

TÉCNICA OPTO-ELETRÔNICA DE MEDIÇÃO DE GEOMETRIA 3D COM INTERFEROMETRIA DE LUZ NÃO-COERENTE

por

Max Rothe-Neves

**Universidade Federal de Santa Catarina
Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial
Departamento de Engenharia Mecânica
LABMETRO**

(BU)

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Metrologia na Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

Florianópolis, 23 de novembro de 2001

**TÉCNICA OPTO-ELETRÔNICA DE MEDIÇÃO DE GEOMETRIA 3D
COM INTERFEROMETRIA DE LUZ NÃO-COERENTE**

Max Rothe-Neves

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de
“MESTRE EM METROLOGIA”
e aprovada na sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

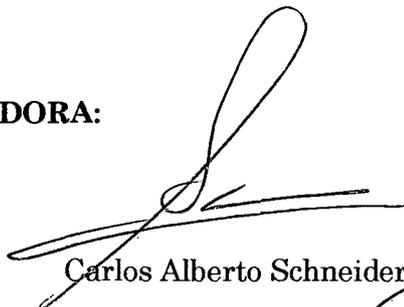


Prof. Frank Hrebabetzky, Dr. Rer. Nat.
Orientador



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

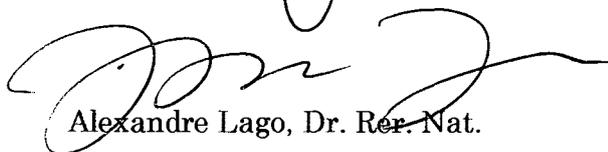
BANCA EXAMINADORA:



Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.



André Roberto de Sousa, Dr. Eng.



Alexandre Lago, Dr. Rer. Nat.

A meus pais.

Agradecimentos

Expresso sinceros agradecimentos:

- ao meu pai que desde o início esteve presente no meu projeto de mestrado contribuindo financeira e emocionalmente para a sua realização;
- à minha mãe, pela energia enviada nas orações e pelas palavras pronunciadas nos momentos mais difíceis;
- à Iva, minha irmã, pelo carinho e atenção;
- ao meu irmão e à sua família, pelo carinho e pela acolhida durante o meu desmaio e estadia em Belo Horizonte;
- à minha super namorada, Isis, que compartilhou comigo: carinho, desespero e força na difícil tarefa de namorar a distância;
- ao Nick, meu amigo e ex-orientador, pela oportunidade de desenvolver pesquisa;
- ao Professor Frank, pela disponibilidade, paciência e orientação aplicadas para o desenvolvimento deste trabalho;
- ao Professor Armando, pela capacidade de gerenciar muitas coisas e ainda ser um exímio educador;
- aos professores do Labmetro, que transmitiram seus conhecimentos de forma clara e objetiva, contribuindo muito para minha formação profissional;
- aos futuros engenheiros, hoje estagiários do Labmetro, pela competência e disposição empregadas na solução de problemas;
- ao Danilo, José Ricardo, Kanda e Milton, pelas contribuições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho;
- aos amigos: Cesare, Sânia, Daniel, Karina, Fred e Prudêncio, pelos bons momentos vividos;
- aos alunos das turmas 1999 e 2000, pelo aprendizado contínuo;

- ao casal Analucia e Pezzota, pelas correções, explicações e sugestões para o trabalho;
- aos futuros doutores: Ribeiro, Sutério e Tiago, por poucas ou muitas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho;
- à Rosana, pela dedicação e profissionalismo com que conduz a secretaria do PósMCI;
- à CAPES, que proporcionou o auxílio financeiro indispensável para a realização deste trabalho;
- à UFSC e ao LABMETRO, pela excelente infra-estrutura disponibilizada;
- aos colaboradores do LABMETRO e da Fundação CERTI, pela amizade e apoio ao trabalho;
- a todas as pessoas que participaram deste processo, mas que a minha memória não recorda.

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	x
Lista de Símbolos	xi
Resumo	xii
Abstract	xiii
Capítulo 1	
Considerações iniciais	1
Capítulo 2	
Fundamento teórico para a medição de geometrias 3D	4
2.1 Interferência	5
2.2 Coerência	6
2.2.1 Coerência temporal	7
2.2.2 Coerência espacial	9
2.3 Princípio de medição	10
Capítulo 3	
Montagem experimental e suas particularidades	15
3.1 Filtros	17
3.2 Componentes para a iluminação	19
3.3 Componentes para capturar as imagens de interferência	22
3.4 Atuadores para o espelho de referência	25
3.4.1 Atuador piezo-elétrico	26
3.4.2 Motor de passo	28
3.5 Algoritmo para medição de geometrias 3D	29
3.5.1 Margem de segurança	30
3.5.2 Metodologia para determinação da altura $z(x, y)$	31
3.6 Geometrias 3D	33

Capítulo 4	
O resultado da medição	40
4.1 Fontes de incerteza.....	41
4.2 Ensaio para otimização do processo de medição	43
4.2.1 Determinação da margem de segurança	45
4.2.2 Reprodutibilidade das medições	46
4.3 Balanço de incertezas	55
Capítulo 5	
Considerações finais	63
Referências	67

Lista de Figuras

Figura 2.1	Franjas coloridas na superfície de medição de um bloco padrão de 21,5 mm.....	4
Figura 2.2	Interferômetro de Michelson mostrando a trajetória de um feixe de luz.....	6
Figura 2.3	Feixe de luz com saltos de fase.....	8
Figura 2.4	(a) Padrão de interferência com luz não-coerente e (b) montagem experimental.....	8
Figura 2.5	Interferômetro de Michelson modificado para medição de geometrias 3D.....	10
Figura 2.6	Objeto 3D.....	11
Figura 2.7	Imagens de interferência na superfície do objeto entre o início e o fim do deslocamento do espelho de referência.....	12
Figura 2.8	Valores de $I(z)$ para um ponto enquanto o espelho de referência é deslocado.....	14
Figura 2.9	Valores de $I(z)$ para os três pontos do objeto 3D enquanto o espelho de referência é deslocado.....	14
Figura 3.1	Montagem experimental do sistema de medição.....	16
Figura 3.2	Visão geral da montagem experimental do sistema de medição.....	16
Figura 3.3	Projeção do filamento da lâmpada de halogênio.....	19
Figura 3.4	Projeção de um objeto para ilustrar a luminância.....	20
Figura 3.5	Campo de visão das lentes (a) convencional e (b) objetiva telecêntrica.....	23
Figura 3.6	Imagens de uma (a) lente convencional e uma (b) lente telecêntrica.....	23
Figura 3.7	Montagem do espelho de referência com seus atuadores.....	26
Figura 3.8	Três ondas esféricas defasadas de (a) 0° , (b) 180° e (c) 360°	27
Figura 3.9	Valores da intensidade em função da tensão de entrada para a calibração do PZT.....	28

Figura 3.10	Valores da intensidade após o motor deslocar um passo.....	29
Figura 3.11	Valores de $I(z)$ medidos enquanto o espelho de referência é deslocado produzindo um correlograma com alto contraste num intervalo igual ao comprimento de coerência.....	30
Figura 3.12	Correlograma com baixo contraste.....	32
Figura 3.13	Fluxograma simplificado do algoritmo utilizado para medição de geometrias 3D.....	33
Figura 3.14	(a) Placa de válvulas e (b) moeda de 1 centavo.....	34
Figura 3.15	Vista isométrica de uma moeda de 1 centavo com diâmetro aproximadamente igual a 20 mm.....	35
Figura 3.16	Representação por cores da moeda de 1 centavo. A escala de cor está associada à altura do objeto.....	36
Figura 3.17	Vista isométrica da região da placa de válvulas.....	36
Figura 3.18	Representação por cores da região da placa de válvulas. A escala de cor está associada à altura do objeto.....	37
Figura 3.19	Vista isométrica da composição de blocos padrão.....	37
Figura 3.20	Pontos detectados durante a medição da geometria 3D da (a) moeda e da (b) composição dos blocos padrão.....	38
Figura 3.21	Pontos detectados durante a medição da geometria 3D da placa de válvulas.....	38
Figura 4.1	Possíveis fontes de incerteza do processo de medição.....	41
Figura 4.2	Imagem da superposição do espelho de referência e de um mensurando.....	42
Figura 4.3	Imagens de interferência na superfície do mensurando em 5 medições independentes. A posição do objeto é alterada para testar a reprodutibilidade da medição.....	44
Figura 4.4	Medição com a margem de segurança igual a 5.....	45
Figura 4.5	Medição com a margem de segurança igual a 14.....	45
Figura 4.6	Medição com a margem de segurança igual a 30.....	46
Figura 4.7	Composição dos blocos padrão. (a) Ilustração das superfícies com suas alturas nominais e (b) a distribuição dos 25 pontos no mensurando.....	47
Figura 4.8	Histerese calculada para cinco pontos da linha y_4	49
Figura 4.9	Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se o sentido de deslocamento do espelho de referência.....	49

Figura 4.10 Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se a posição do mensurando	50
Figura 4.11 Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se o tempo de estabilização da vibração do espelho de referência	50
Figura 4.12 Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se o estado da bancada sob o sistema de medição.....	51
Figura 4.13 Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se a proteção contra variação no índice de refração e reflexões externas	51
Figura 4.14 Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se o comprimento de coerência	52
Figura 4.15 Superfície da tendência em um teste de reprodutibilidade	53
Figura 4.16 Perfil do mensurando	54
Figura 4.17 (a) Superfície inclinada de um bloco padrão de cerâmica e (b) a inclinação corrigida por <i>software</i>	54
Figura 4.18 Superfície do módulo da incerteza expandida compensando os efeitos sistemáticos	61
Figura 4.19 Superfície do módulo da incerteza expandida não compensando os efeitos sistemáticos	62

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Valores de luminância energética e comprimento de coerência para diferentes fontes de luz.....	22
Tabela 3.2	Objetos e especificações da montagem experimental utilizadas para medição de geometrias 3D.....	34
Tabela 4.1	Teste de reprodutibilidade.....	44
Tabela 4.2	Valores da tendência e do desvio padrão experimental no teste de reprodutibilidade deixando fixa a posição do mensurando em todas as medições	48
Tabela 4.3	Erro máximo no teste de reprodutibilidade	52
Tabela 4.4	Dados de calibração do mensurando obtidos através de 3 medições a uma temperatura de $(20,0 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$	56
Tabela 4.5	Planilha de avaliação para o ponto (x_2, y_1)	59
Tabela 4.6	Planilha de avaliação para o ponto (x_2, y_2)	59
Tabela 4.7	Planilha de avaliação para o ponto (x_2, y_4)	60

Lista de Símbolos

A	Amplitude da intensidade de modulação
A_{erro}	Amplitude da intensidade do erro
BP	Incerteza do bloco padrão
BS	Divisor de feixe (<i>Beamsplitter</i>)
C	Contraste de interferência
CCD	Sensor de intensidade luminosa (<i>Charge Coupled Device</i>)
EM	Erro do meio
FM	Espelho fixo (<i>Fixed Mirror</i>)
L_c	Comprimento de coerência da fonte de luz
L_e	Luminância energética da fonte de luz
PZT	Atuador piezo-elétrico
Re	Repetitividade do resultado da medição
RM	Espelho de referência (<i>Reference Mirror</i>)
s	Desvio padrão experimental da amostra
Td	Tendência do resultado da medição
$U_{95\%}$	Incerteza expandida para o nível de confiança de 95%
u_i	Abertura numérica de iluminação
u_o	Abertura numérica de observação
VC	Variação de comprimento
$z(x, y)$	Altura de um ponto no plano (x, y) do mensurando
ΔL	Variação do comprimento devido à temperatura

Resumo

Há na indústria um grande interesse em medir a geometria tridimensional de peças, seja para engenharia reversa ou, principalmente, para controle de qualidade.

O presente trabalho utiliza a interferometria com luz não-coerente para a medição de geometrias 3D. Este é um princípio de medição sem contato que, ao contrário da interferometria a laser, não é limitado pela rugosidade nem pela altura da descontinuidade do objeto.

Baseado no interferômetro de Michelson, as reflexões provenientes de um espelho de referência e do objeto são superpostos num sensor de imagem. Nas partes do objeto que correspondem a caminhos ópticos aproximadamente iguais, a imagem apresenta uma granulação provocada pela interferência. O deslocamento do espelho de referência muda as partes granuladas e a superfície pode ser reconstruída por meio de um processamento matemático.

O sistema de medição construído como uma montagem experimental automatizada foi capaz de medir a geometria de objetos com pequenas dimensões: moedas, placa de válvulas de compressores e blocos padrão; objetos com até 3 cm³ ($x = 3$ cm, $y = 3$ cm, $z = 0,3$ cm), aproximadamente. Os resultados das medições foram avaliados através de testes de reprodutibilidade e a incerteza expandida foi calculada através de planilhas de avaliação. A principal fonte de incerteza foi determinada.

Este trabalho pode servir de base para o desenvolvimento de um protótipo deste sistema de medição no futuro.

Abstract

There is a great interest in industry in measuring the three-dimensional form of parts, either for reverse engineering or, specially, for quality control.

This work uses interferometry with incoherent light for the acquisition of 3D-forms. It is a non contact measurement that, differently of the laser interferometry, is not limited by the roughness nor by height discontinuities of the object.

Based on a Michelson interferometer, the reflections proceeding from a reference mirror and the object are superimposed in a camera sensor. In those parts of the object that correspond to approximately equal optical paths, the picture presents a granulation provoked by the interference. The shift of the reference mirror move the granulated parts and, through a mathematical processing, the surface can be reconstructed.

An automatized bench of the measurement system was able to measure the form of the objects with small dimensions: coins, compressors valves and gauge blocks; or any kind of objects with a maximum size of 3 cm^3 ($x = 3\text{ cm}$, $y = 3\text{ cm}$, $z = 0,3\text{ cm}$), approximately. The results of these measurements were evaluated through reproducibility tests and the expanded uncertainty was calculated through evaluation spread sheets. The main source of uncertainty was determined.

This work may be used for the development of a prototype of this measurement system in a near future.

Capítulo 1

Considerações iniciais

Há na indústria um grande interesse em medir a geometria tridimensional de peças, seja para engenharia reversa ou, principalmente, para controle de qualidade. Atualmente, alguns princípios utilizados para se obter a geometria tridimensional são:

- 1) Apalpação mecânica;
- 2) Projeção de franjas;
- 3) Interferometria a laser.

A apalpação mecânica é um processo que necessita de um operador especializado, ainda que a medição seja automatizada. A medição com apalpador necessita de um ajuste inicial, onde alguns parâmetros como a quantidade de pontos na superfície da peça deve ser informada ao sistema de medição. O tempo de medição é proporcional à quantidade de pontos. Se a quantidade de pontos for elevada, a avaliação da conformidade é beneficiada enquanto que o processo produtivo pode ser prejudicado. A medição por contato, dependendo do material utilizado, pode deformar a peça sob medição. Apesar disso, a incerteza do processo de medição é baixa, o que leva à sua crescente utilização na indústria.

A medição de geometrias 3D pela projeção de franjas pode ser automatizada a ponto de não requerer mão-de-obra especializada. A medição pode ser executada quase que instantaneamente no próprio chão de fábrica, porém a incerteza de medição, se comparada com a apalpação mecânica, é normalmente maior. A medição é feita analisando-se o padrão das franjas na superfície do objeto. Existem algumas restrições, como em todo processo de medição de geometrias 3D, quanto à forma e ao tamanho do objeto. Descontinuidades na superfície do objeto podem ser prejudiciais

à medição pela diferença entre os ângulos de projeção e observação. Pode haver a criação de sombras ou a obstrução do campo de visão, impossibilitando a obtenção de informações em algumas regiões da superfície do objeto. A área de medição é limitada pela tecnologia para a produção de grades finas e pela difração da luz gerada na projeção.

A interferometria a laser apresenta vantagens similares à projeção de franjas quanto à operacionalização e ao tempo de medição. A incerteza de medição associada ao princípio de medição é a menor entre os três [1]. A medição é feita através da combinação de duas frentes de onda, uma proveniente da reflexão do objeto e a outra, uma onda de referência. A superfície é reconstruída a partir da imagem de interferência formada na combinação das ondas. Descontinuidades na superfície do objeto são prejudiciais à medição [2], apesar da mesma direção da iluminação e da observação. Devido a esta direção, o risco na formação de sombras e na obstrução do campo de visão é menor que na projeção de franjas e depende basicamente da geometria do objeto. A descontinuidade deve ser menor que uma certa altura, imposta pelo comprimento de onda do laser, senão um erro pela ambigüidade de fase pode ser gerado. A rugosidade também influencia no resultado da medição devido ao efeito "speckle" [3]. O princípio de medição é extremamente sensível à perturbações, por isso, na maioria dos casos, sua utilização deve ser em um ambiente laboratorial.

Este trabalho utiliza uma técnica de medição de geometrias 3D encontrada na literatura que, ao contrário da interferometria a laser, não é limitada pela rugosidade nem pela altura da descontinuidade na superfície do objeto [4]. Essa técnica, que utiliza a interferometria com luz não-coerente, pode levar a um sistema de medição relativamente de baixo custo, de fácil operação, com tempo de medição dependente apenas da tecnologia empregada, alta resolução lateral (aproximadamente 300.000 pontos) e com baixa incerteza. Esse sistema de medição seria capaz de suprir necessidades atuais da indústria na medição de geometrias 3D, de peças com pequenas dimensões (aproximadamente 125 cm³).

Este trabalho descreve um sistema de medição na forma de uma montagem experimental para a medição de geometrias 3D com interferência de luz não-coerente. Esta montagem funcional e automatizada é capaz de medir a geometria de objetos com pequenas dimensões, como por exemplo: moedas, placa de válvulas de compressores e composição de blocos padrão; objetos com até três centímetros cúbicos, aproximadamente. Ela será utilizada para encontrar problemas tecnológicos potenciais e o desempenho metrológico como base para o desenvolvimento de um protótipo no futuro.

Este trabalho está apresentado da seguinte forma:

A primeira parte deste trabalho, referente ao segundo capítulo, consiste no fundamento teórico utilizado para a medição de geometrias 3D com interferência de luz não-coerente.

O terceiro capítulo apresenta a montagem experimental utilizada para o desenvolvimento do trabalho, onde são abordadas as principais particularidades do sistema de medição. Também constam resultados que demonstram a viabilidade da técnica para a medição de geometrias 3D.

A qualidade do resultado da medição é avaliada no quarto capítulo, onde são listadas possíveis fontes de incerteza do processo de medição. Ensaios para a otimização do processo de medição são aplicados. O balanço de incertezas é desenvolvido utilizando-se planilhas de avaliações e a principal fonte de incerteza do processo é determinada.

O quinto capítulo apresenta as principais conclusões do trabalho, considerando-se a montagem experimental e a avaliação dos resultados. Através destas são propostas melhorias para trabalhos posteriores.

Capítulo 2

Fundamento teórico para a medição de geometrias 3D

Em meados de 1860, Emile Verdet demonstrou que uma fonte de luz não-coerente, como o sol, poderia produzir franjas de interferência. Porém, longe de qualquer demonstração, esse fenômeno tem sido observado em diversos lugares e nas situações mais variadas possíveis: quando gotas de óleo estão dispersas no asfalto ou quando um bloco padrão está sendo limpo com álcool, pode-se observar a formação de franjas coloridas (Figura 2.1), geradas pela superposição das ondas refletidas pela superfície do líquido e do objeto. Os fundamentos teóricos para a utilização desse fenômeno na medição de geometrias 3D são apresentados a seguir.

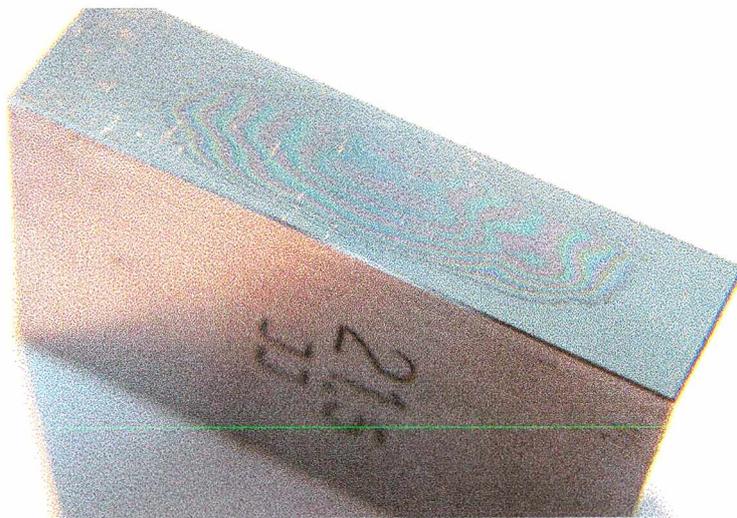


Figura 2.1 Franjas coloridas na superfície de medição de um bloco padrão de 21,5 mm

2.1 Interferência

Quando duas ondas de mesma frequência se propagam aproximadamente na mesma direção, com uma diferença de fase constante em relação ao tempo, elas podem se combinar de forma que sua energia se localize em pontos máximos e mínimos, criando o efeito de interferência. As perturbações u_1 e u_2 das duas ondas são, na denotação complexa (omitindo-se o conjugado complexo):

$$u_1 = U_1 \exp(i\phi_1) \quad (2.1)$$

$$u_2 = U_2 \exp(i\phi_2) \quad (2.2)$$

onde:

U_1, U_2 : amplitudes das ondas;

ϕ_1, ϕ_2 : ângulos de fase das ondas.

Pelo princípio da superposição, a onda resultante da interferência destas ondas é dada por:

$$u = u_1 + u_2 \quad (2.3)$$

A intensidade I de uma radiação é dada pelo quadrado da sua amplitude. Para representações complexas:

$$I = u \cdot u^* \quad (2.4)$$

onde u^* representa o complexo conjugado de u .

Substituindo a Equação 2.3 na Equação 2.4, tem-se:

$$I = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cosh[i(\phi_1 - \phi_2)] \quad (2.5)$$

ou simplesmente,

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (2.6)$$

onde:

I_1, I_2 : intensidade das ondas;

$2\sqrt{I_1I_2} \cos(\Delta\phi)$: termo de interferência;

$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$: diferença de fase entre as ondas.

Como não existem duas fontes independentes de luz capazes de produzir ondas com exatamente o mesmo comportamento em função do tempo¹, uma delas é realizada como uma imagem-espelho, ou em outras palavras, através da divisão de um feixe. Posteriormente, através de uma recombinação desses feixes a diferença de fase será proporcional à diferença entre os caminhos ópticos percorridos por cada feixe.

