem.Enabled := MDIChildCount > 0;
end;

```

```

procedure TPrincipal.FormDestroy(Sender: TObject);
begin
  Screen.OnActiveFormChange := nil;
end;

```

```

procedure TPrincipal.SegItemClick(Sender: TObject);
var i,j: integer;
    tetha, tan, NivelMedioFranjas, inclinacao : real;
begin
  {Criar uma nova janela (janela filha) para conter a imagem segmentada}
  { CreateMDIChild('Image' + IntToStr(MDIChildCount + 1));}
  with ActiveMdiChild as TMDIChild do
    begin
      Im2.Left := Im1.Width + 20;
      Im2.top := Im1.Top;
      Im2.Height := Im1.Height;
      Im2.Width := Im1.Width;
      Im2.Visible:= True;
    end;

```

```

  {Segmentar Imagem empregando o método de crescimento de região}
  Segmentar;

```

```

NivelMedioFranjas := 0;
for i := 1 to cont_franjas do
  begin
    NivelMedioFranjas := NivelMedioFranjas + ni_medio [i];
    inclinacao := inclinacao + inclinacoes [i];
  end;
NivelMedioFranjas := NivelMedioFranjas / cont_franjas;
inclinacao := inclinacao / cont_franjas;
raio_peca := 45;
tetha := inclinacao + 90;
tan := sin(tetha)/ cos(tetha);
comp_onda := 638.2 * 0.00000001;
desloc1 := 0;
desloc2 := (cont_franjas * comp_onda * (tan + 1))
  / 2 * (sqrt((2 * (1-tan))+ 2 * (tan + 1)));

```

```
desloc3 := (cont_franjas * comp_onda * (1 - tan))
          / 2 * (sqrt((2 * (1-tan)+ 2 * (tan + 1))));
```

```
Resultados.R_franjas.text:= FloatToStr(cont_franjas);
Resultados.R_inclinacao.text:= FloatToStr(inclinacao);
Resultados.R_intensidade.text:= FloatToStr(NivelMedioFranjas);
Resultados.R_desloc1.text:= FloatToStr(desloc1);
Resultados.R_desloc2.text:= FloatToStr(desloc2);
Resultados.R_desloc3.text:= FloatToStr(desloc3);
  AuxiliarCorrente.Enabled := True;
Resultados.showmodal;
ScreenImg.Enabled := True;
AuxiliarCorrente.Enabled := True;
MostraResultado1.Enabled := True;
MResul := True;
end;
```

```
procedure TPrincipal.MostraResultado;
begin
```

```
end;
```

```
procedure TPrincipal.ScreenImgClick(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
  LimpaImgAux;
```

```
  screen.cursor := crDefault;
```

```
  ImagemModificada := True;
```

```
  with ActiveMdiChild as TMDIChild do
```

```
    begin
```

```
      Im2.visible := false;
```

```
    end;
```

```
  ScreenImg.Enabled := false;
```

```
  AuxiliarCorrente.Enabled := false;
```

```
  MostraResultado1.Enabled:= false;
```

```
  MResul := False;
```

```
end;
```

```
procedure TPrincipal.SaveAs2BtnClick(Sender: TObject);
```

```
var componente : Timage;
```

```
begin
```

```
  if (MdiChildCount > 0) then
```

```
    if SaveDialog1.Execute then
```

```
      begin
```

```
        componente := ActiveMdiChild.FindComponent('Im1') As TImage;
```

```
        { Salva o bitmap em disco. }
```

```

        componente.Picture.bitmap.SaveToFile (SaveDialog1.FileName);
        ActiveMdiChild.caption := SaveDialog1.FileName;
    end;
end;

procedure TPrincipal.CutBtnClick(Sender: TObject);
var
    ARect: TRect;
begin
    with ActiveMdiChild as TMDIChild do
        begin
            Clipboard.Assign (Im1.Picture);
            with Im1.canvas do
                begin
                    { copy everything as white }
                    CopyMode := cmWhiteness;
                    { get bitmap rectangle }
                    ARect := Rect(0, 0, Im1.Width, Im1.Height);
                    { copy bitmap over itself }
                    CopyRect(ARect, Im1.Canvas, ARect);
                    { restaura modo normal}
                    CopyMode := cmSrcCopy;
                end;
            end;
        end;
    end;

end;

procedure TPrincipal.CopyBtnClick(Sender: TObject);
begin
    with ActiveMdiChild as TMDIChild do
        begin
            Clipboard.Assign (Im1.Picture)
        end;
    end;
end;

procedure TPrincipal.PasteBtnClick(Sender: TObject);
var
    Bitmap: TBitmap;
begin
    with ActiveMdiChild as TMDIChild do
        begin
            if Clipboard.HasFormat(CF_BITMAP) then { check to see if there is a picture }
                begin
                    Bitmap := TBitmap.Create;    {Create a bitmap to hold
                                                the contents of the Clipboard}
                end;
        end;
    end;
end;

```

```

try
  Bitmap.Assign(Clipboard); {get the bitmap off the clipboard using Assign}
  im1.picture.bitmap.height := bitmap.height;
  im1.picture.bitmap.width := bitmap.width;
  im1.height := bitmap.height;
  im1.width := bitmap.width;
  Im1.Canvas.Draw(0, 0, Bitmap);    {copy the bitmap to the Image}
finally
  Bitmap.Free;
end;
end;
end;
end;

procedure TPrincipal.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
  Dispose (VY);
  Dispose (VX);
end;

procedure TPrincipal.PrintSetupItemClick(Sender: TObject);
begin
  { Chamar quadro de diálogo para configurar a impressora }
  PrinterSetupDialog2.Execute;
end;

procedure TPrincipal.PrintItemClick(Sender: TObject);
var r :Trect;
begin
  with ActiveMdiChild as TMDIChild do
    begin
      if PrintDialog2.Execute then
        begin
          r := rect (0,0, Im1.width * 5, Im1.Height* 5);
          Printer.BeginDoc;    { inicia impressão }
          Printer.Canvas.StretchDraw(r, Im1.Picture.Bitmap);
          Printer.EndDoc;     { finaliza impressão }
        end;
      end
    end;
end;

procedure TPrincipal.HelpAboutItemClick(Sender: TObject);
begin
  { Exibir quadro de diálogo sobre. }
  HelpAbout.showmodal;
end;

```

end;

```
procedure TPrincipal.HelpContentBtnClick(Sender: TObject);
begin
  Application.helpfile := 'd:\usuarios\mar\progs\cgii\help\help.hlp';
  Application.HelpCommand(HELP_CONTENTS, 0);
end;
```

```
procedure TPrincipal.Personalizar1Click(Sender: TObject);
```

```
var
```

```
  i,j : integer;
```

```
begin
```

```
  for i:=1 to 3 do
```

```
    for j:=1 to 3 do
```

```
      mascara[i,j] := V_person[i-2, j-2];
```

```
  F_Personalizar.ShowModal;
```

```
  if (result_masc = 1) then
```

```
  begin
```

```
    for i:=1 to 3 do
```

```
      for j:=1 to 3 do
```

```
        V_person[i-2, j-2] := mascara[i,j];
```

```
  aplicar_template (V_Person, 'Filtro Personalizado');
```

```
  screen.cursor := crDefault;
```

```
  ImagemModificada := True;
```

```
end;
```

```
Volta1.Enabled := True;
```

```
VoltaBtn.Enabled := True;
```

end;

```
procedure TPrincipal.Aplicar_Template (var temp: template_3;
                                       descricao:string);
```

```
begin
```

```
  with ActiveMdiChild as TMDIChild do
```

```
  begin
```

```
    Im2.Left := Im1.Width + 20;
```

```
    Im2.top := Im1.Top;
```

```
    Im2.Height := Im1.Height;
```

```
    Im2.Width := Im1.Width;
```

```
    Im2.Picture.Bitmap.Height := Im1.Height;
```

```
    Im2.Picture.Bitmap.Width := Im1.Width;
```

```
    Im2.canvas.draw (0, 0, Im1.picture.bitmap);
```

```

Im2.Visible:= false;
Aplicar_Template_IA (temp, descricao);
screen.cursor := crDefault;
ImagemModificada := True;
end;
end;
procedure TPrincipal.Aplicar_Template_IA (var temp: template_3;
                                          descricao:string);
Var i,j, k,l :integer;
    aux      :longint;
    contr    :real;
begin
with ActiveMdiChild as TMDIChild do
begin
    Iniciar_Indicador (descricao, 0);
    for i:= 0 to im1.height -1 do
        begin
            for j := 0 to im1.width -1 do
                begin
                    contr := 0;
                    for k:= -1 to 1 do
                        for l:=-1 to 1 do
                            begin
                                aux := im2.canvas.pixels[j+l,i+k];
                                contr := contr + ((aux and 255) * temp[k,l]);
                            end;
                        if (contr > 255) then contr := 255;
                        if (contr < 0) then contr := 0;
                        {consistencias extras}
                        if i = 0 then contr := 0;
                        if j = 0 then contr := 0;
                        if i = im1.height -1 then contr := 0;
                        if j = im1.width -1 then contr := 0;
                        {}
                        im1.canvas.pixels[j,i] := RGB(round(contr),
                                                    round(contr),round(contr))

                            end;
                    end;
                    Application.ProcessMessages;
                    FRelogio.indicador.progress := i;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;
procedure TPrincipal.Aplicar_Template_2 (var temp: template_2;

```