¹ Será visto com mais detalhes na Seção 2.2.

A Figura 2.2 ilustra o princípio de interferência através do interferômetro de Michelson. Um feixe de luz originado no ponto P de uma fonte de luz L percorre um trajeto retilíneo até atingir um divisor de feixe BS, onde é dividido em dois outros que percorrem trajetórias ortogonais. Um feixe percorre a distância d_1 até atingir um espelho móvel de referência RM, onde é refletido até atingir um sensor de intensidade luminosa de uma câmera de vídeo (CCD – *Charge Coupled Device*). O outro percorre a distância d_2 onde é refletido pelo espelho fixo FM, retornando ao divisor de feixe onde é desviado para o sensor CCD. Nesse processo a diferença entre os caminhos ópticos nos braços do interferômetro é proporcional a $2(d_1 - d_2)$, e a figura de interferência poderá ser vista no divisor de feixe, onde eles se recombinaem com uma diferença de fase igual a:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi \cdot (d_1 - d_2)}{\lambda} \quad (2.7)$$

sendo λ o comprimento de onda da luz.

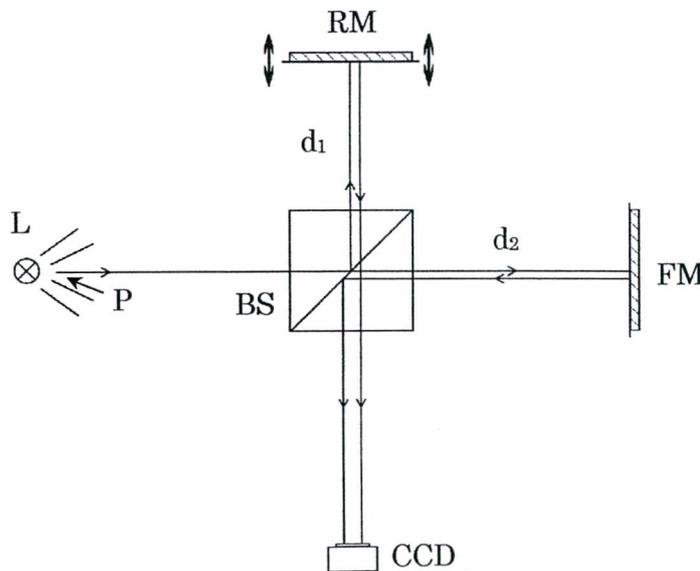


Figura 2.2 Interferômetro de Michelson mostrando a trajetória de um feixe de luz

2.2 Coerência

Para que um padrão de interferência seja observável é preciso que as duas ondas possuam suas frequências muito próximas uma da outra, senão o batimento delas produziria um padrão de franjas em movimento rápido, cuja média temporal seria homogênea (não estruturada). Se essa condição para a interferência for verdadeira, as ondas são ditas coerentes.

Em virtude da luz num feixe ser, nos casos comuns, o resultado da radiação de átomos que emitem independente uns dos outros, duas fontes de luz distintas não são usualmente coerentes [5].

2.2.1 Coerência temporal

Com o advento do laser, uma fonte de luz onde os átomos atuam cooperativamente produzindo uma luz “coerente”, muitas aplicações têm sido desenvolvidas aproveitando essa particularidade especial, como por exemplo: o uso de feixes de luz como portadores altamente eficientes de informações de um ponto a outro [6], a produção de altas temperaturas pelo aquecimento localizado [7] e, com a interferometria, na medição de deformações em peças mecânicas [8]. Porém, entre o laser e outra fonte de luz qualquer “não-coerente”, como uma lâmpada de halogênio, é possível encontrar pelo menos uma semelhança: o comprimento de coerência.

A diferença entre essas fontes de luz é o espectro da luz emitida. Através da análise deste, é possível determinar a qualidade da coerência.

Suponha que uma fonte emita luz entre os comprimentos de onda λ_i e λ_f . Assim a diferença de frequência é:

$$\Delta f = \frac{c \cdot (\lambda_f - \lambda_i)}{\lambda_f \lambda_i} \quad (2.8)$$

onde c é a velocidade da luz.

Existe então um comprimento de onda efetivo relacionado com a variação de frequência, denominado comprimento de coerência, dado por:

$$L_c = \frac{c}{\Delta f} \quad (2.9)$$

onde através da Equação 2.8 e Equação 2.9, tem-se:

$$L_c = \frac{\lambda_f \cdot \lambda_i}{\lambda_f - \lambda_i} \cong \frac{\lambda_{\text{médio}}^2}{\Delta \lambda} \quad (2.10)$$

Quanto maior o valor de L_c , mais coerente é a fonte de luz.

Para uma fonte de luz não-coerente existe um intervalo de tempo, denominado tempo de coerência, onde é possível obter uma diferença de fase constante entre as ondas, criando um padrão estável de interferência.

Didaticamente, a emissão espontânea por átomos não correlacionados pode ser representada por uma senóide com um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 2.3 (com $\lambda_{\text{médio}} = 550 \text{ nm}$ e $L_c = 1 \text{ }\mu\text{m}$), onde ocorre um salto de fase ao final de cada tempo de coerência. Essa representação generaliza a

combinação dos trens de onda gerados pela fonte de luz e, através desse modelo, pode-se explicar de forma simplificada o fenômeno de interferência com luz não-coerente.

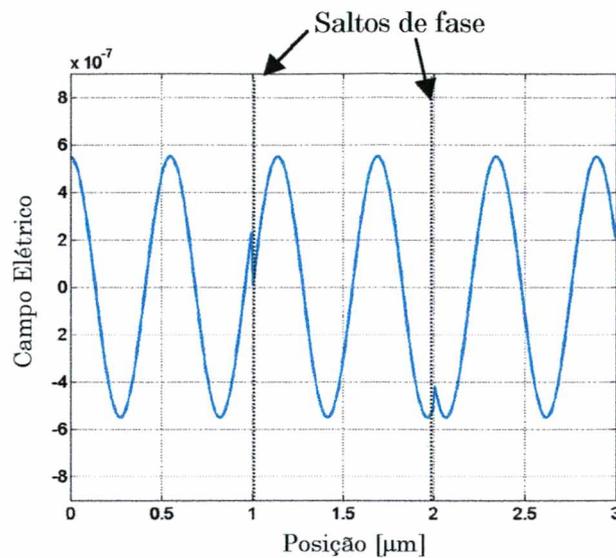


Figura 2.3 Feixe de luz com saltos de fase

Através da montagem experimental de um interferômetro semelhante ao da Figura 2.2, com uma lâmpada de halogênio como fonte de luz L, com comprimento de coerência $L_c \cong 3,5 \mu\text{m}$, e com a inserção de um anteparo translúcido entre o divisor de feixe BS e o sensor, um padrão de interferência pôde ser obtido. Para isso, o módulo da diferença do caminho óptico nos braços do interferômetro foi menor que L_c .

A Figura 2.4 mostra em (a) um padrão de interferência com luz não-coerente obtida através da montagem experimental em (b) [9].



Figura 2.4 (a) Padrão de interferência com luz não-coerente e (b) montagem experimental

A interferência com luz não-coerente é descrita por uma modificação da Equação 2.6 [10]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot |\gamma_{12}(\Delta t)| \cdot \cos(\Delta\phi) \quad (2.11)$$

onde:

$\gamma_{12}(\Delta t)$: grau de coerência complexo;

Δt : diferença de tempo gasto pelos feixes ao percorrerem os caminhos ópticos.

O módulo do grau de coerência complexo (denominado daqui por diante apenas como “grau de coerência complexo”) pode assumir os seguintes valores, dependendo da condição de iluminação:

- a) $|\gamma_{12}(\Delta t)| = 1$, quando a fonte de luz for coerente;
- b) $0 < |\gamma_{12}(\Delta t)| < 1$, parcialmente coerente;
- c) $|\gamma_{12}(\Delta t)| = 0$, totalmente não-coerente.

O valor assumido em a) é um valor idealizado, porém essa aproximação não compromete o valor de I quando se utiliza, por exemplo, o laser como fonte de luz. Quando o tempo Δt for menor que o tempo de coerência da fonte de luz, o grau de coerência complexo terá um valor no intervalo $]0, 1[$ (b). Se Δt for maior que o tempo de coerência, não haverá interferência (c).

2.2.2 Coerência espacial

A fonte de luz totalmente coerente contém duas idealizações:

- a) Emissão segundo uma função senoidal infinita, sem salto de fase, como visto na Seção 2.2.1;
- b) Extensão zero, ou seja, uma forma geométrica pontual.

Um outro conceito relacionado à coerência trata do desvio entre a segunda idealização e fontes reais.

Dois pontos distintos num filamento de uma lâmpada poderiam ser considerados como duas fontes individuais se a distância entre eles fosse maior que o comprimento de onda. Nesse caso, considerar-se-ia a fonte erroneamente como não-coerente. Por isso, é necessário conhecer a correlação existente entre a geometria da fonte e a diferença de fase para a obtenção da interferência.

Através do experimento de Young da interferência numa fenda dupla [11], é possível verificar que os dois pontos da fonte de luz geram franjas de mesma frequência, mas com deslocamentos de fase, onde elas se sobrepõem, reduzindo o contraste da interferência dado por:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.12)$$

onde I_{\max} e I_{\min} representam as intensidades correspondentes aos valores máximos e mínimos nas franjas de interferência, respectivamente.

O contraste C é sensível às coerências temporal e espacial. No primeiro caso, enquanto a diferença dos caminhos ópticos se aproxima do comprimento de coerência L_c , C diminui até ser igual a zero. No segundo caso, se o ângulo de colimação do feixe de luz ultrapassa um certo valor dado pelo tamanho da fonte, C também diminui.

Uma relação entre componentes da montagem experimental com especificações críticas para a obtenção de franjas será vista no Capítulo 3.

2.3 Princípio de medição

Aproveitando as restrições quanto à diferença entre os caminhos ópticos dos braços do interferômetro para a formação de figuras de interferência, a geometria tridimensional de um objeto pode ser obtida pela substituição do espelho fixo do interferômetro, apresentado na Figura 2.2, por um objeto cuja geometria seja de interesse.

A Figura 2.5 mostra o interferômetro de Michelson modificado para a obtenção de geometrias 3D.

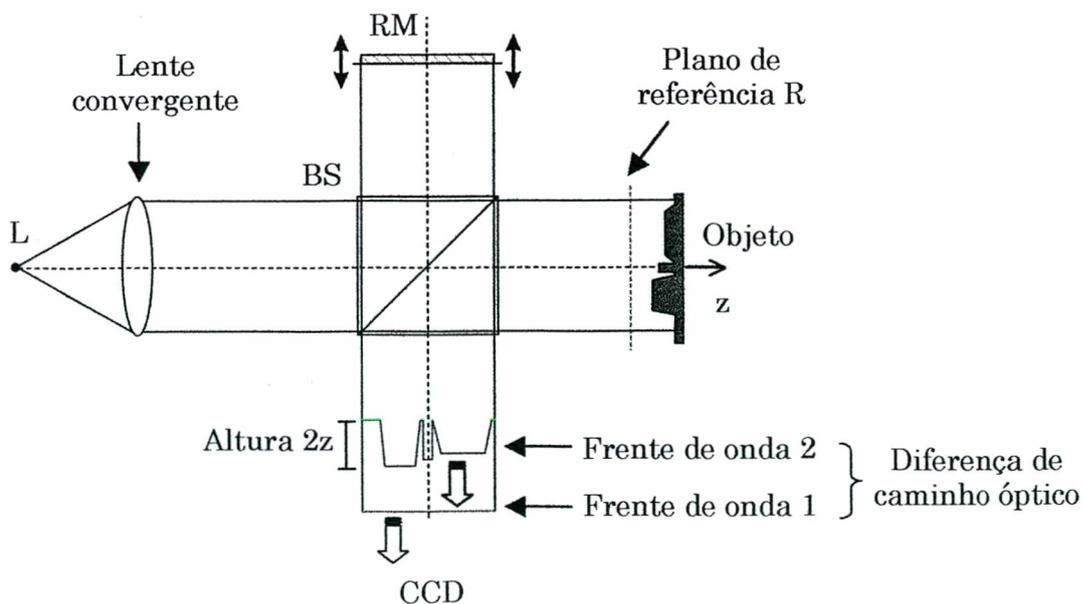


Figura 2.5 Interferômetro de Michelson modificado para medição de geometrias 3D

Uma lente convergente transforma a iluminação divergente da fonte de luz pontual L em iluminação paralela. No divisor de feixe BS, o feixe de raios paralelos é dividido em dois. Uma frente de onda percorre um braço do interferômetro até ser refletida pelo espelho de referência RM e retorna até atingir o sensor CCD. A outra percorre o outro braço do interferômetro até atingir o objeto, onde é refletida, retornando ao divisor BS, sendo desviada para o sensor CCD.

Para haver modulação, a diferença de caminho óptico deve ser menor que o comprimento de coerência L_c . Porém, como o objeto não é um plano, a diferença de caminho óptico vai depender da posição de cada ponto da superfície do objeto.

Na Figura 2.5 a diferença de caminho óptico é determinada pela diferença entre as frentes de onda 1 e 2, formadas pela reflexão da luz com as superfícies do espelho RM e do objeto, respectivamente. À frente de onda 2, está associada uma altura $2z$, dada pela geometria do objeto. Então, para cada ponto da superfície do objeto, existe um valor de z associado, que pode ser determinado pela interferência formada naquele ponto pela superposição das frentes de onda 1 e 2.

Considere o objeto 3D da Figura 2.6. Para cada ponto do objeto: (x_0, y_0) , (x_1, y_1) e (x_2, y_2) ; está associado um valor de z : z_0 , z_1 e z_2 , respectivamente; dado pela altura do objeto.

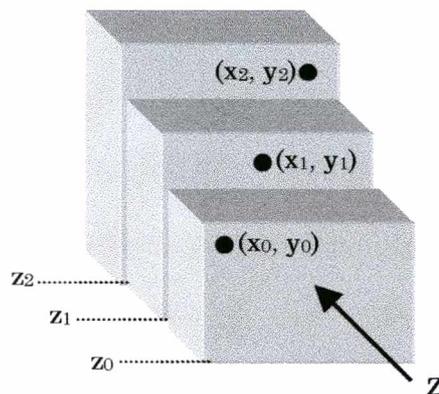


Figura 2.6 Objeto 3D

Quando o plano de referência R, relativo à posição do espelho RM, estiver a uma distância maior que $L_c/2$ do objeto, a distância entre as frentes de onda será maior que L_c . Nesse momento, o grau de coerência complexo será zero ($|\gamma_{12}(\Delta t)| = 0$), e a intensidade I , de acordo com a Equação 2.11, será igual a:

$$I_0 = I_{RM} + I_{OB} \quad (2.13)$$

onde I_0 representa a soma das intensidades refletidas pelo espelho I_{RM} e pelo objeto I_{OB} , respectivamente.

Quando o plano de referência R coincidir com algum ponto da superfície do objeto, o grau de coerência complexo será igual a um ($|\gamma_{12}(\Delta t)| = 1$), e a intensidade I

naquele ponto será máxima e igual a:

$$I = I_0 + 2\sqrt{I_{RM} \cdot I_{OB}} \quad (2.14)$$

A Figura 2.7 apresenta cinco imagens obtidas pelo CCD entre o início e o fim do deslocamento do espelho de referência (conseqüentemente, do plano de referência). No início e no fim do deslocamento a intensidade I em cada ponto do objeto é dada pela Equação 2.13, pois, não está ocorrendo modulação. Na modulação, quando a distância entre o plano de referência e a superfície do objeto for menor que $Lc/2$, pode-se observar as franjas de interferência devido ao aumento do contraste C , dado pelas intensidades I_{max} (branco) e I_{min} (preto).

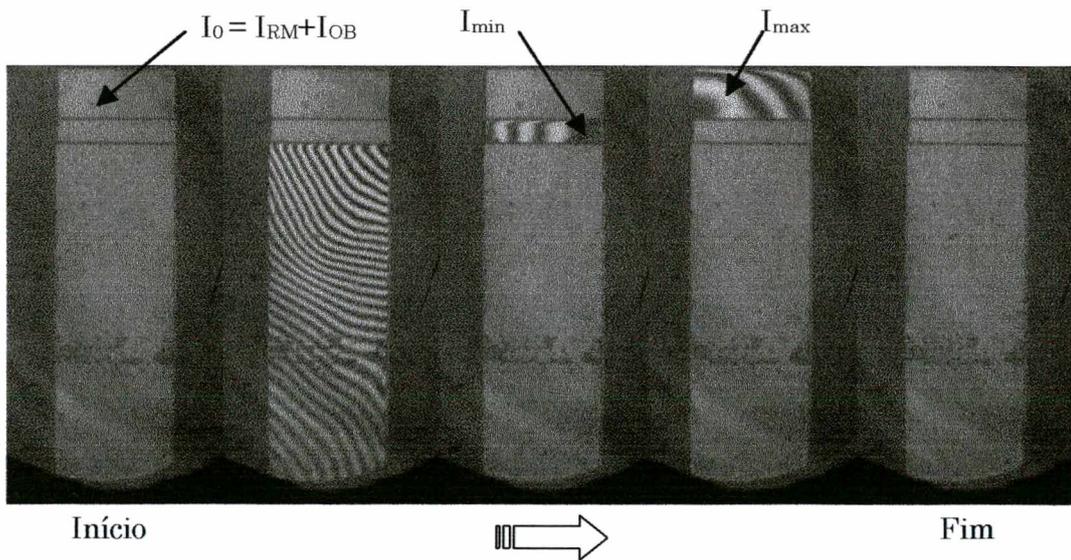


Figura 2.7 Imagens de interferência na superfície do objeto entre o início e o fim do deslocamento do espelho de referência

Analisando as intensidades para cada ponto do objeto enquanto o espelho de referência é deslocado, os valores de z podem ser obtidos e a geometria tridimensional, construída.

A Equação 2.11 escrita em função do deslocamento em z fica:

$$I(z) = I_0 + A(z)\cos[2kz + \varphi(z)] \quad (2.15)$$

onde:

$$A(z) = 2\sqrt{I_{RM}I_{OB}} \cdot |\gamma_{RM,OB}(z)| \quad (2.16)$$

k : número de onda, igual a $2\pi/\lambda_{médio}$;

$\varphi(z)$: deslocamento de fase;

$A(z)$: amplitude da intensidade de modulação;

$|\gamma_{RM,OB}(z)|$: grau de coerência complexo em função da posição no eixo z .

Uma forma de analisar se está havendo modulação em um ponto é através dos valores de $A(z)$. Se $A(z)$ for diferente de zero está havendo modulação, isso quer dizer que a posição do espelho de referência RM é aproximadamente igual ao valor de z para aquele ponto do objeto.

Como a posição do espelho de referência RM é conhecida, a Equação 2.15 pode ser escrita apenas em função de $\varphi(z)$. Com deslocamentos de fase, é possível achar uma relação entre $A(z)$ e a intensidade $I(z)$, permitindo analisar os valores de $A(z)$ sem o conhecimento prévio de $|\gamma_{RM,OB}(z)|$, I_{RM} e I_{OB} para cada ponto.

Os valores de $z(x, y)$ podem ser obtidos através do seguinte procedimento: para cada posição conhecida do espelho RM são adquiridas três imagens no sensor CCD, defasadas de 120° , ou seja: $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 120^\circ$ e $\varphi_3 = 240^\circ$. Substituindo esses valores na Equação 2.15, obtém-se:

$$\begin{aligned} I_1(z) &= I_0 + A(z)\cos(2kz + 0^\circ) \\ I_2(z) &= I_0 + A(z)\cos(2kz + 120^\circ) \\ I_3(z) &= I_0 + A(z)\cos(2kz + 240^\circ) \end{aligned} \quad (2.17)$$

onde $I_1(z)$, $I_2(z)$ e $I_3(z)$, representam as intensidades relativas aos deslocamentos de fase φ_1 , φ_2 e φ_3 , respectivamente.

Através da trigonometria, pode-se determinar que:

$$A(z) = \sqrt{[I_1(z) - I_0]^2 + [I_2(z) - I_0]^2 + [I_3(z) - I_0]^2} \quad (2.18)$$

sendo:

$$I_0 = \frac{I_1(z) + I_2(z) + I_3(z)}{3} \quad (2.19)$$

Através do deslocamento do espelho de referência RM, o valor verdadeiro de $z(x, y)$ estará compreendido no intervalo entre o início e o fim da modulação ($A(z) \neq 0$) para este ponto, onde o valor de $A(z)$ for máximo.

A Figura 2.8 apresenta valores de $I(z)$ obtidos por simulação² enquanto o plano de referência R é deslocado no eixo z . O valor de $z(x, y)$ se encontra no intervalo $[12, 18] \mu\text{m}$, onde o valor de $A(z)$ é máximo, $15 \mu\text{m}$.

Considerando a Figura 2.6, os valores de z : z_1 , z_2 e z_3 , para os seus respectivos pontos: (x_1, y_1) , (x_2, y_2) e (x_3, y_3) , são determinados através dos valores de $A(z)$ máximos e podem ser visualizados na Figura 2.9, sobre o eixo z .

² Para a simulação considerou-se: $L_c = 3 \mu\text{m}$; $\lambda_{\text{médio}} = 550 \text{ nm}$; modelo linear do grau de coerência complexo: $|\gamma_{12}(z)| = (-1/L_c)|z| + 1$, no domínio: $z \in [z_0 - L_c, z_0 + L_c]$, onde $z_0 = 15 \mu\text{m}$.