```

                                descricao :string);
Var i,j, k,l :integer;
    aux      :longint;
    contr    : real;
begin
with ActiveMdiChild as TMDIChild do
begin
    im2.height := im1.height;
    im2.width  := im1.width;
    im2.left:= im1.width + 20;
    im2.top:= im1.top;
    im2.canvas.draw (0, 0, im1.picture.bitmap);
    im2.visible := false;
    Iniciar_Indicador (descricao, 0);
    for i:= 0 to im2.height -1 do
    Begin
        for j := 0 to im2.width -1 do
        Begin
            contr := 0;
            for k:= 0 to 1 do
                for l:=0 to 1 do
                Begin
                    aux := im2.canvas.pixels[j+l,i+k];
                    contr := contr + (GetRValue (aux) * temp[k,l]);
                End;
            if (contr > 255) then contr := 255;
            if (contr < 0) then contr := 0;
            im1.canvas.pixels[j,i] := PaletteRGB (round(contr),
                round(contr), round(contr));
        end;
        Application.ProcessMessages;
        FRelogio.indicador.progress := i;
    end;
    screen.cursor := crDefault;
    ImagemModificada := True;
end;
end;

procedure TPrincipal.iniciar_indicador (descricao : string; margem: integer);
Begin
with ActiveMdiChild as TMDIChild do
begin
    if (FOpcao.CB_Progresso.Checked = True) then
    begin
        screen.cursor := crHourGlass;
    end;
end;
end;

```

```

with FRelogio do
begin
    indicador.maxvalue := im1.height- (2 + margem);
    indicador.minvalue := margem;
    indicador.progress := 0;
    descritor.caption := descricao;
    timer1.enabled := True;
    Show;
end;
end;
end;
end;

```

```

Procedure TPrincipal.MostraTempo;
begin
    F_tempo.P_Depois.Caption := TimeToStr (Time);
    F_tempo.Show;
end;

```

```

procedure TPrincipal.ImgAuxToPr;
begin
    with ActiveMdiChild as TMDIChild do
    begin
        im1.height := im2.height;
        im1.width := im2.width;

        im1.canvas.draw (0, 0, im2.picture.bitmap);
    end;
end;

```

```

procedure TPrincipal.ImgPrToAux;
begin
    with ActiveMdiChild as TMDIChild do
    begin
        im2.height := im1.height;
        im2.width := im1.width;
        im2.left := im1.width + 20;
        im2.top := im1.top;
        im2.canvas.draw (0, 0, im1.picture.bitmap);
    end;
end;

```

```

procedure TPrincipal.LimpaImgAux;
var i, j: integer;
    descricao : String;

```

```

begin
  cor := 0;

  with ActiveMdiChild as TMDIChild do
    begin
      descricao:= 'Apagando Imagem Auxiliar';
      Iniciar_Indicador (descricao, 0);
      Im2.Left := Im1.Width + 20;
      Im2.top := Im1.Top;
      Im2.Height := Im1.Height;
      Im2.Width := Im1.Width;
      Im2.Picture.Bitmap.Height := Im1.Height;
      Im2.Picture.Bitmap.Width := Im1.Width;
      for i:=0 to Im2.Width -1 do
        begin
          for j := 0 to Im2.Height -1 do
            Im2.Canvas.Pixels[i,j] := RGB (192, 192, 192);
            Application.ProcessMessages;
            FRelogio.indicador.progress := i;
            ImagemModificada := True;
          end;
          Im2.Visible:= false;
          screen.cursor := crDefault;
        end;
      end;
    end;

  procedure TPrincipal.Mediana1Click(Sender: TObject);
  var
    i,j :integer;
    vetor : array [1..10] of longint;
  begin
    with ActiveMdiChild as TMDIChild do
      begin
        im2.height := im1.height;
        im2.width := im1.width;
        im2.left := im1.width + 20;
        im2.top:= im1.top;
        {Aguarda imagem original copiando-a para a imagem auxiliar}
        im2.canvas.draw (0, 0, im1.picture.bitmap);
        {Deixa imagem auxiliar invisivel}
        im2.visible:= false;