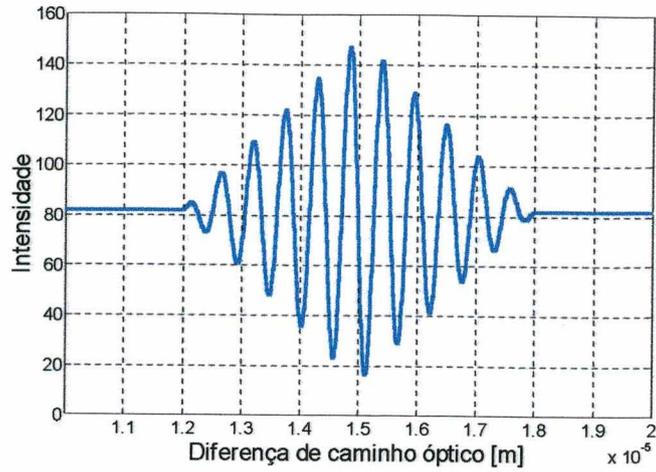


Figura 2.8 Valores de $I(z)$ para um ponto enquanto o espelho de referência é deslocado

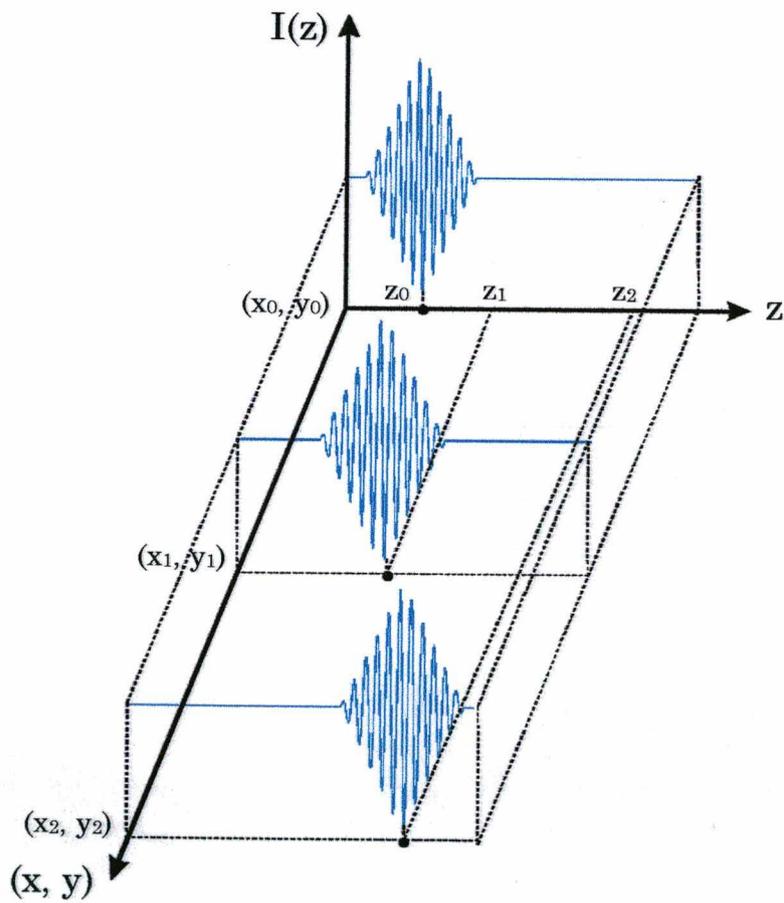


Figura 2.9 Valores de $I(z)$ para os três pontos do objeto 3D enquanto o espelho de referência é deslocado

Capítulo 3

Montagem experimental e suas particularidades

Sabe-se que, em procedimentos experimentais, algumas particularidades são fundamentais para a reprodutibilidade dos resultados. Com esse intuito, este capítulo descreve as especificações mais importantes dos componentes utilizados, bem como metodologias, procedimentos de calibração, restrições e alguns resultados preliminares de geometrias obtidas antes da análise quantitativa destes.

O interferômetro modificado para a medição de geometrias 3D apresentado na Figura 2.5, contém algumas simplificações necessárias para o entendimento do princípio de funcionamento do sistema de medição (SM) proposto. Uma montagem realista inclui componentes adicionais, não apresentados anteriormente, que são fundamentais para o funcionamento do SM.

A Figura 3.1 ilustra a montagem experimental utilizada nesse trabalho. Nela, aparecem alguns componentes já mencionados tais como: a fonte de luz L, o divisor de feixe BS, o espelho móvel de referência RM e o sensor CCD, os quais têm as mesmas funções descritas anteriormente. Além desses, aparecem filtros e algumas lentes.

Este capítulo, além de informações sobre os componentes ópticos apresentados na Figura 3.1 da montagem experimental, ainda contém informações sobre os atuadores para o espelho de referência e os procedimentos utilizados para a determinação experimental dos valores de $z(x, y)$.

A Figura 3.2 apresenta uma visão geral da montagem experimental do sistema de medição.

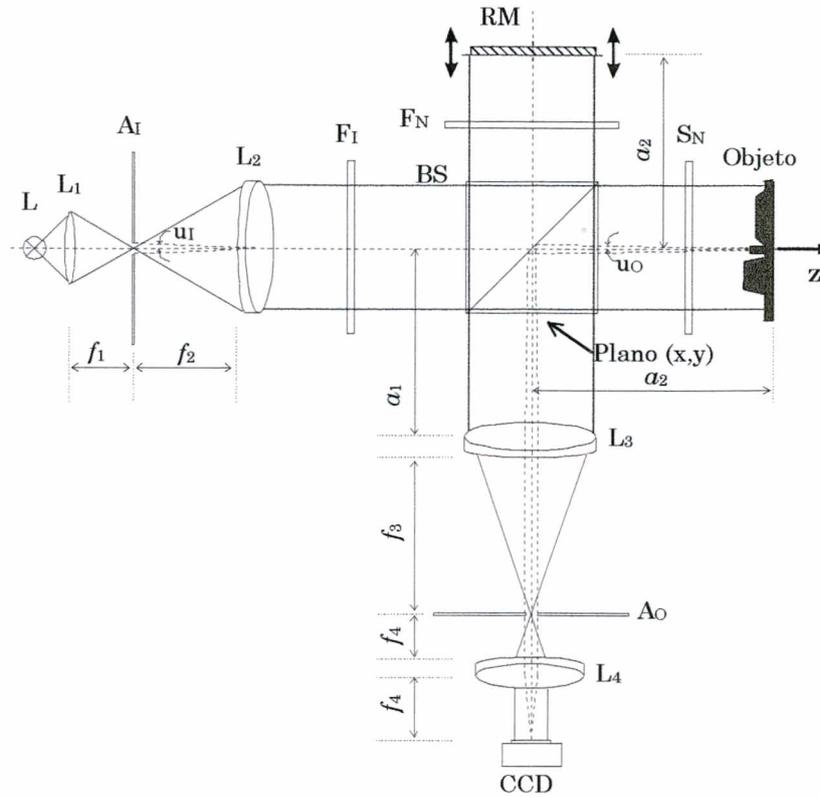


Figura 3.1 Montagem experimental do sistema de medição

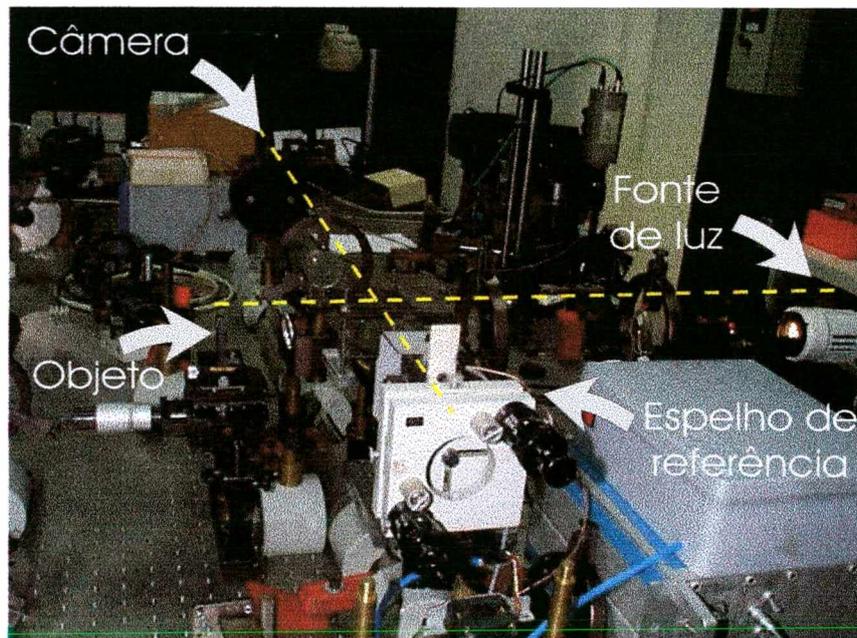


Figura 3.2 Visão geral da montagem experimental do sistema de medição

3.1 Filtros

Na montagem experimental da Figura 3.1 aparecem três filtros: filtro cinza F_N , filtro de interferência F_I e o substrato S_N .

A medição da geometria 3D de um objeto é feita através da análise dos pontos que modulam enquanto o espelho de referência RM é deslocado. Para melhorar a detecção desses pontos é importante que se tenha um elevado contraste C durante a modulação.

A Equação 2.12 mostra que se consegue um valor máximo do contraste C , quando as intensidades provenientes do espelho e do objeto tiverem o mesmo valor.

O filtro cinza F_N é utilizado para igualar a intensidade de luz nos braços do interferômetro. A sua inserção é necessária devido à diferença entre a reflexão do espelho e do objeto. Apesar disso, não se consegue uma homogeneidade da intensidade em todos os pontos da imagem do sensor, pois, a geometria do objeto influencia diretamente com a sua reflexão difusa e especular.

A reflexão do objeto é afetada principalmente pela sua rugosidade, por isso, para cada objeto deve-se escolher um filtro cinza apropriado.

O índice N indica que é possível a combinação de filtros para a obtenção da transmitância (ingl.: *transmittance*) necessária para a igualdade das intensidades entre os braços do interferômetro. Ao se combinar N filtros, a densidade resultante D_N é a soma das densidades individuais D . A Equação 3.1 relaciona a densidade individual D com a transmitância T [12].

$$D = \log\left(\frac{1}{T}\right) \quad (3.1)$$

É difícil estimar teoricamente qual o valor D do filtro necessário para cada objeto. O desvio entre o valor especificado e o real, a absorção da luz ao passar duas vezes pelo filtro, a não homogeneidade da imagem devido à rugosidade do objeto são, dentre outros fatores, fortes influenciadores do valor de D . Por isso, para a montagem experimental foi necessário a utilização de um conjunto de filtros com vários valores de D , para uma combinação em uma escala ampla, com valores aproximadamente equidistantes. Os valores individuais de D variaram entre: 0,06 e 1,82.

Com a inserção do filtro F_N , o tempo para uma frente de onda percorrer o caminho óptico aumenta, devido ao valor do índice de refração do filtro ($n > 1$). A diferença de caminho óptico causada pela inserção do filtro poderia ser compensada por um deslocamento do objeto ou do espelho de referência, porém, como o índice de

refração é uma função do comprimento de onda, $n = n(\lambda)$, o caminho óptico também depende de λ . Assim, para ajustar o caminho óptico, é necessário inserir um substrato S_N , com a mesma espessura do filtro e fabricado com o mesmo material, já que neste trabalho utiliza-se uma fonte de luz não-coerente, onde a luz emitida está distribuída em um espectro de frequência.

Existe um outro tipo de filtro que reduz a intensidade luminosa, porém diferentemente do filtro cinza F_N , ele permite a passagem de uma faixa estreita de frequências: o filtro de interferência F_I . Ele é usado para aumentar o comprimento de coerência L_c da fonte de luz.

De acordo com o que foi visto na Seção 2.3, quanto à restrição entre a diferença dos caminhos ópticos nos braços do interferômetro, a possibilidade de alterar o comprimento de coerência da fonte de luz traz algumas vantagens. Deve-se considerar que, como em todo processo experimental, existem restrições além das teóricas que contribuem para a qualidade do resultado de uma medição. Essas restrições, via de regra, estão relacionadas com: equipamentos e procedimentos utilizados, condições ambientais no momento da medição e o tempo despendido na medição. Em relação à algumas restrições experimentais, pode-se citar as seguintes vantagens na possibilidade de alteração de L_c :

- a) Ajuste inicial – quanto maior o valor de L_c , mais fácil é a sua detecção, reduzindo o tempo empregado no ajuste;
- b) Atuador do espelho de referência – quanto maior o valor de L_c , menor será a resolução do deslocador mecânico para o espelho de referência, considerando-se a teoria da amostragem [13];
- c) Rugosidade do objeto – quanto maior o valor de L_c , mais pontos de superfícies rugosas serão adquiridos e menor o erro inserido no resultado da medição. O valor de L_c deve obedecer à seguinte condição: $L_c \geq 8,9 \cdot \sigma_n$, onde σ_n representa o valor do parâmetro R_q (RMS) da rugosidade do objeto [14][15]. Se essa condição não for satisfeita, o resultado da medição estará suscetível a erros no valor de $z(x, y)$;
- d) Metodologia para determinação de $z(x, y)$ – Se à metodologia utilizada está associado um erro em $z(x, y)$, intuitivamente pode-se afirmar que quanto menor o L_c , menor o erro.

Na Seção 4.2.2 serão comparados resultados de medições com dois valores de L_c : 5 μm e 65 μm .

3.2 Componentes para a iluminação

A iluminação da montagem experimental mostrada na Figura 3.1 apresenta mais componentes que as situações idealizadas do Capítulo 2.

A medição da geometria 3D de um objeto é feita através da análise das intensidades quando duas frentes de onda se combinam para formar a figura de interferência.

A interferência é formada no plano (x, y) do divisor BS porque as frentes de onda incidiram paralelamente sobre o espelho e o objeto. Por isso, é possível associar a interferência nos pontos do plano (x, y) com a altura do objeto no eixo z .

Teoricamente, para se colimar a luz emitida por uma fonte de luz pontual é necessário utilizar uma lente convergente com uma distância focal f . Posicionando a fonte de luz sobre a distância focal, os raios ao passarem pela lente sairiam paralelos. Como não existe uma fonte de luz pontual é necessário utilizar mais componentes.

A fonte de luz L utilizada na montagem experimental da Figura 3.1 é uma lâmpada de halogênio. À frente dela, uma lente convexa L_1 concentra os raios que incidem sobre ela num ponto localizado na distância f_1 . Esse ponto coincide com a abertura de iluminação A_1 . O efeito óptico criado no anteparo formado pela abertura é a projeção do filamento da lâmpada de halogênio L (Figura 3.3).



Figura 3.3 Projeção do filamento da lâmpada de halogênio

A luz que passa pela abertura A_1 simula uma fonte de luz quase pontual. Para colimar essa luz, é utilizada uma lente L_2 posicionada a uma distância focal f_2 . A lâmpada de halogênio emite luz num espectro de frequências, por isso a lente L_2 é

uma lente acromática, utilizada para não criar aberrações cromáticas, causadas pelo desvio do feixe proporcional à frequência.

A não pontualidade da fonte de luz pode fazer com que um ponto do objeto seja iluminado por pontos diferentes da fonte de luz. De acordo com o que foi visto na Seção 2.2.2 isso pode causar a redução do contraste de interferência C . Para quantificar esse efeito define-se o termo “abertura numérica de iluminação” u_1 , como o meio ângulo formado pelo abertura A_1 (diâmetro) e a distância focal f_2 .

$$u_1 = \frac{A_1}{2 \cdot f_2} \quad (3.2)$$

O valor de u_1 na montagem experimental, com as distâncias em milímetros foi de:

$$u_1 \cong \frac{2}{2 \cdot 100} = 10 \text{ [mrad]} \quad (3.3)$$

A principal especificação de uma fonte de luz para esse trabalho é a luminância energética³ L_e , dada por:

$$L_e = \frac{\Phi_e}{A \cdot \Omega} \quad (3.4)$$

onde:

Φ_e : fluxo luminoso [W];

A : área emissiva [m²];

Ω : ângulo sólido formado entre um objeto e um ponto da fonte de luz [sr].

A Figura 3.4 ilustra a projeção de um objeto por uma lente convergente. Na Figura 3.4(a), o objeto forma com a lente um ângulo sólido Ω_1 , dado pela relação entre a área da lente e o quadrado da distância l_1 . Similarmente, a imagem forma Ω_2 . A relação entre os ângulos sólidos é igual a $\Omega_2 / \Omega_1 = l_1^2 / l_2^2$.

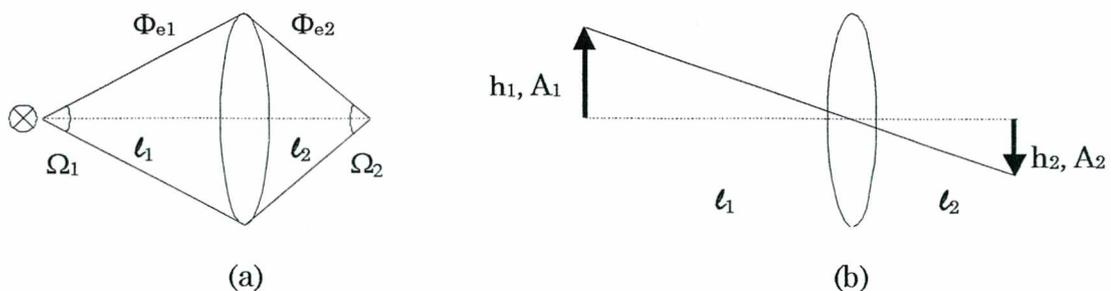


Figura 3.4 Projeção de um objeto para ilustrar a luminância

³ A “luminância energética” possui valor não nulo para frequências luminosas imperceptíveis ao olho humano, porém detectáveis por equipamentos eletrônicos. Contrariamente, a “luminância”, que é uma grandeza luminosa da fotometria, tem valor nulo para essas frequências [16] [17].

O objeto possui uma altura h_1 e uma área emissiva A_1 . A imagem é projetada com: h_2 e A_2 , respectivamente. Da Figura 3.4(b) obtém-se que: $h_2 / h_1 = \ell_2 / \ell_1$ e $A_2 / A_1 = (\ell_2 / \ell_1)^2$.

A razão entre as luminâncias L_{e2} e L_{e1} fica:

$$\frac{L_{e2}}{L_{e1}} = \frac{\Phi_{e2} A_1 \Omega_1}{\Phi_{e1} A_2 \Omega_2} \quad (3.5)$$

onde, substituindo-se os valores:

$$\frac{L_{e2}}{L_{e1}} = \frac{\Phi_{e2}}{\Phi_{e1}} \cdot \left(\frac{\ell_1}{\ell_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{\ell_2}{\ell_1}\right)^2 \quad (3.6)$$

A Equação 3.6 mostra que, em uma situação ideal, quando todo o fluxo luminoso no plano do objeto for igual ao do plano da imagem, ou seja $\Phi_{e1} = \Phi_{e2}$, a relação entre as luminâncias é igual a 1. A impossibilidade de igualar os fluxos luminosos faz com que não seja possível aumentar o valor da luminância L_e com componentes ópticos.

A luminância L_e de uma fonte de luz depende da tecnologia utilizada para a emissão da luz. Por exemplo, a luminância de uma fonte de luz que emite pelo aquecimento de um filamento é diferente daquela que emite pela formação de um arco voltaico. Por isso, para uma mesma tecnologia, não é esperada uma variação considerável nos valores da luminância.

Valores característicos da luminância energética para diferentes fontes de luz são apresentados na Tabela 3.1 [18].

A Tabela 3.1 mostra que a fonte de luz L utilizada na montagem experimental possui um valor de luminância baixo se comparado com as lâmpadas de arco curto (XBO e HBO) e com o laser de He-Ne. Todavia, considerando-se os respectivos comprimentos de coerência, não seria possível utilizar o laser como fonte de luz para esse trabalho (a não ser que seu comprimento de coerência fosse reduzido por uma modulação externa).

O baixo valor da luminância da lâmpada de halogênio utilizada na montagem experimental induz a uma grande abertura numérica u_l , o que diminui o contraste de interferência C .

Tabela 3.1 Valores de luminância energética e comprimento de coerência para diferentes fontes de luz

Fontes de luz	Luminância energética [W/(m ² . sr)]	Comprimento de coerência
LED ⁴ 295K	0,6 x 10 ⁴	18 μm
Lâmpada de Halogênio	90 x 10 ⁴	3,5 μm
XBO ⁵ 75	154 x 10 ⁴	1,4 μm
HBO ⁶ 100	567 x 10 ⁴	13,9 μm
Laser de He-Ne ⁷	10.000 x 10 ⁴	> 20 cm

3.3 Componentes para capturar as imagens de interferência

Para capturar e armazenar as figuras de interferência formadas no divisor de feixe BS, é utilizada uma câmera de vídeo com o sensor CCD, conectados a uma placa de aquisição de imagens.

A imagem projetada no CCD deve representar fielmente o mensurando, no caso a figura de interferência formada no divisor BS, representativa da geometria 3D do objeto e do espelho de referência RM.

A projeção de objetos com lentes convencionais utilizadas em câmeras, criam erros de perspectiva, chamados de erros de paralaxe. O efeito criado pela perspectiva é a mudança da ampliação do objeto de acordo com a distância dele à lente.

Em alguns casos da metrologia, o erro de paralaxe deve ser acrescentado como mais uma fonte de incerteza no resultado da medição. Porém, na metrologia óptica é possível eliminar (ou pelo menos atenuar) esse efeito.

Neste trabalho foi utilizada uma combinação de lentes, chamada de objetiva telecêntrica, com as seguintes funções:

- a) Gerar imagens das figuras de interferência no sensor CCD;
- b) Selecionar um cone estreito de luz saindo de cada ponto do objeto para obedecer a restrição dada pela coerência espacial;
- c) Evitar o erro de paralaxe.

⁴ Diodo emissor de luz, 3000 mcd. Fabricante: Toshiba;

⁵ Lâmpada de xenônio de arco curto, 75 W. Fabricante: Osram;

⁶ Lâmpada de mercúrio de arco curto, 100W. Fabricante: Osram.

⁷ Potência = 1,1 mW.

A Figura 3.5 compara o campo de visão entre uma lente convencional e uma objetiva telecêntrica.

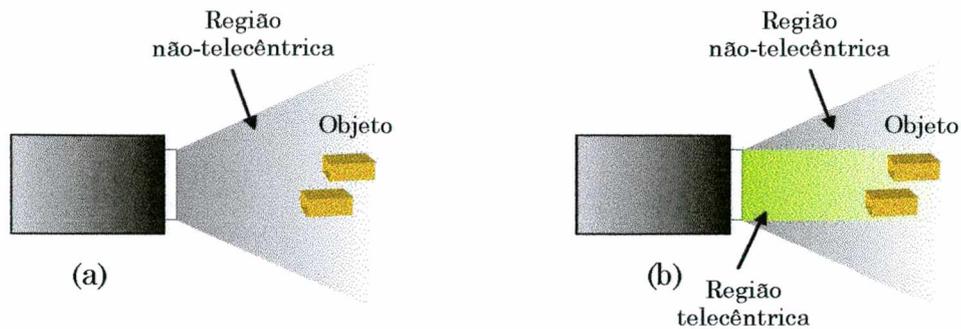


Figura 3.5 Campo de visão das lentes (a) convencional e (b) objetiva telecêntrica

O erro de paralaxe não ocorre na objetiva telecêntrica na Figura 3.5(b) porque os raios que incidem no sensor são apenas os que chegam paralelamente ao eixo óptico, formando a região telecêntrica. A região não-telecêntrica ilumina apenas o sensor na Figura 3.5(a), onde a incidência oblíqua dos raios forma a perspectiva do objeto.

A Figura 3.6 ilustra duas aquisições com as duas lentes [19]. As lentes estão posicionadas a 45° do plano horizontal. A variação da ampliação de acordo com a posição do objeto é mostrada através da distância entre a base e o topo dos pinos extremos.

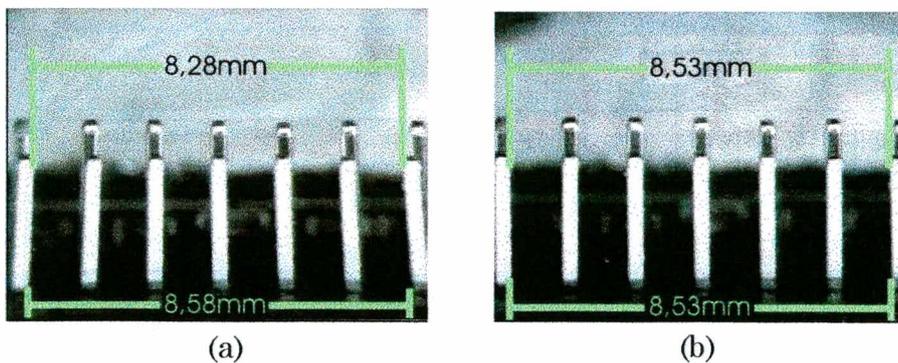


Figura 3.6 Imagens de uma (a) lente convencional e uma (b) lente telecêntrica

Na montagem experimental da Figura 3.1 a objetiva telecêntrica é formada pelas lentes L_3 e L_4 , e pela abertura A_0 , que define o cone de luz.

As lentes L_3 e L_4 são acromáticas, para evitar as aberrações cromáticas, e possuem f_3 e f_4 como distâncias focais, respectivamente.

A ampliação da imagem (no caso, a redução) é dada pela relação entre as

distâncias focais: f_4 / f_3 . Essa redução permite projetar a imagem do divisor de feixe BS, um quadrado com 50 mm de lado, em um sensor CCD com 6,6 mm de menor lado (CCD de 2/3"). Na montagem experimental essa relação é aproximadamente igual a $55 \text{ mm} / 410 \text{ mm} \cong 0,134$.

A região telecêntrica é formada da seguinte maneira: os raios refletidos pelo objeto, devido a sua geometria e rugosidade, apresentam uma reflexão difusa (espalham os raios em direções aleatórias) e especular (retornam na mesma direção do feixe de luz incidente). Os raios desviados pelo divisor de feixe BS para o sensor CCD atingem a lente L_3 onde convergem para a abertura A_0 da observação. A abertura A_0 está posicionada nas distâncias focais f_3 e f_4 das lentes L_3 e L_4 , respectivamente. Por isso, somente os raios paralelos que atingem L_3 passarão pela abertura. Depois da abertura, os raios são refratados paralelamente pela lente L_4 e incidem no CCD.

Para quantificar a restrição dada pela coerência espacial, define-se o termo "abertura numérica de observação" u_0 , igual ao meio ângulo formado entre a abertura A_0 (diâmetro) e a distância entre o objeto e a lente L_3 .

A imagem do objeto no sensor CCD estará focalizada quando o objeto estiver na distância focal da lente L_3 , dada pela distância $a_1 + a_2$. Assim, a abertura numérica de observação u_0 é igual a:

$$u_0 = \frac{A_0}{2 \cdot (a_1 + a_2)} \quad (3.7)$$

O valor de u_0 na montagem experimental, com as distâncias em milímetros foi de:

$$u_0 \cong \frac{5}{2 \cdot (23 + 21,6)} = 5,6 \text{ [mrad]} \quad (3.8)$$

O objeto simula uma fonte secundária de luz, por isso existe restrição na obtenção de interferência devido a sua geometria. Para atender à coerência espacial é preciso que as aberturas numéricas obedeçam à seguinte condição [14]:

$$u_0 \geq u_1 \quad (3.9)$$

Pelas Equações 3.3 e 3.8 essa relação não é obedecida na montagem experimental, por isso não é esperada modulação em todos os pontos do objeto, devido à redução do contraste C .

Para que não ocorra a superposição em um pixel⁸ do CCD de raios refletidos por pontos diferentes do objeto é preciso que:

⁸ Um sensor CCD possui aproximadamente 640 x 480 pixels.

- o objeto esteja localizado na distância focal da lente L_3 ;
- não ocorra difração na abertura A_0 (efeito “speckle”).

Para eliminar o efeito da difração, o diâmetro do disco de Airy, D_{disco} (padrão de difração provocado pela abertura circular A_0 [20]), deve ser maior que a diagonal de um pixel, D_{pixel} , dado pela Equação 3.10:

$$D_{\text{disco}} > D_{\text{pixel}} \quad (3.10)$$

onde:

$$D_{\text{disco}} = 2,44 \cdot \frac{\lambda \cdot f_4}{A_0} \quad (3.11)$$

e:

λ : comprimento de onda médio [m];

f_4 : distância focal da lente L_4 [m];

A_0 : diâmetro da abertura de observação [m].

3.4 Atuadores para o espelho de referência

A obtenção da interferência com luz não-coerente é possível devido à pequena diferença entre os caminhos ópticos dos braços do interferômetro. Na montagem experimental da Figura 3.1 a distância do espelho móvel de referência RM e do objeto, em relação ao divisor BS, é igual a a_2 , por isso a figura de interferência formada no divisor de feixe BS é função das superfícies do espelho RM e do objeto.

Através do deslocamento do espelho de referência a geometria 3D do objeto pode ser obtida pela análise das figuras de interferências gravadas pelo sensor CCD entre cada passo do deslocamento.

De acordo com o que foi visto na Seção 2.3, uma forma de analisar essas imagens é através da amplitude da intensidade de modulação $A(z)$. Para uma dada posição em z (posição do espelho de referência) são obtidas três imagens deslocadas de 120° ($z+0^\circ$, $z+120^\circ$ e $z+240^\circ$). Quando o valor de $A(z)$ for diferente de zero, está havendo modulação. O valor de $A(z)$ é calculado para todos os pontos do CCD. Se estiver ocorrendo modulação em um ponto do CCD, o valor da altura $z(x, y)$ do objeto estará contida entre $z \pm Lc/2$, onde Lc é o comprimento de coerência da fonte de luz. Esse intervalo corresponde à distância entre o início e o fim da modulação para esse ponto.

Considerando o comprimento de onda médio da fonte de luz $\lambda_{\text{médio}}$ igual a 550 nm, para se conseguir uma diferença de 120° nos braços do interferômetro é

preciso um deslocamento de $550/6$, o que é aproximadamente 92 nm. Essa ordem de grandeza leva à utilização de um atuador piezo-elétrico (PZT).

O deslocamento de um PZT é produzido pela aplicação de um campo elétrico num cristal, onde o deslocamento é proporcional à deformação sofrida por esta ação. Em função disso, se consegue deslocamentos bem pequenos, com uma boa repetitividade, porém com restrição no percurso total, que é da ordem de alguns micrometros.

Para compensar essa restrição esse trabalho utiliza dois atuadores: PZT⁹ e motor de passo [21]. O motor de passo desloca o espelho RM ao longo de um percurso compatível com a ordem de grandeza da altura do objeto, enquanto os deslocamentos de fase são efetuados pelo PZT.

A Figura 3.7 apresenta a montagem do espelho de referência com seus atuadores.

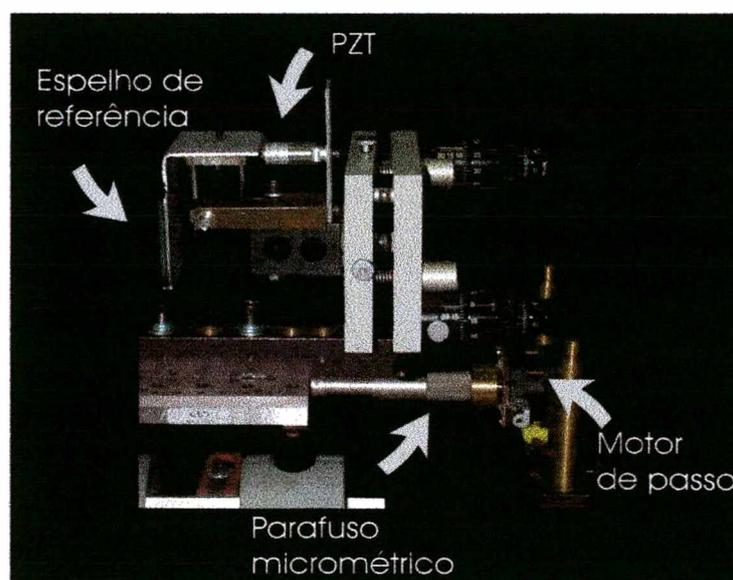


Figura 3.7 Montagem do espelho de referência com seus atuadores

3.4.1 Atuador piezo-elétrico

O controle do deslocamento do PZT é feito utilizando-se uma interface serial do tipo RS232 [22]. Através da conexão entre um computador e o controlador do PZT o deslocamento pode ser efetuado. O controle pode ser em malha aberta ou fechada [23], sendo esta última realimentada por um extensômetro localizado internamente ao PZT. Nesse trabalho utilizou-se o controle em malha fechada pela qualidade dos

⁹ Fabricante: Physik Instrumente. Tipo: P-841.10

resultados.

Para se conhecer a relação entre a saída (deslocamento) e a entrada (sinal elétrico) é preciso conhecer o valor da sensibilidade do PZT. Essa especificação foi determinada experimentalmente utilizando-se uma montagem similar àquela indicada na Figura 2.2.

A fonte de luz L utilizada foi um laser com comprimento de onda $\lambda = 633 \text{ nm}$.

Ao espelho de referência RM já estão acoplados os dois atuadores: PZT e motor de passo, de forma que o cálculo da sensibilidade utilizou as mesmas condições para a medição de geometrias 3D, através do interferômetro da Figura 3.1, considerando-se o conjunto espelho-atuadores.

Enviando uma “rampa” como sinal elétrico de entrada, o valor da sensibilidade foi estimado através da análise das figuras de interferência formadas no divisor de feixe BS. A diferença em volts entre as intensidades máximas e mínimas I_{\max} e I_{\min} , respectivamente, equivale a um comprimento de onda λ .

A Figura 3.8 apresenta as imagens de interferência formadas no divisor BS. Na Figura 3.8(a) a figura de interferência quando o sinal de entrada do PZT é 0 V. Nas Figuras 3.8(b) e (c) o sinal de entrada produz uma diferença de caminho óptico de 180° e 360° , respectivamente.

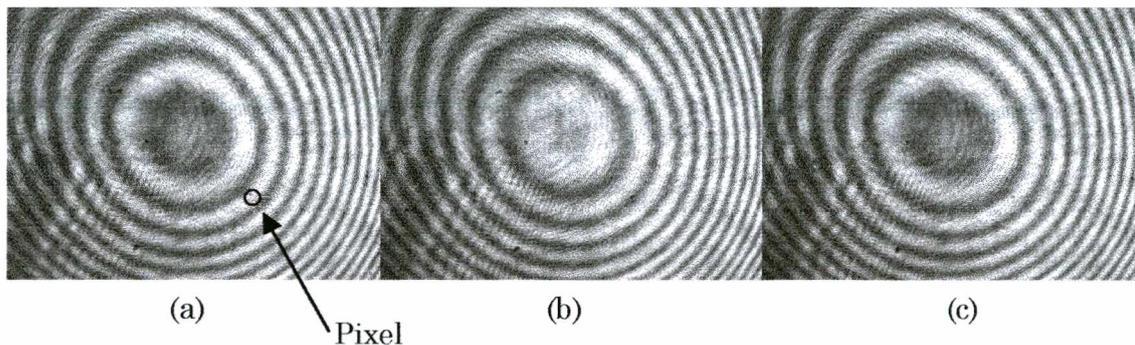


Figura 3.8 Três ondas esféricas defasadas de (a) 0° , (b) 180° e (c) 360°

A Figura 3.9 mostra a intensidade em função da tensão elétrica de entrada, adquirida num mesmo pixel das imagens enquanto o PZT se desloca. Um pixel ilustrativo está mostrado na Figura 3.8 (a).

A sensibilidade média foi estimada em 2944 nm/V . Esse valor considera a diferença entre os caminhos ópticos criada pelo PZT e não o deslocamento em um braço do interferômetro (1472 nm/V).

Como o PZT será utilizado apenas para detectar a modulação, não é preciso uma análise mais aprofundada das incertezas para o valor da sensibilidade.

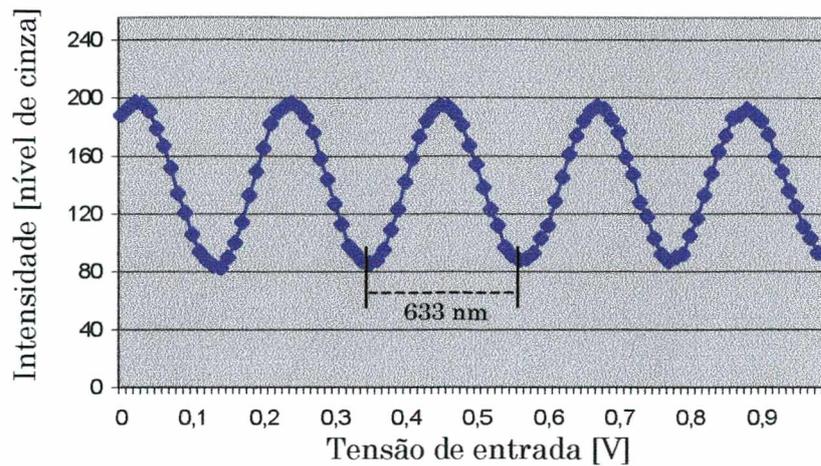


Figura 3.9 Valores da intensidade em função da tensão de entrada para a calibração do PZT

A constante de tempo, que relaciona a transição entre uma posição inicial e uma final no deslocamento, foi considerada igual a 100 ms. Este valor é suficientemente grande para absorver as acomodações devido à inércia do conjunto móvel.

3.4.2 Motor de passo

O conjunto espelho de referência-atuadores está montado em uma mesa micrométrica que desloca cerca de 500 μm em uma revolução do parafuso. O motor de passo utilizado para deslocá-la possui uma resolução de 31,42 mrad, o que equivale a 200 passos por revolução. Essa resolução permite um passo de deslocamento linear da ordem de 2,5 μm .

O motor é controlado via porta paralela e está acoplado diretamente ao parafuso micrométrico da mesa [24][25][26]. O ajuste do acoplamento direto é crítico, e qualquer falha de alinhamento produz vibrações que comprometem as medições, pois, desloca o espelho de referência e, conseqüentemente, altera os padrões da figura de interferência.

Uma forma de eliminar os efeitos da vibração é esperar que ela seja atenuada com o tempo e, a partir daí adquirir as imagens para a análise da modulação. O tempo de estabilização pode ser estimado analisando as figuras de interferência formadas no divisor de feixe BS, iguais àquelas mostradas na Figura 3.8, após o motor deslocar um passo.

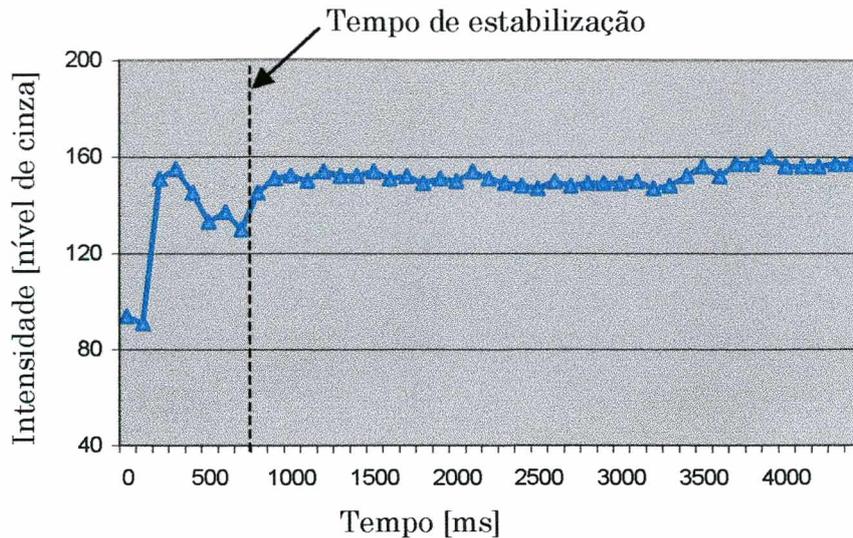


Figura 3.10 Valores da intensidade após o motor deslocar um passo

Na Figura 3.10, o tempo de estabilização é de aproximadamente 800 ms. Apesar desse método para medição de geometrias 3D ser baseado na interferometria, a montagem experimental deve ser mais robusta que um interferômetro com luz coerente [27], pois a fase da interferência não precisa ser medida, apenas a sua ocorrência necessita ser detectada. A influência do tempo de estabilização e de vibrações externas no resultado da medição será vista na Seção 4.2.2.

3.5 Algoritmo para medição de geometrias 3D

O princípio de medição de geometrias 3D apresentado na Seção 2.3 contém uma idealização que compromete sua utilização em um procedimento experimental. Essa idealização diz respeito à ausência da componente aleatória no valor da intensidade $I(z)$, referente ao ruído do sensor CCD. A especificação S/N do fabricante do sensor relaciona o sinal e o ruído do CCD.

Um correlograma (ingl.: *correlogram*) obtido através de defasagens de 120° , geradas pelo deslocamento do espelho de referência RM ($\lambda_{\text{médio}} = 550 \text{ nm}$), está apresentado na Figura 3.11.

A componente aleatória presente nos valores das intensidades $I(z)$ faz com que o valor da amplitude da intensidade de modulação $A(z)$ seja diferente de zero, mesmo quando não estiver ocorrendo modulação. Isso dificulta a determinação do intervalo de modulação, conseqüentemente, o valor de $z(x, y)$.

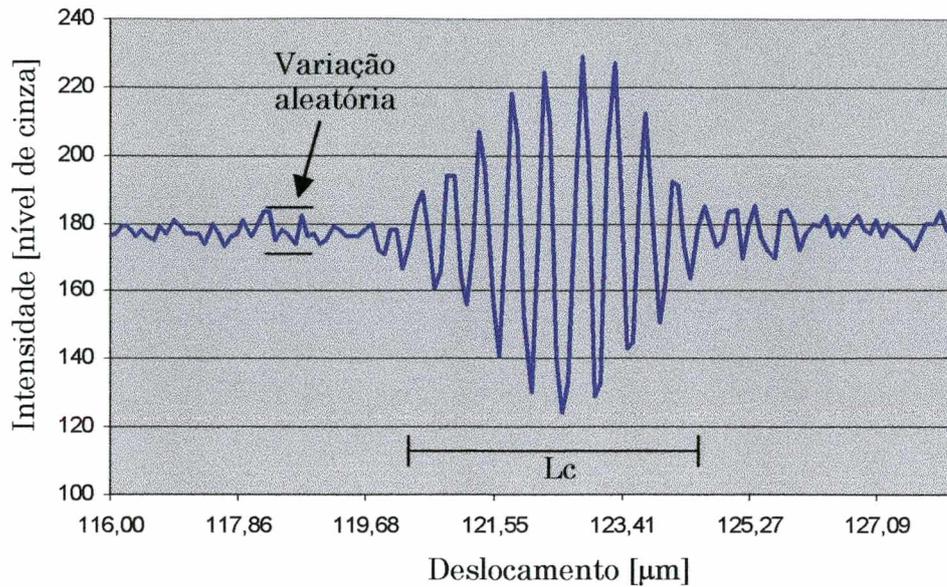


Figura 3.11 Valores de $I(z)$ medidos enquanto o espelho de referência é deslocado produzindo um correlograma com alto contraste num intervalo igual ao comprimento de coerência

Mesmo utilizando uma câmera¹⁰ com um elevado valor de S/N (50 dB), a aplicação de um artifício matemático para o cálculo do valor de $z(x, y)$ se faz necessário.

3.5.1 Margem de segurança

A intensidade luminosa medida pelo sensor CCD é convertida com uma resolução de 8 bits, que corresponde a 256 níveis de cinza.

A modulação é identificada somente quando excede um certo limiar, definido considerando-se, por exemplo: o ruído do CCD e pequenas vibrações dos filtros nos braços do interferômetro. Esse limiar é definido em níveis de cinza.

Como foi visto na Seção 2.3, para determinar se está havendo modulação, são adquiridas três imagens defasadas de 120° . Através dessas imagens, pode-se determinar o valor de $A(z)$, dado pelas Equações 2.18 e 2.19. A amplitude da intensidade do erro (em analogia à amplitude da intensidade de modulação) considera que, se o módulo da diferença entre as duas primeiras e as duas últimas intensidades [$I_2(z) - I_1(z)$ e $I_3(z) - I_2(z)$] for maior que a margem de segurança MS, está havendo modulação. Isso pode ser escrito como:

$$A_{\text{erro}} = \sqrt{[(I_2(z) - MS) - I_2(z)]^2 + [I_2(z) - I_2(z)]^2 + [(I_2(z) + MS) - I_2(z)]^2} \quad (3.12)$$

¹⁰ Fabricante: Pulnix. Modelo: TM-9701

ou simplesmente:

$$A_{\text{erro}} = MS\sqrt{2} \quad (3.13)$$

A Equação 3.13 mostra que neste trabalho o intervalo entre o início e o fim da modulação é determinado experimentalmente quando $A(z) > A_{\text{erro}}$.

Um procedimento para a escolha da margem de segurança MS será mostrado na Seção 4.2.1.

3.5.2 Metodologia para determinação da altura $z(x, y)$

De acordo com o que foi visto na Seção 2.3, o valor da altura $z(x, y)$ estará compreendido no intervalo entre o início e o fim da modulação, onde o valor da amplitude da intensidade de modulação $A(z)$ for máximo.