        Iniciar_indicador ('Processamento da Mediana', 1);

        for i:= 1 to im2.height - 2 do

```

```

begin
  for j := 1 to im2.width - 2 do
    begin
      vetor[1] := im2.canvas.pixels[j-1, i-1];
      vetor[2] := im2.canvas.pixels[j, i-1];
      vetor[3] := im2.canvas.pixels[j+1, i-1];
      vetor[4] := im2.canvas.pixels[j-1, i];
      vetor[5] := im2.canvas.pixels[j, i];
      vetor[6] := im2.canvas.pixels[j+1, i];
      vetor[7] := im2.canvas.pixels[j-1, i+1];
      vetor[8] := im2.canvas.pixels[j, i+1];
      vetor[9] := im2.canvas.pixels[j+1, i+1];
      Ordenar_Vetor (vetor);
      Im1.canvas.pixels[j, i] := vetor[5];
    end;
    Application.ProcessMessages;
    FRelogio.indicador.progress := i;
  end;
  screen.cursor := crDefault;
  ImagemModificada := True;
end;
Volta1.Enabled := True;
VoltaBtn.Enabled := True;

end;

procedure TPrincipal.Ordenar_Vetor (var vetor: array of longint);
var
  i,j: integer;
  aux: longint;
begin
  for i := 1 to 8 do
    for j := i to 8 do
      if (vetor[j] > vetor[j+1])then
        begin
          aux := vetor[j];
          vetor[j] := vetor[j+1];
          vetor[j+1] := aux;
        end;
      end;
    end;
  end;

end;

procedure TPrincipal.AuxiliarCorrenteClick(Sender: TObject);
begin
  with ActiveMdiChild as TMDIChild do

```

```
begin
  im3.height := im2.height;
  im3.width := im2.width;
  im3.left := im2.width + 20;
  im3.top := im2.top;
  im2.visible := true;
  {Aguarda imagem original copiando-a para a imagem auxiliar}
  im3.canvas.draw (0, 0, im1.picture.bitmap);
  im1.canvas.draw (0, 0, im2.picture.bitmap);
  im2.canvas.draw (0, 0, im3.picture.bitmap);
  CurrentImage := 0;
end;

end;

procedure TPrincipal.Mdia1Click(Sender: TObject);
begin
  Aplicar_Template (V_Media, 'Processando a Média');
  Volta1.Enabled := True;
  VoltaBtn.Enabled := True;
end;

procedure TPrincipal.Horizontal1Click(Sender: TObject);
begin
  Aplicar_template_2 (V_Horizontal, 'Detecção Horizontal');
  Volta1.Enabled := True;
  VoltaBtn.Enabled := True;
end;

procedure TPrincipal.Vertical1Click(Sender: TObject);
begin
  Aplicar_Template_2 (V_Vertical, 'Detecção Vertical');
  Volta1.Enabled := True;
  VoltaBtn.Enabled := True;
end;

procedure TPrincipal.Pontos1Click(Sender: TObject);
begin
  Aplicar_Template (V_ponto, 'Detecção de Pontos');
  Volta1.Enabled := True;
  VoltaBtn.Enabled := True;
```

end;

```
procedure TPrincipal.GradientedeRoberts1Click(Sender: TObject);
```

```
var i,j, somador, somador2 : integer;
```

```
    aux : longint;
```

```
begin
```

```
    with ActiveMdiChild as TMDIChild do
```

```
        begin
```

```
            Iniciar_indicador ('Melhoria de Borda', 1);
```

```
            im2.width := im1.width;
```

```
            im2.height := im1.height;
```

```
            im2.canvas.draw (0, 0, im1.picture.bitmap);
```

```
            im2.visible:= false;
```

```
            for i:= 0 to im2.height -2 do
```

```
                begin
```

```
                    for j:= 0 to Im2.width -2 do
```

```
                        begin
```

```
                            aux := im2.canvas.pixels[j,i];
```

```
                            somador := GetRValue(aux);
```

```
                            aux := im2.canvas.pixels[j+1,i];
```

```
                            somador := abs (somador - GetRValue(aux));
```

```
                            aux := im2.canvas.pixels[j,i];
```

```
                            somador2 := GetRValue(aux);
```

```
                            aux := im2.canvas.pixels[j,i+1];
```

```
                            somador2 := abs (somador2 - GetRValue(aux));
```

```
                            somador := somador + somador2;
```

```
                            if somador > 255 then somador := 255;
```

```
                            if somador < 0 then somador := 0;
```

```
                            im1.canvas.pixels[j,i] := RGB (somador, somador, somador);
```