O algoritmo utilizado nesse trabalho para a determinação de $z(x, y)$ considera que a modulação máxima está localizada no ponto médio do intervalo formado entre o início e o fim da modulação. Se a modulação em um ponto ocorrer em apenas uma posição espelho de referência, o algoritmo atribui essa posição ao valor de $z(x, y)$. Assim,

$$z(x, y) = \frac{z_{\min}(x, y) + z_{\max}(x, y)}{2} \quad (3.14)$$

onde:

$z(x, y)$: valor calculado para a altura z , do ponto (x, y) da imagem do objeto;

$z_{\min}(x, y)$: posição do espelho de referência onde inicia a modulação, ou seja, $A(z) > A_{\text{erro}}(z)$;

$z_{\max}(x, y)$: posição do espelho de referência anterior ao fim da modulação, ou seja, $A(z-1) > A_{\text{erro}}(z-1)$ e $A(z) < A_{\text{erro}}(z)$. A indicação $(z-1)$ representa a posição atual do espelho de referência menos 1 passo do deslocador mecânico.

A igualdade entre $z_{\min}(x, y)$ e $z_{\max}(x, y)$ é uma condição que pode ser definida pelo teorema da amostragem: se o valor do comprimento de coerência da fonte de luz L_c , for menor que duas vezes o passo do deslocamento linear do espelho de referência, a modulação pode ser detectada (pelo deslocamento do PZT).

Experimentalmente, ocorrem as seguintes situações:

- a) A modulação acontece em mais de uma posição do espelho de referência;
- b) A igualdade entre $z_{\min}(x, y)$ e $z_{\max}(x, y)$ pode acontecer, mesmo quando L_c for muito maior que o passo de deslocamento linear;
- c) A modulação pode não ser detectada em algum pixel, mesmo

considerando o teorema da amostragem.

A explicação para as situações a) e b) está relacionada com o contraste de interferência C . A Figura 3.12 ilustra um correlograma com baixo contraste.

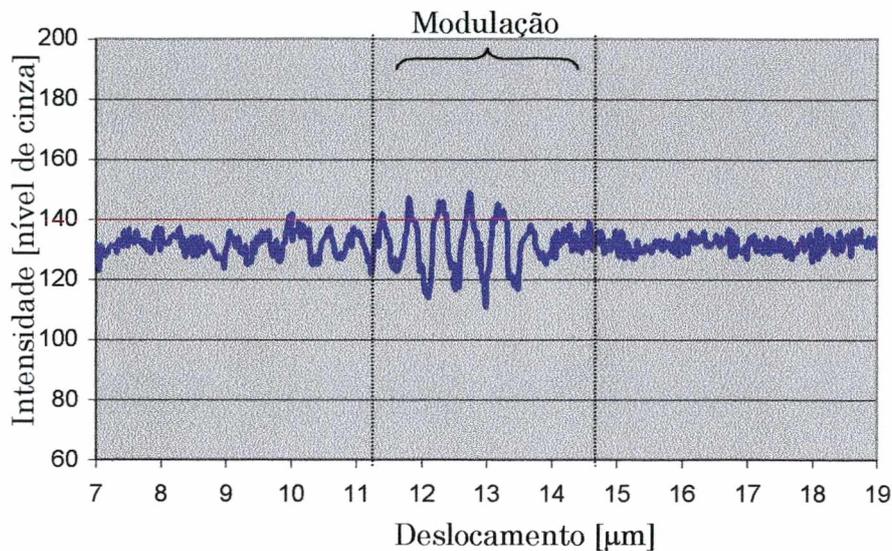


Figura 3.12 Correlograma com baixo contraste

Quando o contraste de interferência é pequeno, a detecção da região de modulação é crítica devido a proximidade entre $A(z)$ e $A_{\text{erro}}(z)$. Essa proximidade pode impossibilitar a dissociação da intensidade $I(z)$ do erro aleatório presente no sensor.

Existem algoritmos com diferentes princípios de detecção de $A(z)$ máximo [28], porém independente da técnica utilizada, o valor de $z(x, y)$ estará afetado por erros, seja pela metodologia, pelo ruído inserido no valor da intensidade $I(z)$ ou por qualquer outra fonte de erro presente no sistema de medição.

Um fluxograma simplificado do algoritmo desenvolvido nesse trabalho é mostrado na Figura 3.13.

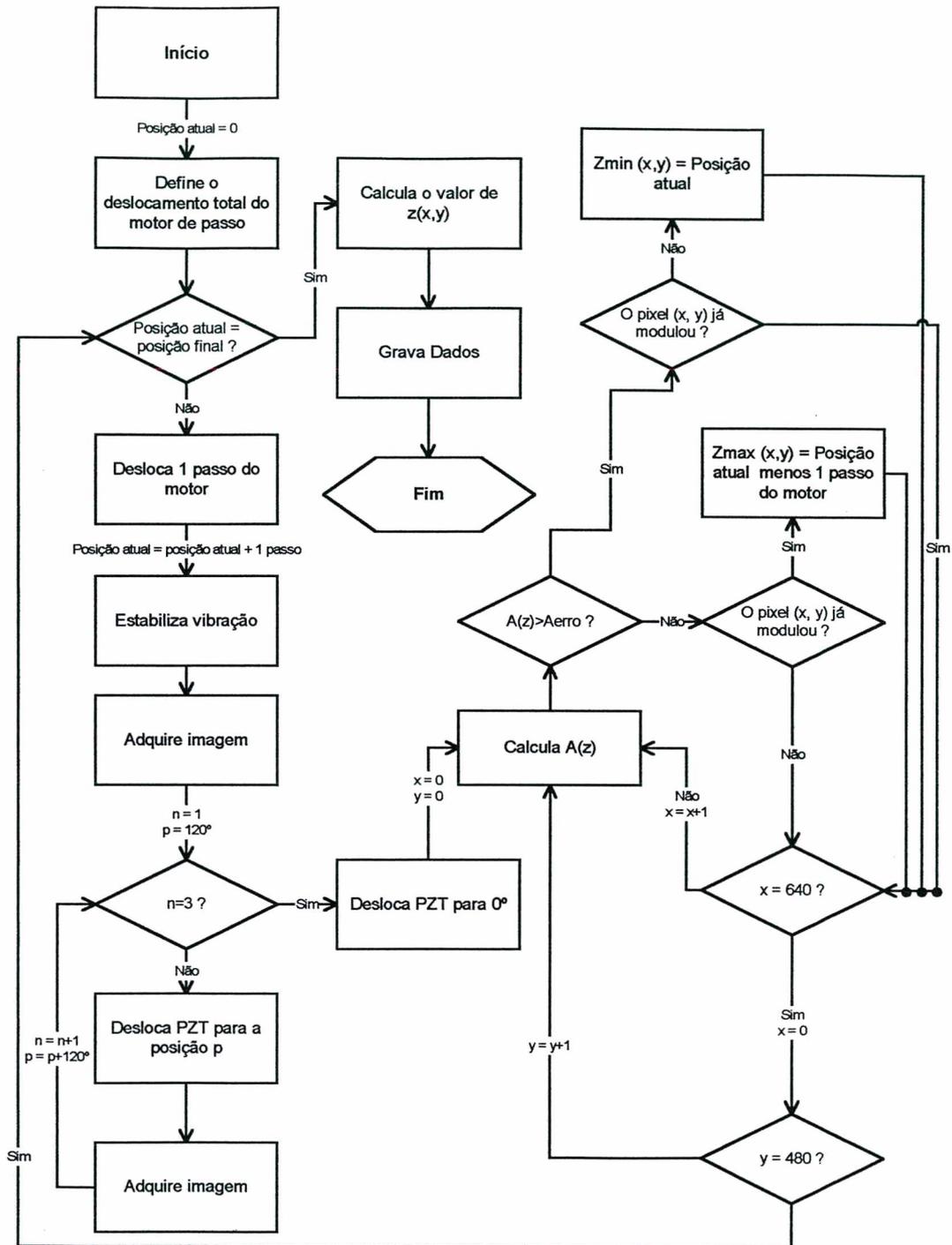


Figura 3.13 Fluxograma simplificado do algoritmo utilizado para medição de geometrias 3D

3.6 Geometrias 3D

Utilizando a teoria desenvolvida nesse capítulo foi possível a obtenção de algumas geometrias tridimensionais. Os objetos são: moeda de 1 centavo, placa de válvulas e uma composição de blocos padrão. Um desenho desta última pode ser visto na Figura 2.6 e será detalhado mais adiante no Capítulo 4. As fotos dos outros

objetos estão apresentados na Figura 3.14.

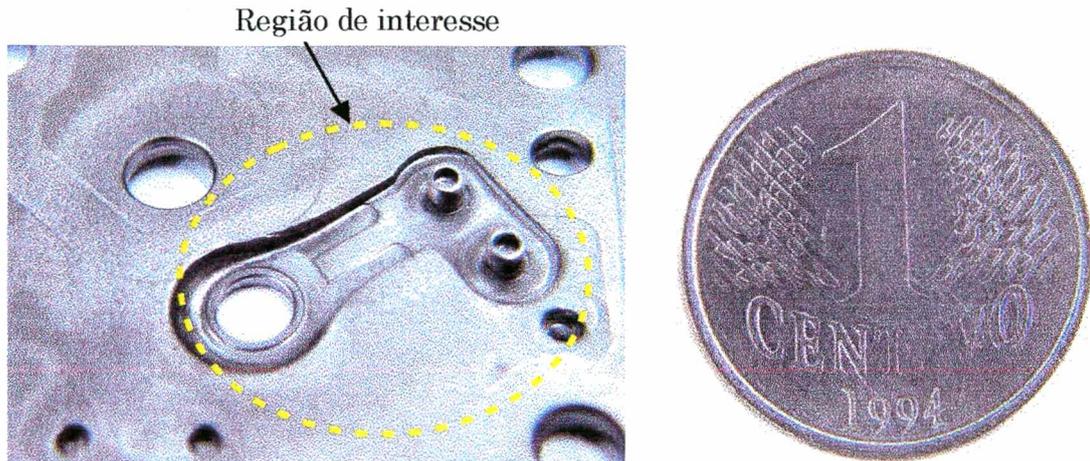


Figura 3.14 (a) Placa de válvulas e (b) moeda de 1 centavo

As especificações mais importantes da montagem experimental na medição dos objetos estão apresentadas na Tabela 3.2. Os valores da rugosidade estão apresentados qualitativamente pela ausência dos dados reais, mas mesmo assim possibilitam uma comparação entre os objetos.

Tabela 3.2 Objetos e especificações da montagem experimental utilizadas para medição de geometrias 3D

Nº	Objeto	L_c [μm]	u_i [mrad]	u_o [mrad]	Rugosidade
1	Moeda de 1 centavo	65	10	5,6	média (boa)
2	Região de uma placa de válvulas	5	5	5,6	alta (ruim)
3	Composição de blocos padrão	65	10	5,6	baixa (ótima)

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3.2, as especificações da montagem experimental foram idênticas para a medição da moeda e da composição de blocos padrão. A relação entre as aberturas numéricas de iluminação u_i e observação u_o , de acordo com o que foi visto na Seção 3.3, pode diminuir o contraste de interferência em alguns pontos.

O contraste também é afetado pela rugosidade. Pelos dados apresentados, a situação crítica foi na medição da placa de válvulas. Uma alta rugosidade diminui a quantidade de luz refletida pelo objeto e por isso, foi necessário utilizar uma banda de frequências mais larga na iluminação, diminuindo o valor do comprimento de

coerência L_c .

Devido a ajustes¹¹ na montagem experimental, no que diz respeito à colimação da fonte de luz, para a medição da região da placa de válvulas as aberturas numéricas atenderam à condição $u_0 \geq u_1$. A riqueza de detalhes na medição desse objeto está relacionada com os valores das aberturas numéricas e com a melhoria da focalização do objeto no CCD.

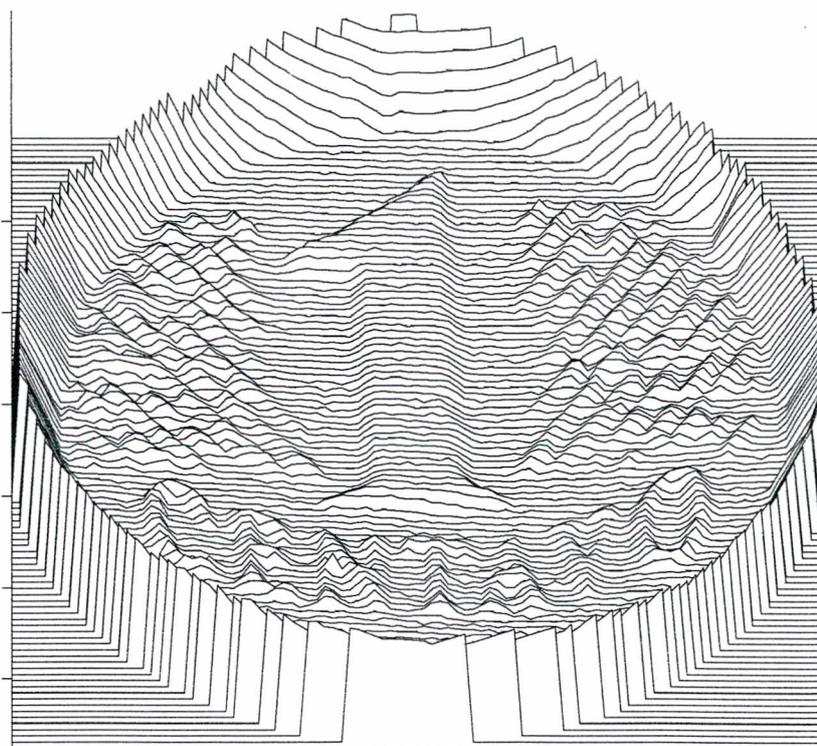


Figura 3.15 Vista isométrica de uma moeda de 1 centavo com diâmetro aproximadamente igual a 20 mm

¹¹ Os ajustes foram efetuados no término do trabalho, por isso não contribuíram para os resultados do balanço de incertezas.



Figura 3.16 Representação por cores da moeda de 1 centavo. A escala de cor está associada à altura do objeto

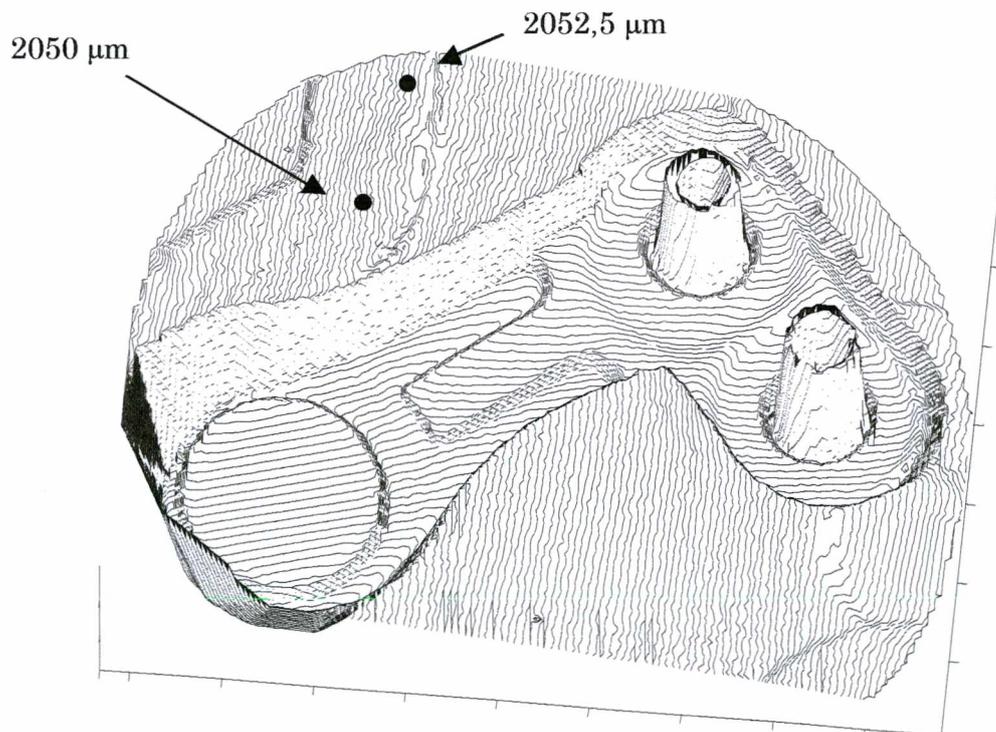


Figura 3.17 Vista isométrica da região da placa de válvulas

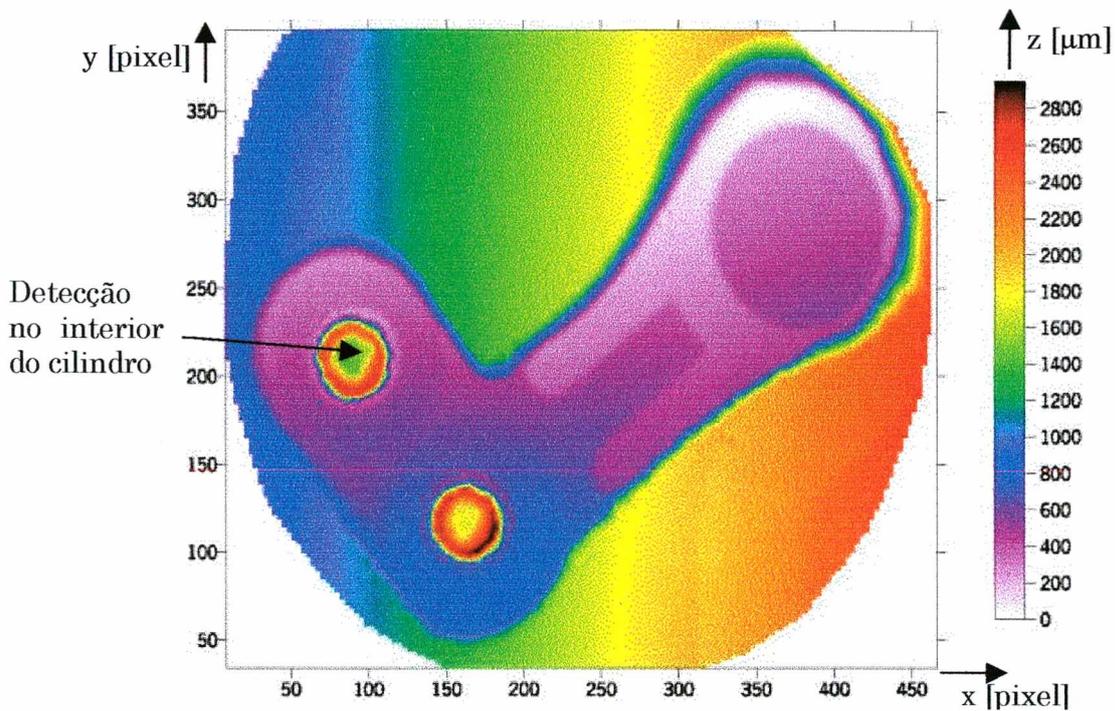


Figura 3.18 Representação por cores da região da placa de válvulas. A escala de cor está associada à altura do objeto

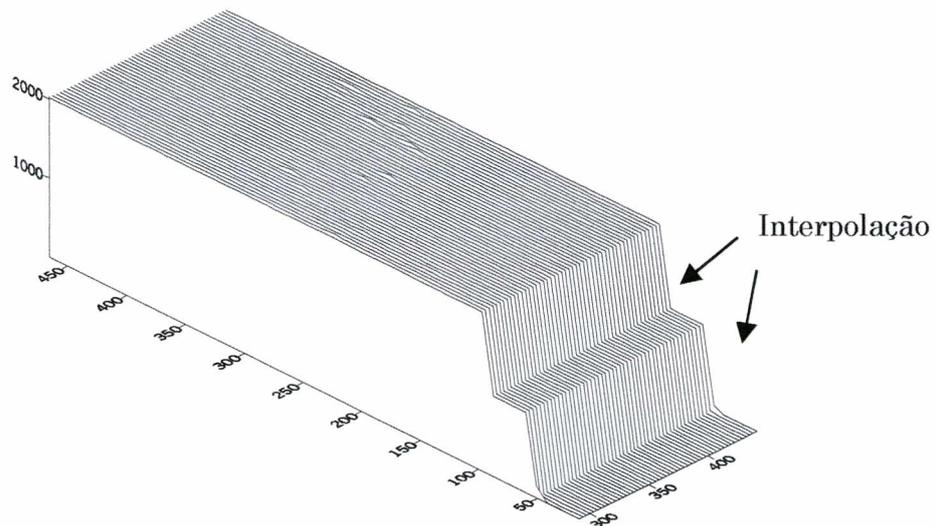


Figura 3.19 Vista isométrica da composição de blocos padrão

As figuras dos objetos mostradas foram criadas a partir das matrizes de dados gravadas pelo computador durante a medição da geometria 3D. Como a modulação não é detectada em todos os pontos, para gerar os gráficos o programa faz uma interpolação entre os pontos, incluindo aqueles que não modularam. A interpolação pode ser percebida nos desníveis apresentados na Figura 3.19. As imagens da Figura 3.20 mostram apenas os pontos que modularam nos objetos.

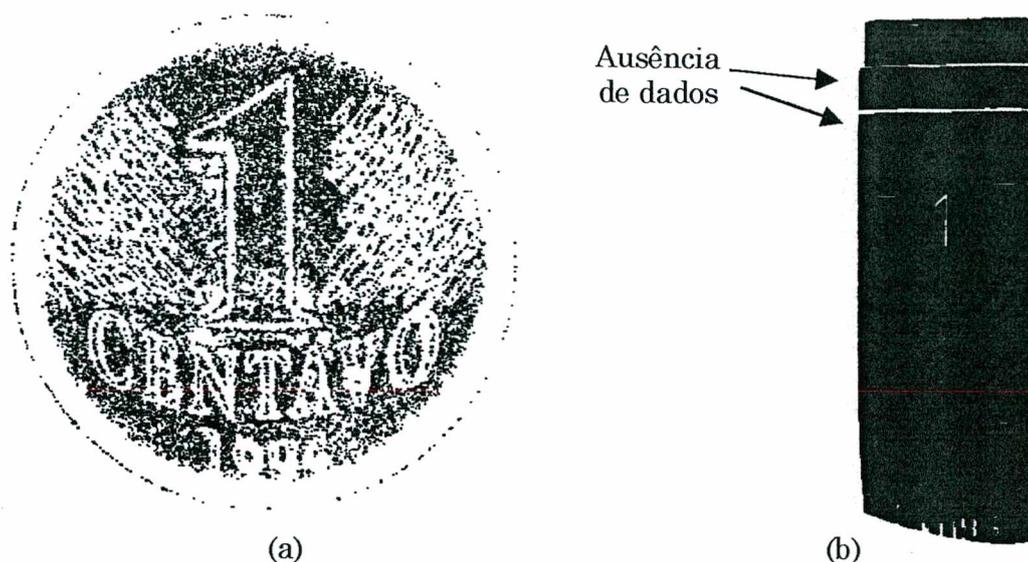


Figura 3.20 Pontos detectados durante a medição da geometria 3D da (a) moeda e da (b) composição dos blocos padrão

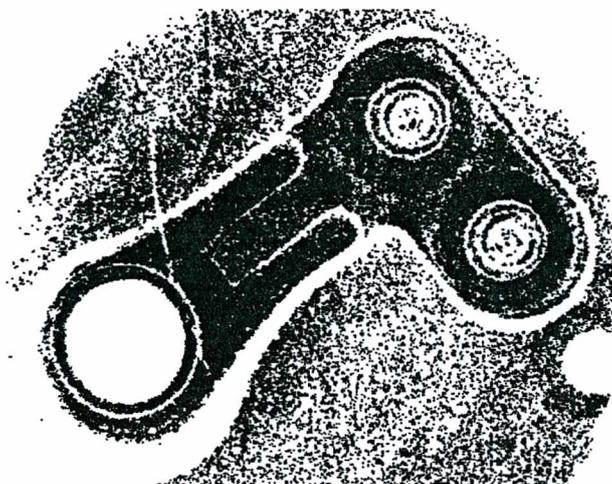


Figura 3.21 Pontos detectados durante a medição da geometria 3D da placa de válvulas

A Figura 3.20 mostra os pixels que sofreram modulação na medição da moeda e da composição de blocos padrão, cujas medições não sofreram alteração na montagem experimental. É possível perceber que a quantidade de informação obtida do objeto é afetada pela sua geometria e rugosidade.

As figuras mostradas apresentam muitas informações sobre as especificações da montagem experimental e do objeto. Essas informações serão detalhadas no Capítulo 4, durante a análise do resultado da medição. No momento, é importante mostrar duas principais vantagens da utilização desse método de medição:

- a) Resolução do sistema de medição;
- b) Medição de cavidades com paredes íngremes.

A resolução do sistema de medição é proporcional à resolução do deslocador mecânico. A Figura 3.17 ilustra a resolução do sistema de medição em dois pontos distintos do objeto.

A Figura 3.18 mostra que é possível detectar modulação em cavidades, no caso, regiões no interior do cilindro. Essa vantagem é obtida pelo processo de medição, que utiliza um feixe de luz paralelo cuja direção é idêntica ao do sensor de imagem para capturar as figuras de interferência e, conseqüentemente, as informações da geometria 3D.

As coordenadas x e y das imagens mostradas anteriormente estão expressas em pixels. Para expressá-las em unidades de comprimento, a relação entre o comprimento do mensurando (nos eixos x e y) e o número de pixels correspondentes na imagem capturada pelo sensor CCD deveria ser conhecida. Para isso, é necessário utilizar um outro sistema de medição capaz de efetuar essas medições.

Capítulo 4

O resultado da medição

A inexistência de sistemas de medição (SM) perfeitos e de mensurandos perfeitamente definidos e estáveis no tempo faz com que o resultado de qualquer medição esteja afetado por erros que se combinam e criam dúvidas acerca do resultado da medição.

A total eliminação dos erros é impossível, por isso quando se apresenta um resultado de uma medição é importante que seja dada uma indicação quantitativa da qualidade deste resultado.

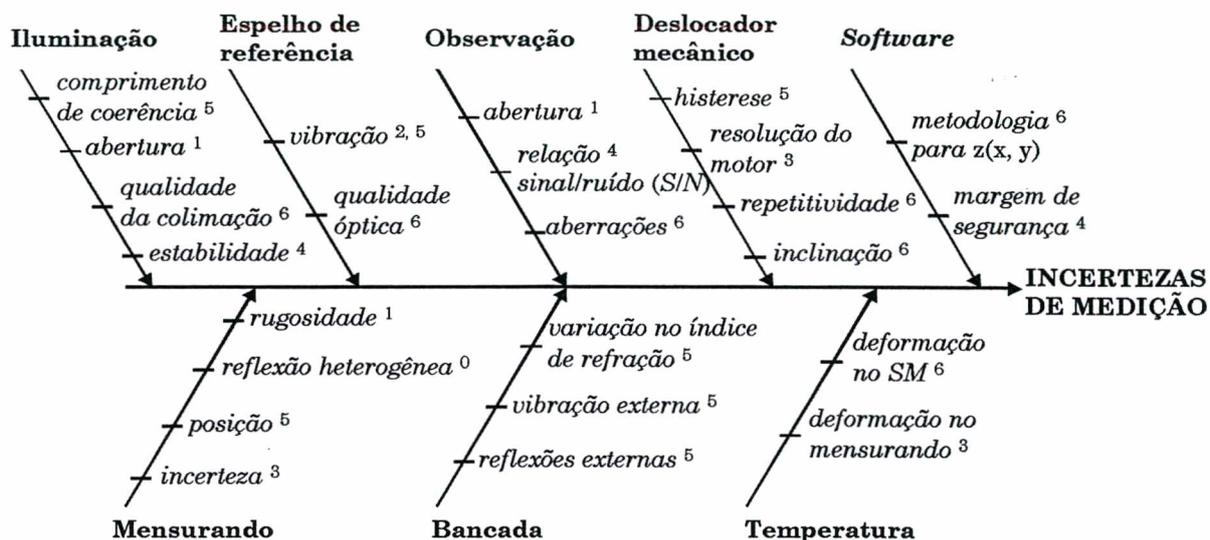
Com o sistema de medição proposto para medição de geometrias 3D não é diferente, podendo-se enumerar diversas fontes de erros. Essas fontes podem estar presentes em cada componente da montagem experimental, no algoritmo de medição e ainda podem ser atribuídas à má utilização do SM e às mudanças nas condições de contorno utilizadas durante a medição.

A automatização do SM já contribui para a eliminação do erro grosseiro atribuído ao operador. Outras vantagens tais como: tempo de medição, qualidade do processamento, melhor repetitividade do SM podem ser verificadas. Porém, apesar das vantagens é importante lembrar que todas as instruções executadas pelo computador foram criadas por um operador que não está isento de falhas.

Este capítulo traz informações a respeito das possíveis fontes de incertezas do processo de medição. Através da análise destas, são elaborados alguns ensaios para a otimização do processo de medição e, por fim, é apresentado o balanço de incertezas. Através desse capítulo podem ser obtidas informações para a elaboração de um procedimento de calibração, o qual está apresentado de forma didática.

4.1 Fontes de incerteza

A Figura 4.1 apresenta componentes da montagem experimental (parte superior) e condições de contorno (parte inferior) que podem influenciar o resultado da medição. Em cada item estão discriminadas algumas possíveis fontes de incerteza do processo de medição:



Legenda:

- 0 – Incerteza inserida no resultado da medição sem possibilidade de melhoria.
- 1 – Especificações para eliminar/atenuar os erros estão descritos no Capítulo 3 e nas referências bibliográficas;
- 2 – Dado experimental obtido com o interferômetro;
- 3 – Dados fornecidos por: especificações, calibração ou equações matemáticas;
- 4 – Testes modulares para quantificação;
- 5 – Testes para saber a influência na reprodutibilidade das medições;
- 6 – Incerteza inserida no resultado da medição com possibilidade futura de melhoria.

Figura 4.1 Possíveis fontes de incerteza do processo de medição

A divisão cartesiana utilizada na Figura 4.1 tenta relacionar as possíveis fontes de incerteza com componentes da montagem experimental ou com condições de contorno. Essa subdivisão é uma representação didática, pois sabe-se que algumas componentes estão correlacionadas, por exemplo: o comprimento de coerência (iluminação), a rugosidade (mensurando) e a metodologia para a determinação de z(x, y) (software) influenciam conjuntamente no resultado da medição.

Um outro exemplo de correlação está mostrado na Figura 4.2. Na imagem da superposição do espelho de referência e do mensurando da Figura 3.14(a) é possível identificar duas fontes de incerteza: qualidade óptica do espelho de referência¹ e reflexão heterogênea do mensurando. As duas aparecem combinadas no resultado da medição. Se o espelho for substituído por um de qualidade superior, a sua contribuição para a incerteza de medição será menor. A reflexão heterogênea do mensurando diminui com a inclinação da peça, porém não é totalmente eliminada. A reflexão seria mais homogênea se a superfície do mensurando fosse alterada, aumentando sua contribuição na incerteza de medição. Esta alteração na superfície envolve, por exemplo, a corrosão com ácido ou aplicação de camadas finas de dióxido de titânio e pó de giz.

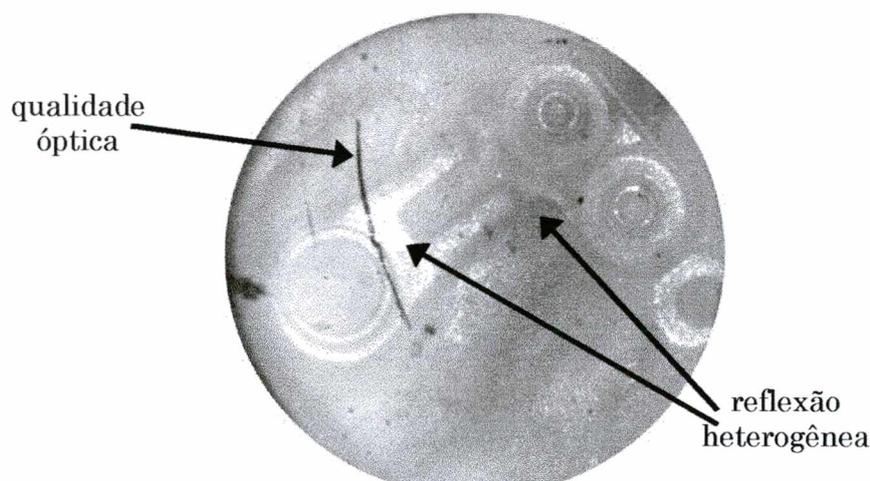


Figura 4.2 Imagem da superposição do espelho de referência e de um mensurando

Fontes de incertezas relacionadas com as coordenadas x e y da geometria do mensurando não foram discriminadas na Figura 4.1. Apesar desse sistema de medição apresentar uma geometria 3D como o resultado de uma medição, efetivamente apenas o valor da altura z do mensurando é medida. Os valores de x e y são obtidos diretamente da imagem capturada pelo sensor CCD, porém parâmetros como a resolução do sensor, a relação entre o comprimento do mensurando (nos eixos x e y) e o número de pixels correspondentes na imagem, contribuem para criar dúvidas acerca do resultado da medição. Por isso, em uma análise mais criteriosa, essas fontes de incertezas devem ser consideradas.

Como não é possível quantificar individualmente todas as fontes de incerteza, a metodologia utilizada para quantificá-la consiste em executar ensaios para a otimização do sistema e, por fim, estimar a incerteza combinada no resultado da

¹ A planeza é a grandeza que caracteriza a qualidade de paralelos ópticos [29]

medição.

O objeto com geometria padrão utilizado para os ensaios é a composição de blocos padrão ilustrada na Figura 2.6. Os dados do mensurando foram obtidos por calibração.

Na Figura 4.1 a legenda informa onde conseguir informações a respeito das possíveis fontes de incerteza. Algumas delas, já comentadas anteriormente, tiveram a sua influência diminuída sobre o processo de medição através de valores de especificações (1) ou de dado experimental (2). Outras tiveram os seus valores obtidos por calibração (3) ou serão comentadas posteriormente.

4.2 Ensaios para otimização do processo de medição

Para otimizar o processo de medição são efetuados dois diferentes ensaios:

- a) Determinação da margem de segurança;
- b) Reprodutibilidade das medições.

O primeiro ensaio, essencial para o funcionamento do SM, relaciona as fontes de incerteza classificadas como (4). Conforme a Seção 3.5.1, a variação aleatória no valor obtido da intensidade luminosa no sensor CCD dificulta a detecção da modulação, para isso foi criado um artifício matemático. Quando a amplitude da intensidade de modulação (A) for maior que a amplitude da intensidade do erro (A_{erro}) está havendo interferência e o ponto (x, y, z) da geometria 3D pode ser obtido.

O segundo ensaio mede o grau de concordância entre os resultados das medições do mensurando efetuadas sob condições variadas de medição. As condições alteradas são fontes de incerteza, classificadas como (5) na Figura 4.1 e estão mostradas na Tabela 4.1.

O teste (i) está relacionado com a histerese presente no deslocamento do espelho de referência. O teste é executado para determinar se ela existe e para saber qual o sentido de deslocamento do espelho que menos contribui com a dispersão no resultado da medição.

O algoritmo desenvolvido para a medição de geometrias 3D considera o menor valor da altura $z(x, y)$ como sendo zero, ou seja, ele elimina o *offset*. Porém, os erros de alinhamento não são compensados, por isso a posição do mensurando (ii) influencia o resultado da medição. A influência pode ser vista nas diferentes imagens de interferência formadas na superfície do objeto, mostradas na Figura 4.3.

Tabela 4.1 Teste de reprodutibilidade

Nº	Condições alteradas	Condições de teste	
i	Sentido de deslocamento do espelho de referência	Aproxima	Afasta
ii	Posição do mensurando	Fixa	Variável
iii	Tempo de estabilização da vibração do espelho de referência	800 ms	200 ms
iv	Estado da bancada sob o SM	Com ar	Sem ar
v	Proteção contra: variação no índice de refração e reflexões externas	Com proteção	Sem proteção
vi	Comprimento de coerência	65 μm	5 μm



Figura 4.3 Imagens de interferência na superfície do mensurando em 5 medições independentes. A posição do objeto é alterada para testar a reprodutibilidade da medição.

De acordo com o que foi visto na Seção 3.4.2, o tempo de estabilização foi estimado em 800 ms. No teste (iii) o tempo de estabilização será reduzido para 200 ms para testar a robustez do SM em relação a um interferômetro.

Em (iv), o teste de reprodutibilidade quantifica a suscetibilidade do SM para vibrações externas (sem ser àquelas provocadas pelo deslocamento do espelho de referência). As vibrações são amortecidas quando a bancada está isolada pneumaticamente.

A utilização de um interferômetro para medir índices de refração mostra a sensibilidade desse instrumento para variações dessa grandeza. Essas variações podem comprometer a medição de geometrias 3D, por isso em (v) é posto à prova sua sensibilidade para essas variações. Além disso, a proteção utilizada contra o fluxo de ar também protege o sistema contra as reflexões externas, causadas, por exemplo, pelas variações da luminosidade da sala de medição, por transeuntes perto da bancada e pelo monitor do computador próximo do SM.

Em (vi) são efetuadas medições com dois valores de comprimento de coerência L_c da fonte de luz. A detecção da altura de um ponto do mensurando é determinada pela interferência naquele ponto, que é função do comprimento de coerência. Por isso

esse teste tem por objetivo comparar a dispersão entre os dois valores, causada não só pelo valor de L_c , mas também pela metodologia utilizada para a determinação de $z(x, y)$.

4.2.1 Determinação da margem de segurança

A determinação experimental do valor da margem de segurança MS foi feita através de medições de geometrias 3D com diferentes valores de MS. Esses valores, contidos num intervalo entre 0 e 30 [níveis de cinza], foram testados e alguns resultados estão apresentados a seguir. A geometria 3D em teste é a inscrição “1996” de uma moeda de 1 centavo, similar a apresentada na Figura 3.14 (b).

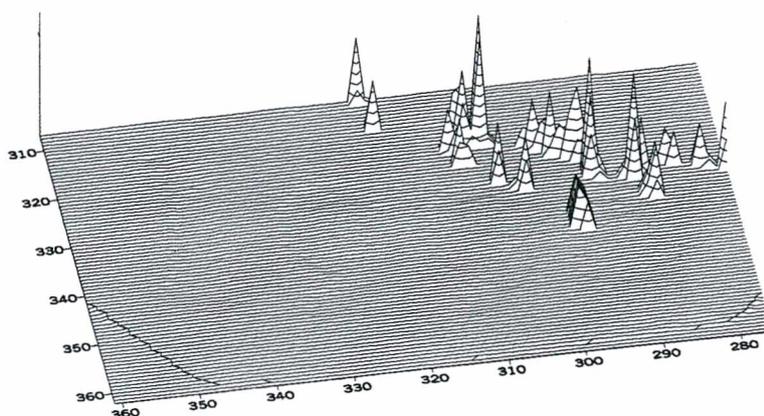


Figura 4.4 Medição com a margem de segurança igual a 5

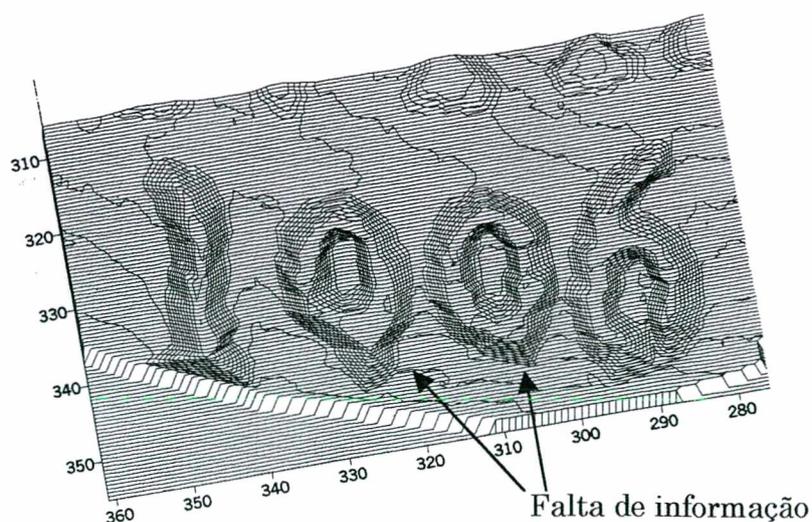


Figura 4.5 Medição com a margem de segurança igual a 14

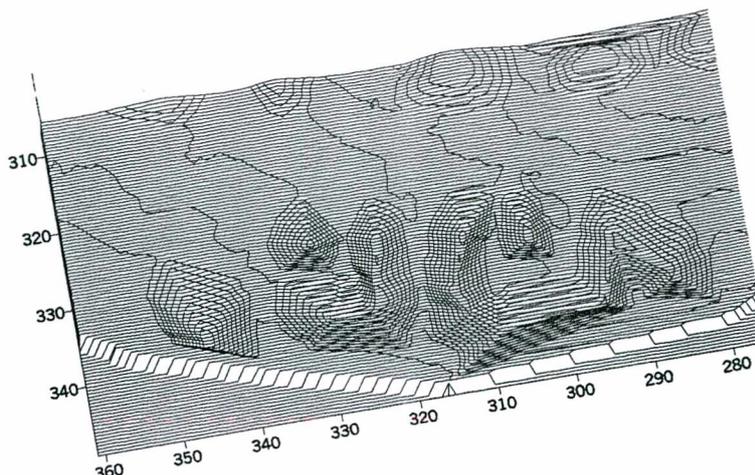


Figura 4.6 Medição com a margem de segurança igual a 30

A Figura 4.4 mostra uma medição completamente afetada pela componente aleatória da intensidade luminosa nos pixels do sensor CCD.

A Figura 4.5 já mostra a geometria 3D do mensurando com muitos detalhes, porém percebe-se que, principalmente no número “99”, o *software* não consegue detectar modulação em todos os pontos da imagem. Isso se deve ao fato de que o valor da amplitude da intensidade de modulação (A) foi menor que a amplitude da intensidade do erro (A_{erro}), devido ao baixo contraste de interferência C .

E na Figura 4.6 a geometria 3D não é distinguível e percebe-se que a amplitude A_{erro} filtrou mais informação do que era necessário.

A escolha do valor da margem de segurança deve considerar o meio termo entre quantidade e qualidade da informação. O melhor resultado obtido entre várias medições consecutivas foi com $MS = 14$. Esse valor foi estimado como ótimo, pois não permitiu a formação de picos, como na Figura 4.4, nem uma filtragem excessiva, como na Figura 4.6. Apesar desse valor não permitir que o *software* obtenha informações de todos os pontos do mensurando, o que gera uma incerteza acerca do resultado da medição, a geometria 3D obtida foi a que melhor representou o mensurando.

4.2.2 Reprodutibilidade das medições

A composição dos blocos padrão é formada por blocos metálicos com os seguintes comprimentos nominais: 50,000 mm, 1,008 mm e 1,000 mm.

Para a análise dos testes de reprodutibilidade foram escolhidos 25 pontos localizados nas superfícies de medição dos blocos, que formam as superfícies: 0, 1 e 2, com as alturas: 0 μm (referência), 1008 μm e 2008 μm , respectivamente. A

Figura 4.7 ilustra o mensurando.

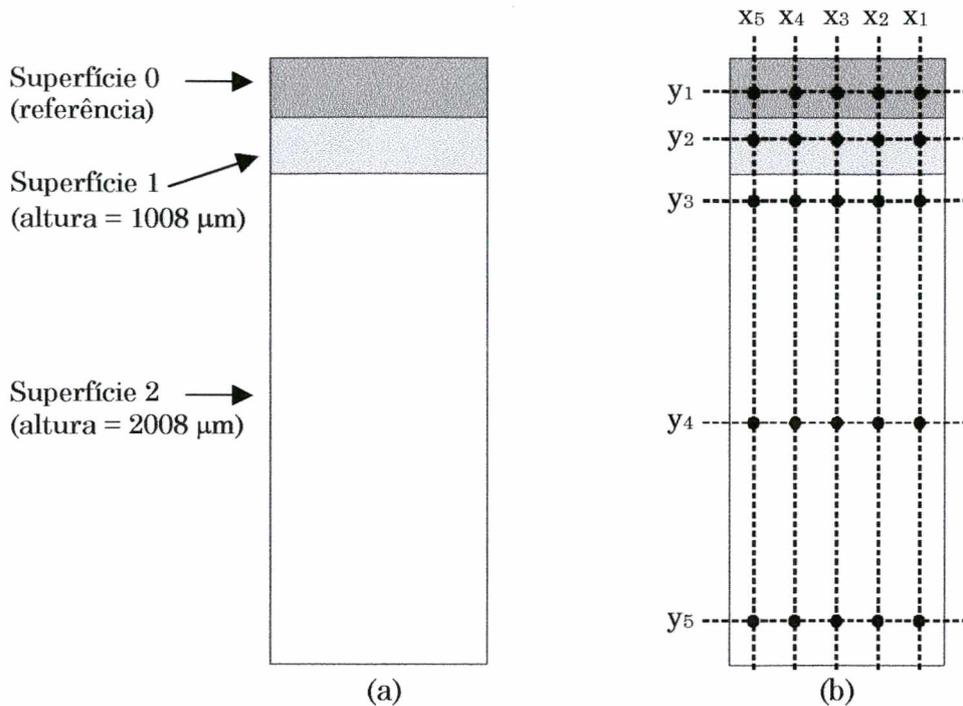


Figura 4.7 Composição dos blocos padrão. (a) Ilustração das superfícies com suas alturas nominais e (b) a distribuição dos 25 pontos no mensurando

São realizadas 5 medições para cada condição de teste de reprodutibilidade. A comparação é feita através da curva de erros, que avalia o comportamento do valor de z medido para cada ponto (x, y) do mensurando.