```
                        end;
```

```
                        Application.ProcessMessages;
```

```
                        FRelogio.indicador.progress := i;
```

```
                    end;
```

```
                    screen.cursor := crDefault;
```

```
                    ImagemModificada := True;
```

```
                end;
```

```
                Volta1.Enabled := True;
```

```
                VoltaBtn.Enabled := True;
```

```
end;
```

```
procedure TPrincipal.Melhoria1Click(Sender: TObject);
```

```
var i,j, cor, somador : integer;
```

```
    aux : longint;
```

```

begin
  with ActiveMdiChild as TMDIChild do
    begin
      Iniciar_indicador ('Melhoria de Borda', 1);
      im2.width := im1.width;
      im2.height := im1.height;
      im2.canvas.draw (0, 0, im1.picture.bitmap);
      im2.visible:= false;
      for i:= 0 to im2.height -2 do
        begin
          for j := 0 to im2.width -2 do
            begin
              aux := im2.canvas.pixels[j+1,i];
              cor := aux and 255;
              somador := (-2) * cor;
              aux := im2.canvas.pixels[j,i+1];
              cor := aux and 255;
              somador := somador + 2 * cor;
              if somador > 255 then somador := 255;
              if somador < 0 then somador := 0;
              im1.canvas.pixels[j,i] := RGB (somador, somador, somador);
            end;
            Application.ProcessMessages;
            FRelogio.indicador.progress := i;
          end;
          screen.cursor := crDefault;
          ImagemModificada := True;
        end;
        Volta1.Enabled := True;
        VoltaBtn.Enabled := True;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

procedure TPrincipal.Sobel1Click(Sender: TObject);
var i,j, somador, somador2 : integer;
begin
  with ActiveMdiChild as TMDIChild do
    begin
      Iniciar_indicador ('Aplicando Sobel', 1);
      Im2.left := im1.width + 20;
      Im2.top := im1.top;
      Im2.width := im1.width;
      Im2.height := im1.height;
      Im2.visible := false;
    end;
  end;
end;

```

```

Im2.canvas.draw (0, 0, Im1.picture.bitmap);
for i:= 0 to im2.height -2 do
begin
for j := 0 to im2.width -2 do
begin
somador := - GetRValue (im2.canvas.pixels[j-1,i-1]);
somador :=somador - 2 * GetRValue (im2.canvas.pixels[j,i-1]);
somador :=somador - GetRValue (im2.canvas.pixels[j+1,i-1]);
somador :=somador + GetRValue (im2.canvas.pixels[j-1,i+1]);
somador :=somador + 2 * GetRValue (im2.canvas.pixels[j,i+1]);
somador :=somador + GetRValue (im2.canvas.pixels[j+1,i+1]);
somador := abs(somador);
somador2 := - GetRValue (im2.canvas.pixels[j-1,i-1]);
somador2 :=somador2 - 2 * GetRValue (im2.canvas.pixels[j-1,i]);
somador2 :=somador2 - GetRValue (im2.canvas.pixels[j-1,i+1]);
somador2 :=somador2 + GetRValue (im2.canvas.pixels[j+1,i-1]);
somador2 :=somador2 + 2 * GetRValue (im2.canvas.pixels[j+1,i]);
somador2 :=somador2 + GetRValue (im2.canvas.pixels[j+1,i+1]);
somador := somador + abs(somador2);
if somador > 255 then somador := 255;
if somador < 0 then somador := 0;
if (i=0) or (i=im2.height -2) or
(j=0) or (j=im2.width -2) then somador := 0;
Im1.canvas.pixels[j,i] := RGB (somador, somador, somador);
end;
Application.ProcessMessages;
FRelogio.indicador.progress := i;
end;
screen.cursor := crDefault;
ImagemModificada := True;
end;
Volta1.Enabled := True;
VoltaBtn.Enabled := True;

end;

procedure TPrincipal.Equalizao1Click(Sender: TObject);
var
NovoHist, histograma : Array [0..255] of longint;
media, somador : real;
i,j, k,l, cor, jan: integer;
begin
with ActiveMdiChild as TMDIChild do
begin
jan := 8;

```

```

media := sqr (jan * 2) / 255;
media := Trunc (Media);

Iniciar_indicador ('Operacao de Equalizacao Local', 0);
for i:=0 to im1.height - 1 do
begin
Application.ProcessMessages;
FRelogio.indicador.progress := i;

for j := 0 to im1.width - 1 do
begin
for k:=0 to 255 do histograma[k] := 0;
for k := i - jan to i + jan do
for l := j - jan to j + jan do
begin
cor := GetRValue(Im1.Canvas.Pixels[l,k]);
histograma[cor] := histograma[cor] + 1;
end;
cor := GetRValue(Im1.Canvas.Pixels[j,i]);
somador := 0;
k := 0;
while K <= cor do
begin
somador := somador + histograma[k];
k := k + 1;
end;
k:=k-1;
NovoHist[k] := round (somador / media - 1);
if (NovoHist[k] > 255) then NovoHist[k] := 255;
if (NovoHist[k] < 0) then NovoHist[k] := 0;
cor := NovoHist[cor];
im1.canvas.pixels[j,i] := RGB (cor, cor, cor);
end;
end;
end;
screen.cursor := crDefault;
ImagemModificada := True;
Volta1.Enabled := True;
VoltaBtn.Enabled := True;

end;

procedure TPrincipal.e1Click(Sender: TObject);
var
NovoHist : Array [0..255] of longint;

```

```

media, somador, H, L : real;
aux : longint;
j, i, cor : integer;
begin
with (Application.MainForm as TPrincipal).ActiveMdiChild as TMDIChild do
begin
H := im1.height;
L := im1.width;
media := H * L / 255;
media := Trunc (Media);
End;

somador := 0;
for i:=0 to 255 do
Begin
somador := somador + histograma[i];
NovoHist[i] := round (somador / media - 1);
if (NovoHist[i] > 255) then NovoHist[i] := 255;
if (NovoHist[i] < 0) then NovoHist[i] := 0;
end;

Iniciar_indicador ('Histograma', 1);
with (Application.MainForm as TPrincipal).ActiveMdiChild as TMDIChild do
for i:=0 to im1.height -1 do
begin
for j := 0 to im1.width -1 do
begin
aux := im1.canvas.pixels[j,i];
cor := GetRValue (aux);
if (cor < 0) then cor := 0;
if (cor > 255) then cor := 255;
cor := NovoHist[cor];
im1.canvas.pixels[j,i] := PaletteRGB (cor, cor, cor);
end;
Application.ProcessMessages;
FRelogio.indicador.progress := i;
end;

end;

procedure TPrincipal.q1Click(Sender: TObject);
var
aux : longint;
j, i, cor : integer;

```

```
begin
```

```
Iniciar_indicador ('Quantização do Histograma', 1);
with (Application.MainForm as TPrincipal).ActiveMdiChild as TMDIChild do
for i:= 0 to im1.height -1 do
```

```
Begin
```

```
for j := 0 to im1.width -1 do
```

```
begin
```

```
aux := im1.canvas.pixels[j,i];
```

```
cor := GetRValue (aux);
```

```
cor := cor div 64 * 64;
```

```
im1.canvas.pixels[j,i] := PaletteRGB (cor, cor, cor);
```

```
end;
```

```
Application.ProcessMessages;
```

```
FRelogio.indicador.progress := i;
```

```
Volta1.Enabled := True;
```

```
VoltaBtn.Enabled := True;
```

```
end;
```

```
screen.cursor := crDefault;
```

```
ImagemModificada := True;
```

```
end;
```

```
procedure TPrincipal.inf1Click(Sender: TObject);
```

```
Var
```

```
j, i : integer;
```

```
aux : longint;
```

```
cor : byte;
```

```
begin
```

```
FHist.ShowModal;
```

```
ImagemModificada := True;
```

```
Iniciar_indicador ('Binarização', 1);
```

```
with ActiveMdiChild as TMDIChild do
```

```
begin
```

```
for i:= 0 to im1.height -1 do
```

```
begin
```

```
for j := 0 to im1.width -1 do
```

```
begin
```

```
aux := im1.canvas.pixels[j,i];
```

```
cor := GetRValue (aux);
```

```
if (cor < Threshold) then cor := 0 else cor := 255;
```

```
im1.canvas.pixels[j,i] := PaletteRGB (cor, cor, cor);
```

```
end;
```

```
Application.ProcessMessages;
```

```
    FRelogio.indicador.progress := i;
  end;
end;
screen.cursor := crDefault;
ImagemModificada := True;
Volta1.Enabled := True;
VoltaBtn.Enabled := True;

end;

procedure TPrincipal.Volta1Click(Sender: TObject);
begin
  with ActiveMdiChild as TMDIChild do
    begin
      im1.canvas.draw (0, 0, volta.picture.bitmap);
      screen.cursor := crDefault;
      ImagemModificada := True;
      Volta1.Enabled := false;
      VoltaBtn.Enabled := false;
    end;
  end;
end;

procedure TPrincipal.Dilao1Click(Sender: TObject);
begin

  Volta1.Enabled := True;
  VoltaBtn.Enabled := True;

end;

procedure TPrincipal.Eroso1Click(Sender: TObject);
begin
  Volta1.Enabled := True;
  VoltaBtn.Enabled := True;

end;

procedure TPrincipal.MostraResultado1Click(Sender: TObject);
begin
  Resultados.showmodal;
end;