A curva de erros é formada pelos valores calculados para a tendência e a repetitividade do SM. A tendência, que é a estimativa do erro sistemático, é dada pela Equação 4.1:

$$T_d = MI - VVC \quad (4.1)$$

onde:

T_d: tendência;

MI: média das indicações;

VVC: valor verdadeiro convencional.

A Repetitividade, faixa de dispersão dentro da qual se situa o erro aleatório, é dada pela Equação 4.2:

$$Re = \pm t \cdot s \quad (4.2)$$

onde:

Re: repetitividade;

t: coeficiente “t” de Student igual a 2,776 (para 5 medidas e 95% de probabilidade);

s: desvio padrão experimental da amostra.

O desvio padrão da amostra é determinado pela Equação 4.3:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (z_i - MI)^2}{4}} \quad (4.3)$$

onde:

z_i : valor de z da “ i ésima” medição.

A Tabela 4.2 apresenta os valores da tendência e do desvio padrão experimental para todos os 25 pontos do mensurando, obtidos no teste de reprodutibilidade deixando fixa a sua posição em todas as medições.

Tabela 4.2 Valores da tendência e do desvio padrão experimental no teste de reprodutibilidade deixando fixa a posição do mensurando em todas as medições

Td [μm]						s [μm]					
	X1	X2	X3	X4	X5		X1	X2	X3	X4	X5
y ₁	3,25	3,00	2,75	2,00	2,50	y ₁	1,12	0,68	0,56	0,68	0,88
y ₂	8,25	7,75	7,00	6,75	6,00	y ₂	0,00	0,68	0,00	0,56	0,56
y ₃	11,00	10,50	10,00	9,25	8,75	y ₃	1,05	1,05	0,68	0,56	0,68
y ₄	12,25	11,25	11,25	11,00	11,00	y ₄	1,05	0,68	0,68	1,05	1,05
y ₅	11,75	11,50	11,25	11,50	11,00	y ₅	1,63	0,68	0,68	1,43	1,05

A seguir são apresentados alguns gráficos dos resultados obtidos. Para cada condição alterada é apresentado um gráfico para uma linha (y_4) e cinco colunas (x_1 a x_5), com as duas condições testadas.

Preliminarmente, pode-se testar a existência da histerese. A Figura 4.8 ilustra a diferença entre as médias das 5 medições nos dois sentidos de deslocamento do espelho de referência. Apesar de existir histerese, a ordem de grandeza é muito pequena, inferior à resolução do deslocador mecânico, por isso o sentido de deslocamento preferencial será determinado pela melhor condição no teste de reprodutibilidade, mostrado na Figura 4.9.

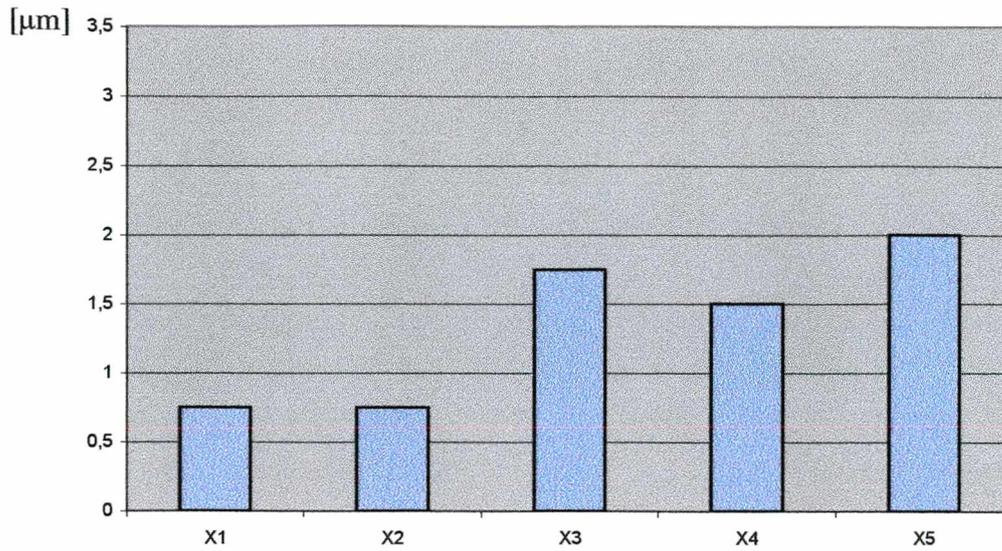


Figura 4.8 Histerese calculada para cinco pontos da linha y_4

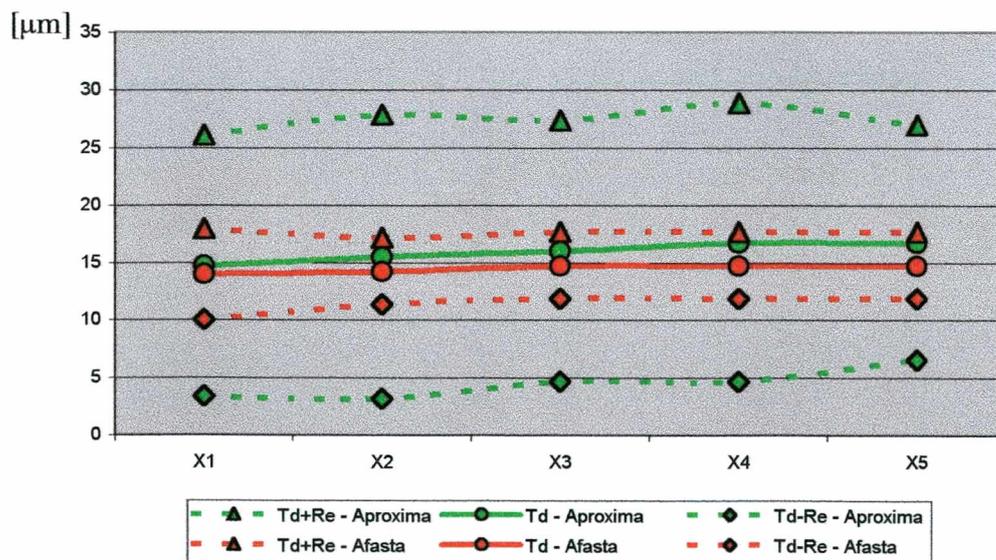


Figura 4.9 Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se o sentido de deslocamento do espelho de referência

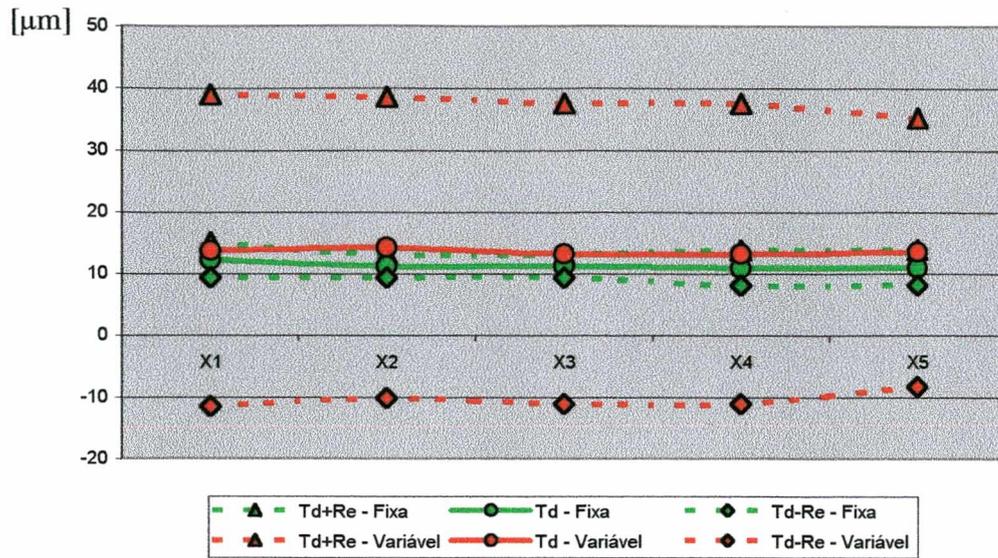


Figura 4.10 Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se a posição do mensurando

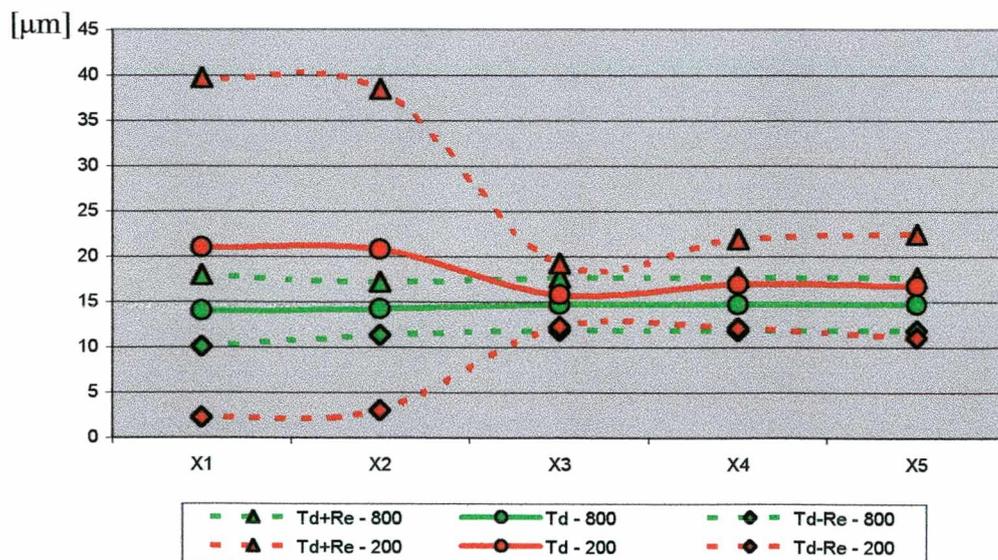


Figura 4.11 Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se o tempo de estabilização da vibração do espelho de referência

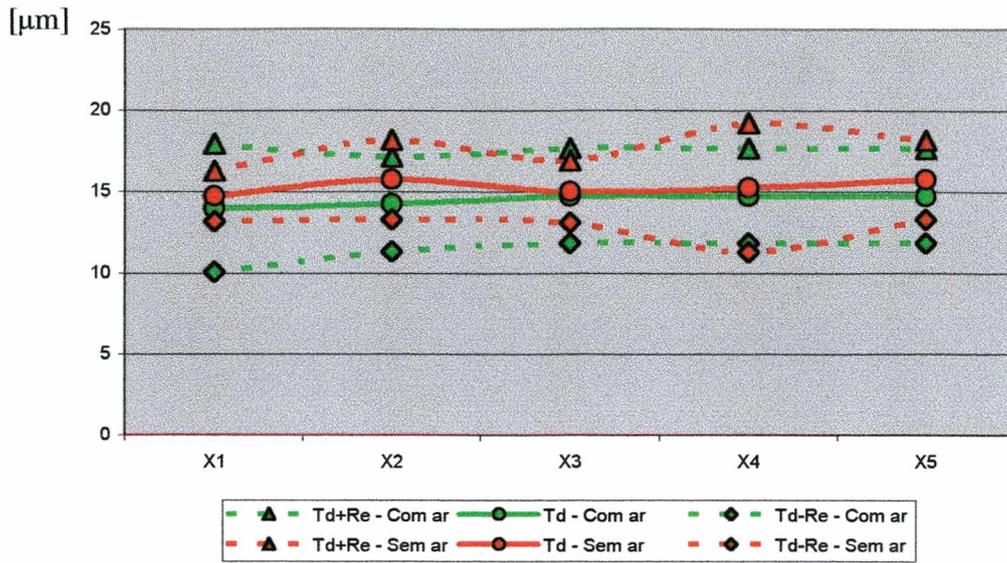


Figura 4.12 Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se o estado da bancada sob o sistema de medição

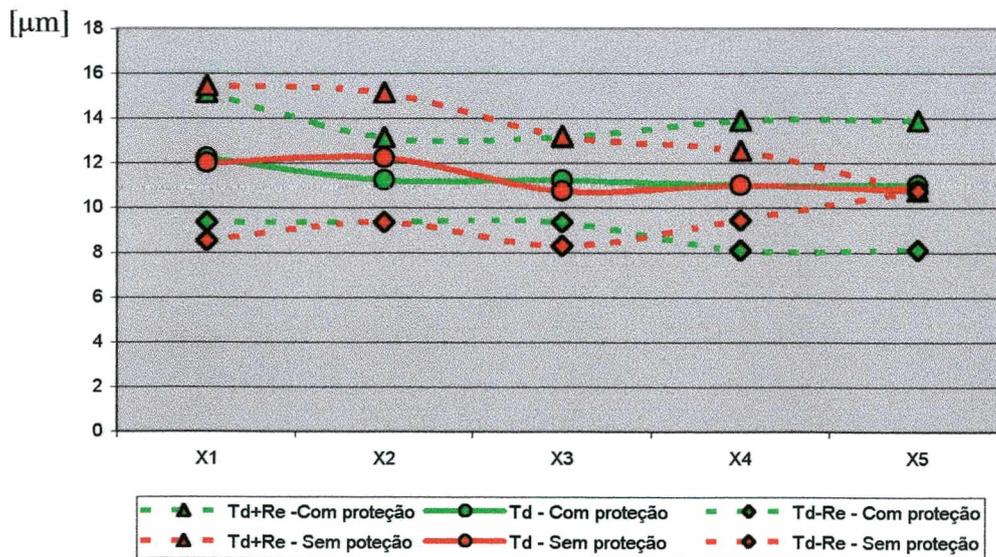


Figura 4.13 Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se a proteção contra variação no índice de refração e reflexões externas

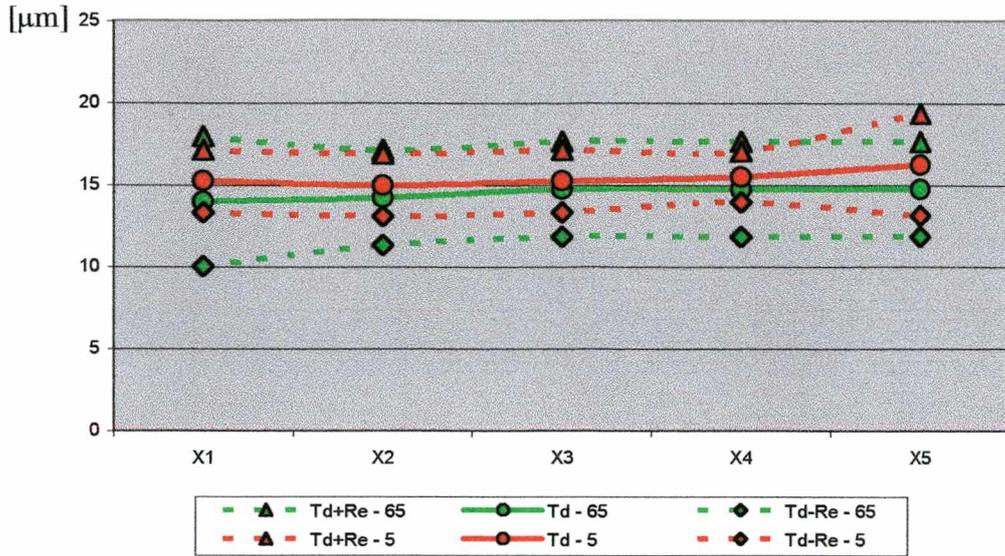


Figura 4.14 Resultado do teste de reprodutibilidade para cinco pontos da linha y_4 alterando-se o comprimento de coerência

Com o intuito de ajudar na comparação dos resultados é apresentado na Tabela 4.3 o valor do erro máximo para cada condição do teste de reprodutibilidade, definido como a faixa de valores em torno do zero que, com uma probabilidade definida (95%), contém o maior erro do qual pode estar afetada qualquer indicação apresentada pelo SM.

Tabela 4.3 Erro máximo no teste de reprodutibilidade

Nº	Condições alteradas	Condições de teste	
		Erro máximo [μm]	
i	Sentido de deslocamento do espelho de referência	Aproxima	Afasta
		29,5	22,4
ii	Posição do mensurando	Fixa	Variável
		16,3	38,9
iii	Tempo de estabilização da vibração do espelho de referência	800 ms	200 ms
		22,4	43,5
iv	Estado da bancada sob o SM	Com ar	Sem ar
		22,4	22,9
v	Proteção contra: variação no índice de refração e reflexões externas	Com proteção	Sem proteção
		16,3	15,5
vi	Comprimento de coerência	65 μm	5 μm
		22,4	21,9

Os resultados apresentados na Tabela 4.3 mostram que o resultado da medição de um mesmo mensurando sofre uma dispersão menor quando as seguintes condições são utilizadas:

- i. O espelho de referência é deslocado de forma que ele se afaste do divisor de feixe;
- ii. A posição do mensurando é a mesma em todas as medições;
- iii. O tempo de estabilização da vibração do espelho de referência é o mesmo que foi determinado experimentalmente com o interferômetro de Michelson.

A dispersão apresentada pelos testes: iv, v e vi; podem ser consideradas equivalentes por serem menor que a resolução do deslocador mecânico ($2,5 \mu\text{m}$).

Os testes de reprodutibilidade apresentaram uma superfície de tendência similar a apresentada na Figura 4.15, que mostra a tendência nos 25 pontos do mensurando, fixo nas 5 medições.

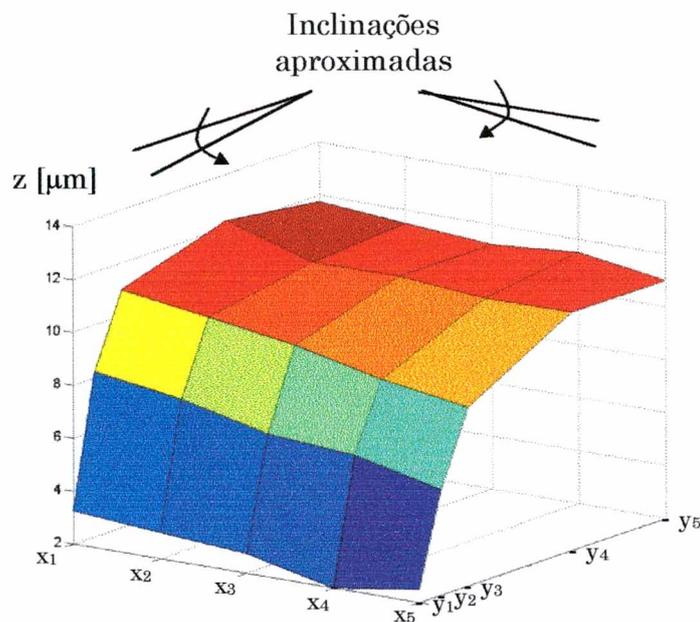


Figura 4.15 Superfície da tendência em um teste de reprodutibilidade

A superfície da Figura 4.15 apresenta uma combinação de pelo menos duas fontes de erro sistemático no resultado da medição. A primeira é que o mensurando está inclinado em relação ao espelho de referência. Essa inclinação juntamente com uma colimação imperfeita criam no mensurando uma região de sombra, que impossibilita a detecção da modulação e, conseqüentemente, a obtenção dos valores de $z(x, y)$ nessas regiões.

O perfil do mensurando está ilustrado na Figura 4.16.

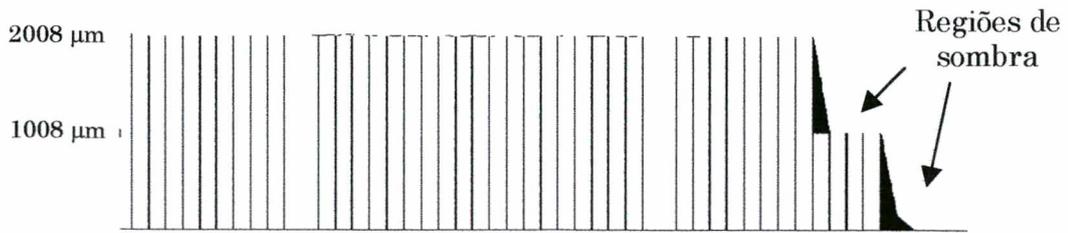


Figura 4.16 Perfil do mensurando

A inclinação pode ser calculada e corrigida através de um procedimento de calibração do SM. A correção seria aplicada por *software* através de rotações nos eixos *x* e *y* dos valores de *z* obtidos na medição com a peça inclinada. Todavia, as regiões de sombra não são eliminadas através desse procedimento. O efeito da correção em uma superfície de um bloco padrão de cerâmica está ilustrado na Figura 4.17.

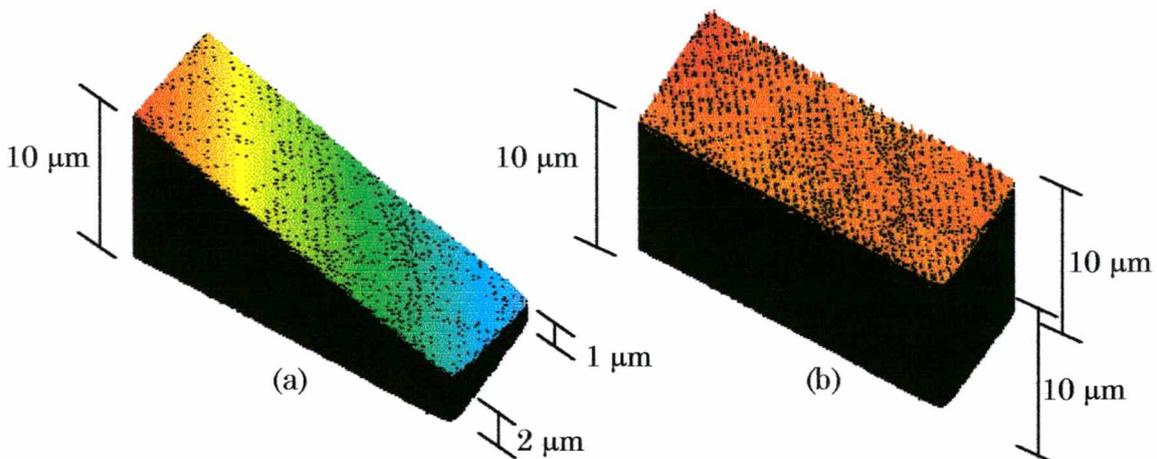


Figura 4.17 (a) Superfície inclinada de um bloco padrão de cerâmica e (b) a inclinação corrigida por *software*

A segunda fonte de erro está relacionada com a ordem de grandeza dos valores da tendência para cada superfície do mensurando. Analisando as Figuras 4.7 e 4.15 percebe-se que as superfícies: 0, 1 e 2 tiveram valores de tendência aproximadamente iguais a: 4 μm, 8 μm e 12 μm, respectivamente. Esse erro acumulado ao longo do deslocamento em *z* pode estar relacionado com:

- o deslocador mecânico;
- a composição dos blocos padrão;
- os componentes ópticos.