end.
```

APÊNDICE III

Arranjos Mecânicos Propostos para Mesa de Microposicionamento Angular

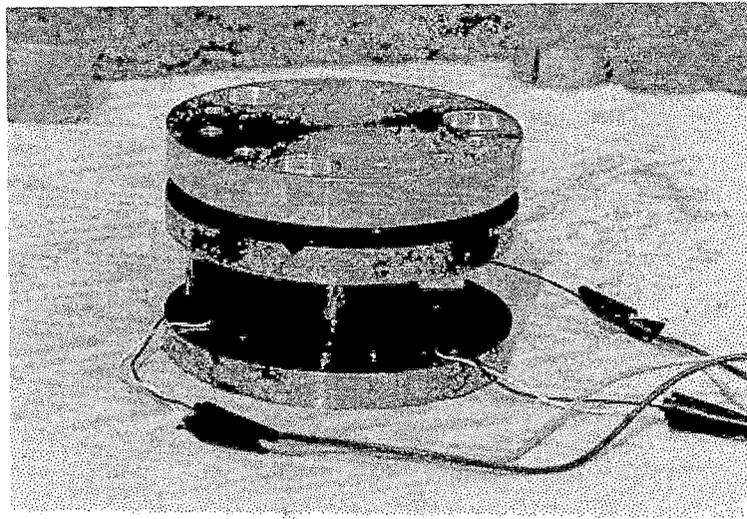
Serão mostrados alguns arranjos mecânicos possíveis. O primeiro foi construído e testado [Mizuno et al, 1990] é seguido de algumas propostas.

O software, método de controle (interferométrico), análise da imagem interferométrica (salvo pequenas modificações no algoritmo) apresentados no próximo item (objetivo desse trabalho) serão os mesmos para qualquer dos arranjos propostos e tipos de atuador.

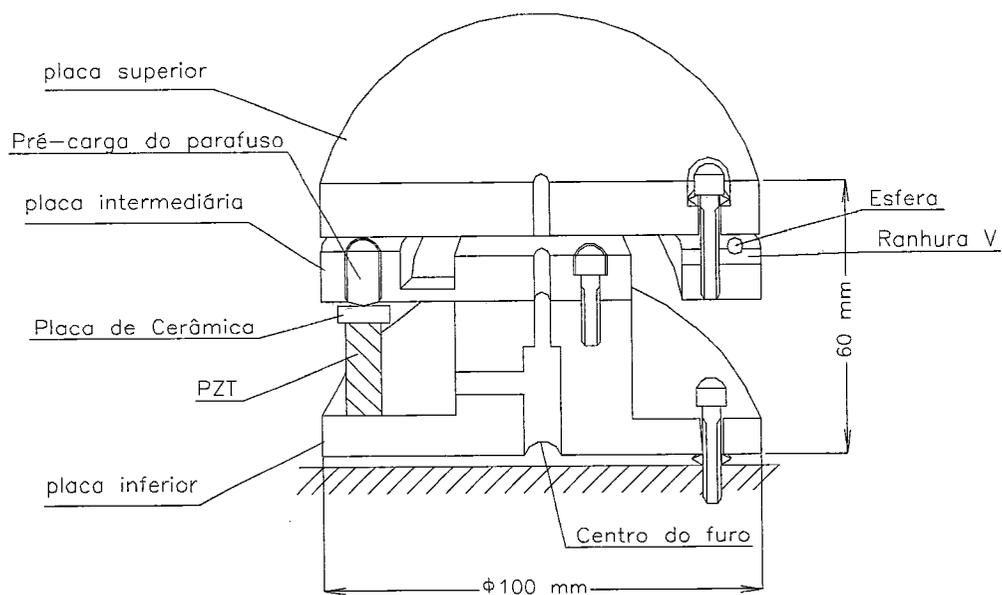
A figura 3.1 mostra a proposta de mesa posicionadora com atuadores piezoelétricos apresentada por Mizuno et al, 1990 em Cranfield. Ela consiste de três camadas e três atuadores piezo-elétricos.

A primeira camada é feita de duralumínio para redução da peso, para fixação da peça. A segunda camada, feita de aço, consiste de um anel exterior, ao qual a primeira camada está conectada. A terceira camada, também feita de aço, comporta os três atuadores piezoelétricos que são colocados sobre a mesma posição radial com a lâmina de mola.

Cada atuador faz com que o anel exterior da segunda camada tenha deslocamento conforme o potencial elétrico aplicado no atuador piezoelétrico. Ademais, há uma placa de cerâmica colocada entre os atuadores e os respectivos parafusos, para prevenir danos aos atuadores. Além disso, três esferas em ranhuras em V, entre a primeira camada e o anel exterior faz com que a primeira camada fique livre de distorções do anel exterior.



(a)



(b)

Figura 3.1 (a) Vista geral da micro inclinação da mesa, (b) Corte da vista da mesa, segundo Mizuno et al, 1990.

Os cabos dos atuadores piezoelétricos serão conectados ao amplificador externo através de anéis de contato deslizantes pelo centro do fuso da mesa.

Um protótipo dessa mesa foi construído e apresentou as seguintes características (tabela 3.1).

| | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| Tamanho | ϕ 100 mm máx. |
| Deslocamento Angular | 6 segundos de arco (ou 6'') |
| Resolução | 0.06 segundos de arco (ou 0.06'') |
| Rigidez | 200 N/ μ m |
| Frequência de Ressonância | 1 kHz |

Tabela 3.1 Especificação da microinclinação

Além da proposta descrita acima, alguns outros projetos de mesa têm sido estudados. Um arranjo, mostrado na figura 3.2, fundamenta-se sobre dois atuadores piezoelétricos, que criam inclinação sobre os dois eixos ortogonais definidos por fendas de dobradiças flexíveis em um único bloco.

Um segundo arranjo, apresentado na figura 3.3, baseia-se em três atuadores piezoelétricos, permitindo três inclinações dispostas simetricamente (a 120°). O movimento de qualquer um dos atuadores, produz inclinação sobre os outros dois atuadores, então pode haver deslocamento do centro do corpo de prova.

Os arranjos de dois e três eixos são discutidos a seguir.

Sistema de dois eixos

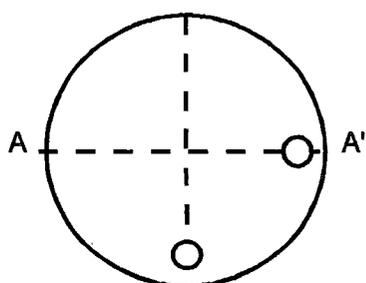
A figura 3.2-a mostra um sistema de dois atuadores e dois eixos for utilizado; dobradiças duplas apresentam boa rigidez em relação às forças ortogonais do eixo, entretanto, a sua disposição apresenta uma estrutura que causa rigidez em relação a inclinação requerida. Sendo suportada somente em um dos extremos, e a metade livre no centro forma um braço de alavanca como mostra a figura 3.2 (b), sendo considerado menos rígido e apresentando baixa frequência natural.

Uma alternativa seria igualar a rigidez de cada lado, empregando um segundo atuador para cada inclinação, compondo um sistema de quatro atuadores como mostra a figura 3.4, e com os atuadores opostos executando os movimentos. Controles alternativos são ambos usados: os atuadores idênticos e sinais de controle inverso ou os atuadores com acionamento de características conjugadas com sinal de entrada comum.

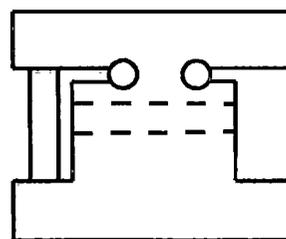
Sistema de três eixos

Embora um sistema de três eixos possa ser construído simplesmente pela montagem da placa sobre três atuadores, e sendo considerada no início insuficientemente rígida para suportar forças ortogonais no eixo da máquina. Foi, utilizado um monólito flexível, consistindo de três lâminas de mola no formato de três braços, como mostra a figura 3.5. Isto é suficiente para ambas inclinações requeridas e pela limitação do movimento axial. [Gee et. al., 1991].

O seu arranjo pode ser dividido em duas partes. Na parte superior estão os atuadores piezo-elétricos que fazem o ajuste fino, enquanto a parte inferior pode ser acionada manualmente obtendo ajuste grosseiro. A parte inferior, é ajustada por três parafusos que estão localizados a 120° distantes do furo roscados na chapa de base. O ajuste grosseiro é obtido rotacionando o parafuso para baixo contra a placa de base, isto impulsiona para cima com o dobro da flexão e permite a mesa inclinar-se no plano X-Y. A superfície pode ser ajustada por três atuadores PZT engastados no bloco de suporte.

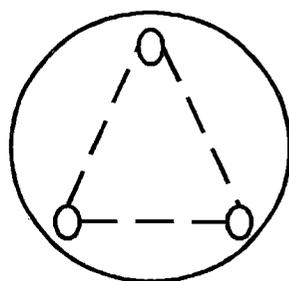
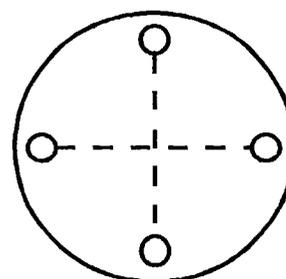
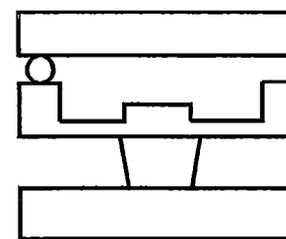
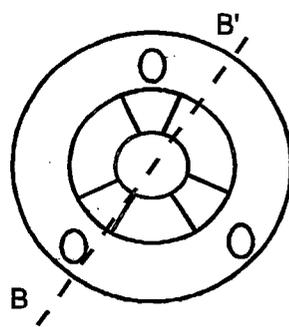


(a) Plano



(b) Seção AA'

Figura 3.2) Dois atuadores, disposição com dois eixos

Figura 3.3)
Elementos com três atuadores,
disposição com três eixosFigura 3.4)
Elementos com quatro atuadores,
disposição com dois eixos

Seção BB'

Figura 3.5)
Projeto de três atuadores, disposição com três eixos