O desempenho do deslocador mecânico e o erro devido à composição dos

blocos padrão podem ser avaliados através de calibrações. Se o valor da tendência for significativo, pode ser feita uma estimativa do valor da correção ao longo da faixa de deslocamento. Esse valor pode ser utilizado na calibração do SM. Se o valor da tendência não for significativo, devem ser elaborados procedimentos para testar a influência dos componentes ópticos no resultado da medição.

4.3 Balanço de incertezas

Os ensaios executados anteriormente permitiram achar uma condição ótima para o processo de medição, considerando-se os componentes da montagem experimental do SM e a bancada sob o SM como grandeza de influência externa. Essa condição de ensaio é utilizada para o balanço de incertezas, que é um procedimento para estimar a correção combinada e a incerteza expandida associadas a um processo de medição onde mais de uma fonte de incerteza esteja envolvida [30].

A correção combinada pode ser aplicada automaticamente em um processo de calibração do SM, por isso, esse trabalho utiliza o balanço de incertezas para estimar apenas a incerteza expandida.

A incerteza expandida é composta da combinação dos efeitos aleatórios conhecidos de cada fonte de incerteza que afeta o processo de medição e contém ainda componentes relacionados com a falta de informação sobre algumas das fontes de incerteza.

Em relação ao mensurando, pode-se enumerar pelo menos quatro fontes de incerteza associadas a cada bloco padrão:

1. Variação de comprimento (VC);
2. Erro do meio (EM);
3. Incerteza do bloco padrão (BP);
4. Variação do comprimento devido à temperatura (ΔL).

A variação do comprimento (1) é a combinação dos erros de paralelismo e planeza, e corresponde a diferença entre o maior e o menor comprimento entre as faces do bloco padrão quando medido nos quatro cantos e no centro.

O erro do meio (2) é a diferença entre o comprimento efetivo do bloco padrão na região central e o comprimento nominal.

A incerteza do bloco padrão (3) é a incerteza relacionada ao valor atribuído a ele na calibração. Essa incerteza é influenciada por componentes utilizados na sua calibração, tais como: os padrões, o SM, os procedimentos, a temperatura, entre

outros.

Os valores para essas fontes de incerteza foram obtidos por calibração para cada bloco padrão e estão mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Dados de calibração do mensurando obtidos através de 3 medições a uma temperatura de $(20,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$

Comprimento nominal [mm]	Erro do meio [μm]	Variação do comprimento [μm]	Incerteza da calibração do bloco padrão [μm]
50,000	-0,13	0,05	0,07
1,008	0,03	0,05	0,05
1,000	0,06	0,06	0,05

De acordo com [31] o erro devido à composição de blocos padrão deve ser calculado a partir dos erros do meio dos blocos padrão que formam a composição do comprimento em questão. Para a aplicação no SM proposto, que utiliza não só o comprimento entre as superfícies de medições dos blocos padrões, mas também o paralelismo e a planeza, essa afirmação não se aplica. Analisando a ordem de grandeza dos valores para o EM e a VC mostrados na Tabela 4.4, e considerando que é utilizada apenas uma superfície do bloco com 50 mm de comprimento nominal, será considerado no balanço de incertezas apenas a VC.

A ordem de grandeza dos dados gerados pela calibração dos blocos padrão é muito pequena, induzindo um pequeno valor no erro devido à composição dos blocos padrão. Na Seção 4.2.2 a composição dos blocos foi indicada como uma possível fonte de erro sistemático. Essa indicação considera que podem existir películas finas entre as superfícies dos blocos, que contribuem para a tendência no resultado da medição. A calibração sugerida para avaliar a componente sistemática considera a composição dos blocos padrão e não a calibração individual, como foi executada para fornecer a Tabela 4.4.

Devido ao material utilizado na fabricação dos blocos padrão, os comprimentos dos blocos sofrem alterações pela influência da temperatura (4). Essa variação é dada pela Equação 4.4.

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (4.4)$$

onde:

ΔL : variação do comprimento devido à temperatura;

L_0 : comprimento na temperatura de calibração;

α : coeficiente de expansão térmica do bloco padrão (igual a $11,5 \cdot 10^{-6}/K$ para o aço);
 ΔT : variação da temperatura.

A combinação dessas três fontes de incerteza em cada bloco padrão, associadas à resolução do deslocador mecânico e à variação aleatória dos valores de $z(x, y)$ para cada ponto, fornece a incerteza padrão combinada (estimada para 1 desvio padrão – aproximadamente 68% de probabilidade). Essa incerteza padrão combinada resulta do cálculo das incertezas padrão de cada fonte de incerteza.

A incerteza padrão da variação aleatória para os valores de $z(x, y)$ é determinada pela avaliação do tipo A [32], que utiliza o desvio padrão experimental de 5 medidas para estimar o seu valor. A incerteza padrão tipo A (u_A) é calculada por:

$$u_A = \frac{s(z)}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

onde:

$s(z)$: desvio padrão experimental dos valores de $z(x, y)$;

n : número de medições.

O valor de n é igual a 1, pois pretende-se estimar a incerteza padrão combinada para uma única medição.

O erro presente no resultado da medição devido à resolução do deslocador mecânico pode ser modelado por meio de uma distribuição retangular, centrada no zero, e limites extremos dados pela metade do valor da resolução, assim a incerteza padrão (u_R) é calculada como:

$$u_R = \frac{2,5}{2\sqrt{3}} \quad (4.6)$$

Similarmente, a incerteza padrão da variação de comprimento de um bloco padrão (u_{VC}) e a incerteza padrão devido à variação de temperatura (u_T) são calculadas por:

$$u_{VC} = \frac{VC}{2\sqrt{3}} \quad (4.7)$$

$$u_T = \frac{\Delta L}{2\sqrt{3}} \quad (4.8)$$

A avaliação do tipo A já está influenciada pela resolução do deslocador mecânico, por isso a Equação 4.6 não será incluída no procedimento para o cálculo da incerteza padrão combinada.

A incerteza do bloco padrão fornecida pela calibração é uma incerteza com um

nível de confiança de 95%. Para utilizá-la no cálculo da incerteza padrão combinada o seu valor deve ser dividido pelo coeficiente de Student, também denominado de fator de abrangência. Assim, a incerteza padrão fica:

$$u_{BP} = \frac{BP}{k_{95\%}} \quad (4.9)$$

onde:

$k_{95\%}$: fator de abrangência igual a 2 (para infinitas medições e 95% de probabilidade);

A incerteza padrão combinada (u_c) da influência de várias fontes de incerteza pode ser estimada por:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_m^2} \quad (4.10)$$

onde:

u_1, u_2, \dots, u_m representam as incertezas padrão de cada uma das “m” fontes de incertezas.

Para se trabalhar com um nível de confiança maior, a incerteza expandida é calculada multiplicando-se o valor da incerteza padrão combinada por um fator de abrangência, calculado a partir do número de graus de liberdade efetivo.

O “Guia para a expressão da incerteza de medição” [33] recomenda a utilização da equação de Welch-Satterthwaite para estimar o número de graus de liberdade efetivo:

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_m^4}{v_m} \quad (4.11)$$

onde:

v_1, v_2, \dots, v_m são os números de graus de liberdade de cada uma das “m” fontes de incerteza;

v_{ef} é o número de graus de liberdade efetivo associado à incerteza padrão combinada.

Para sistematizar o procedimento para estimar a incerteza expandida associada ao processo de medição, as informações das diversas fontes de incertezas para pontos distintos do mensurando são organizadas em planilhas de avaliação.

Utilizando-se os dados apresentados na Tabela 4.2 e sabendo-se que as condições de ensaio foram:

- Sentido de deslocamento = afasta;
- Posição do mensurando = fixa;
- Tempo de estabilização da vibração do espelho de referência = 800 ms;
- Estado da bancada sob o SM = com ar;
- Montagem experimental com proteção contra variação no índice de

refração e reflexões externas;

- Comprimento de coerência = 65 μm ;
- Temperatura ambiente na medição = $(21,5 \pm 1,5) ^\circ\text{C}$,

são apresentadas abaixo as planilhas de avaliação para os pontos (x_2, y_1) , (x_2, y_2) e (x_2, y_4) , das superfícies 0, 1 e 2, respectivamente.

Tabela 4.5 Planilha de avaliação para o ponto (x_2, y_1)

Fontes de incertezas da superfície 0		Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Valor bruto [μm]	Tipo de distribuição	Divisor	u [μm]	v
u_A	Avaliação do tipo A	0,684	normal	1	0,684	4
VC_0	Variação de comprimento do bloco da superfície 0	0,05	retangular	$2\sqrt{3}$	0,014	2
BP_0	Incerteza do bloco padrão da superfície 0	0,07	normal	2	0,035	∞
u_C	Incerteza padrão combinada		normal		0,685	4
$U_{95\%}$	Incerteza expandida		normal	$k = 2,869$	1,967	

Tabela 4.6 Planilha de avaliação para o ponto (x_2, y_2)

Fontes de incertezas da superfície 1		Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Valor bruto [μm]	Tipo de distribuição	Divisor	u [μm]	v
u_A	Avaliação do tipo A	0,684	normal	1	0,684	4
VC_0	Variação de comprimento do bloco da superfície 0	0,05	retangular	$2\sqrt{3}$	0,014	2
VC_1	Variação de comprimento do bloco da superfície 1	0,05	retangular	$2\sqrt{3}$	0,014	2
BP_0	Incerteza do bloco padrão da superfície 0	0,07	normal	2	0,035	∞
BP_1	Incerteza do bloco padrão da superfície 1	0,05	normal	2	0,025	∞
ΔL_1	Variação do comprimento devido à temperatura do bloco da superfície 1	0,038	retangular	$2\sqrt{3}$	0,010	∞
u_C	Incerteza padrão combinada		normal		0,686	4
$U_{95\%}$	Incerteza expandida		normal	$k = 2,869$	1,969	

Tabela 4.7 Planilha de avaliação para o ponto (x_2, y_4)

Fontes de incertezas da superfície 2		Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Valor bruto [μm]	Tipo de distribuição	Divisor	u [μm]	v
u_A	Avaliação do tipo A	0,684	normal	1	0,684	4
VC_0	Variação de comprimento do bloco da superfície 0	0,05	retangular	$2\sqrt{3}$	0,014	2
VC_1	Variação de comprimento do bloco da superfície 1	0,05	retangular	$2\sqrt{3}$	0,014	2
VC_2	Variação de comprimento do bloco da superfície 2	0,06	retangular	$2\sqrt{3}$	0,017	2
BP_0	Incerteza do bloco padrão da superfície 0	0,07	normal	2	0,035	∞
BP_1	Incerteza do bloco padrão da superfície 1	0,05	normal	2	0,025	∞
BP_2	Incerteza do bloco padrão da superfície 2	0,05	normal	2	0,025	∞
ΔL_1	Variação do comprimento devido à temperatura do bloco da superfície 1	0,038	retangular	$2\sqrt{3}$	0,010	∞
ΔL_2	Variação do comprimento devido à temperatura do bloco da superfície 2	0,035	retangular	$2\sqrt{3}$	0,010	∞
u_C	Incerteza padrão combinada		normal		0,687	4
$U_{95\%}$	Incerteza expandida		normal	$k = 2,869$	1,972	

O “k” é o fator de abrangência para o número de graus de liberdade efetivo e 95% de probabilidade.

Através das informações fornecidas pelas planilhas de avaliação pode-se determinar qual a fonte de incerteza que mais influencia o resultado da medição e, a partir daí, melhorar o desempenho do processo de medição.

Os pontos (x_2, y_1) , (x_2, y_2) e (x_2, y_4) apresentam o mesmo valor para a avaliação do tipo A e as incertezas expandidas correspondentes resultaram em: 1,967 μm , 1,969 μm e 1,972 μm . Esse valor mostra que as componentes de incerteza fornecidas pelo mensurando não contribuíram significativamente para a incerteza expandida no resultado da medição, restando apenas uma fonte de incerteza: avaliação do tipo A.

A avaliação do tipo A está influenciada pela resolução do deslocador mecânico ($2,5 \mu\text{m}$). A incerteza expandida para os três pontos chegou a aproximadamente 80% do valor da resolução. Se fosse utilizado um deslocador mecânico com um passo de $0,092 \mu\text{m}$ (aproximadamente 120° no caminho óptico do SM), essa porcentagem seria igual a $0,075 \mu\text{m}$, considerando um comportamento similar para a repetitividade. Uma outra forma de reduzir a incerteza $U_{95\%}$ seria aumentar o número de medições. Na Tabela 4.7, se o número de medições aumentasse o número de graus de liberdade para 30, a incerteza $U_{95\%}$ seria igual a $1,434 \mu\text{m}$. Esta análise permite dizer que a incerteza do tipo A é a principal fonte de incerteza do processo de medição e está fortemente influenciada pela resolução do deslocador mecânico.

A avaliação do tipo A ainda pode ser melhorada independentemente da resolução do deslocador mecânico. O valor obtido está influenciado pelas fontes de incertezas presentes no processo de medição que não foram atenuadas pelos ensaios para a sua otimização. Essas fontes de incerteza estão numeradas como (6) na Figura 4.1.

As Figuras 4.18 e 4.19 mostram duas superfícies do módulo da incerteza associada ao processo de medição: não considerando e considerando os efeitos sistemáticos. Na Figura 4.18 está mostrado o resultado calculado na planilha de avaliação para os 25 pontos do mensurando da incerteza expandida $U_{95\%}$ e, na Figura 4.19, o valor de $U_{95\%}$ é acrescido do valor da tendência, considerada como fonte de incerteza, pois não foi aplicada a correção para atenuá-la.

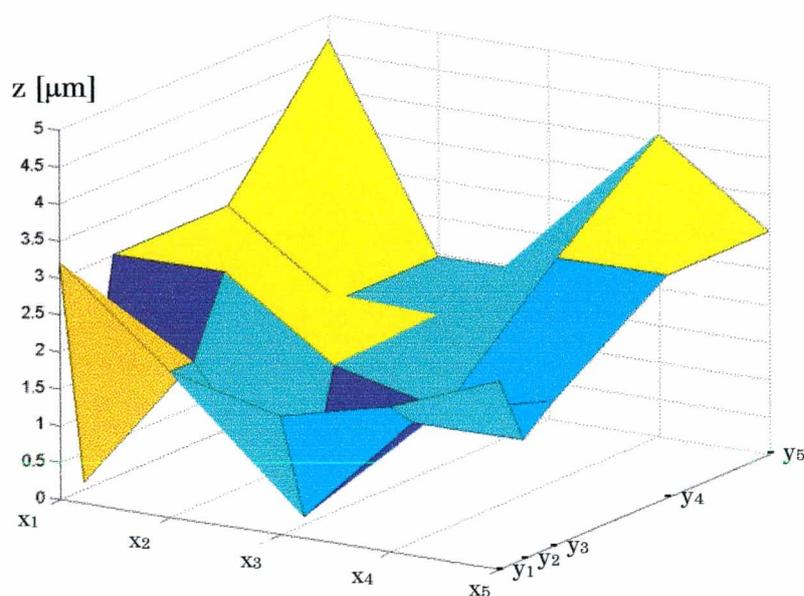


Figura 4.18 Superfície do módulo da incerteza expandida compensando os efeitos sistemáticos

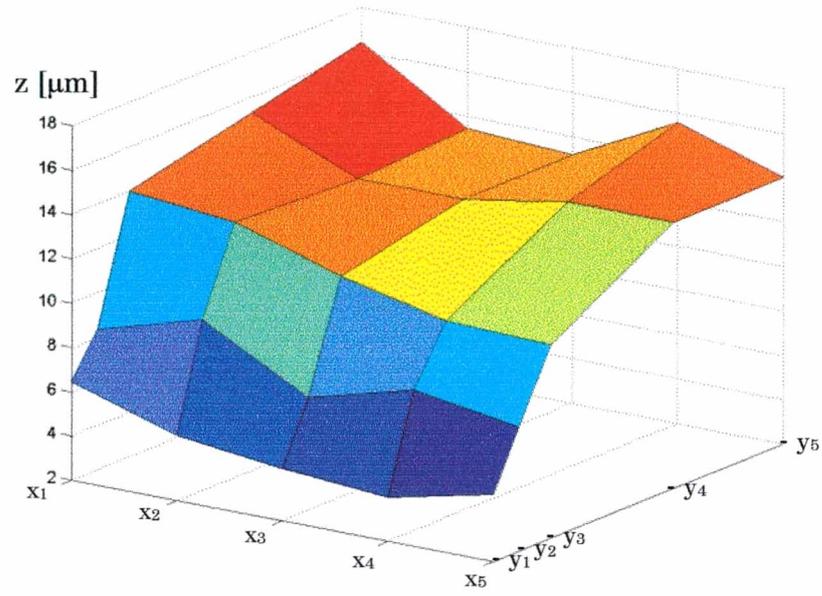


Figura 4.19 Superfície do módulo da incerteza expandida não compensando os efeitos sistemáticos

Capítulo 5

Considerações finais

Esta dissertação norteou os caminhos para o desenvolvimento de um sistema de medição que utiliza a interferência com luz não-coerente para a medição de geometrias 3D. Através de uma montagem experimental foram realizadas medições e o resultado da medição foi avaliado.

Ao final deste trabalho é possível extrair algumas conclusões:

Quanto à montagem experimental:

- Os atuadores para o espelho de referência supriram as necessidades deste trabalho para a medição de geometrias 3D, porém o tempo para a estabilização da vibração gerada pelo deslocamento do espelho prejudicou o tempo de medição. O tempo para varrer o objeto em passos de $2,5 \mu\text{m}$, sem contar com o tempo de processamento, chegou a 1 s por passo. Isso equivale a um tempo de 7 min para um deslocamento de 1 mm;
- O valor da luminância da lâmpada de halogênio utilizada restringiu o uso de filtros de interferência apenas para superfícies lisas. A reflexão difusa de superfícies rugosas diminui a quantidade de luz que atinge o sensor da câmera. Para superfícies rugosas, devido ao espectro da luz, o comprimento de coerência utilizado foi de $3,5 \mu\text{m}$;
- Variações da intensidade luminosa e do ruído do sensor da câmera são prejudiciais à medição, sendo necessário um artifício matemático para detectar a modulação. Esse artifício matemático reduz a quantidade de pontos detectados no objeto, devido à incapacidade de desassociar a

intensidade aleatória da intensidade de modulação;

- A abertura da iluminação, além da necessidade em atender à especificação quanto a coerência espacial, deve ser tal que permita uma boa qualidade de colimação. Uma colimação imperfeita diminui a quantidade de informação acerca da superfície do objeto;
- A metodologia para a determinação da altura de cada ponto de uma superfície 3D se mostrou eficiente, porém para a redução do valor da incerteza de medição o seu desempenho deve ser mais bem avaliado;
- Os componentes utilizados na montagem experimental são similares aos utilizados com a interferometria a laser com exceção do motor de passo. A utilização de laser foi necessária para alinhar a montagem experimental e para fazer testes com um interferômetro. Para o alinhamento, o laser contribuiu tanto para o ajuste do eixo óptico quanto para a determinação das distâncias focais das lentes utilizadas. Por isso, em termos de custo, devem ser avaliados os componentes ópticos, a câmera digital (com placa de aquisição), os atuadores e os componentes eletrônicos para o controle, o *software*, as fontes de luz (coerente e não-coerente), o microcomputador, além da mão-de-obra. Esse montante é muito inferior ao custo de uma máquina de medir por coordenadas que utiliza o princípio de apalpação mecânica;

Quanto à avaliação do resultado da medição:

- O sentido de deslocamento do motor de passo durante a medição influenciou na reprodutibilidade dos resultados das medições. Essa influência deve-se ao acoplamento direto do motor e ao torque aplicado para deslocar o espelho linearmente;
- O *software* desenvolvido não compensou os efeitos sistemáticos do sistema de medição, porém pela análise da tendência no resultado da medição foi possível identificar três possíveis fontes do erro: o deslocador mecânico, a composição dos blocos padrão e os componentes ópticos. Testes devem ser realizados compensando-se esses efeitos para avaliar melhor o resultado da medição;
- O arranjo mecânico montado para acoplar o espelho de referência e os atuadores supriu as necessidades desse trabalho, porém deve ser mais bem projetado para atenuar as vibrações geradas pelo deslocamento.

O tempo estimado através de um interferômetro com luz coerente para a atenuação da vibração foi o que menos contribuiu para a dispersão do resultado;

- Não é possível afirmar que o processo de medição é sensível a: vibrações externas, variações no índice de refração, reflexões externas e medições com valores diferentes de comprimentos de coerência. O sistema de medição se mostrou robusto às perturbações num ambiente laboratorial. A metodologia para a determinação da altura do mensurando gerou uma dispersão muito pequena em relação aos valores dos comprimentos de coerência. As relações entre os comprimentos de coerência utilizados e os erros máximos encontrados foram de: 13,00 para 1,02 (65/5 e 22,4/21,9);
- A avaliação do tipo A é a principal fonte de incerteza do processo de medição, porém está fortemente associada à resolução do deslocador mecânico.

As expectativas iniciais quanto aos objetivos propostos para este trabalho foram cumpridas: encontrar os problemas tecnológicos potenciais e o desempenho metrológico de um sistema de medição que utilize a interferometria com luz não-coerente. Apesar disso, ainda existem outras aplicações e melhorias que podem agregar conhecimento acerca da interferometria com luz não-coerente, que mostrou ser um princípio de medição com enorme potencial na medição de objetos com dimensões compatíveis às dimensões de componentes ópticos.

Devido aos componentes da montagem experimental, a faixa de medição do SM foi de aproximadamente:

- 900 mm² de seção transversal (30 mm x 30 mm);
- 3 mm de profundidade.

Comercialmente, encontra-se componentes ópticos que permitem capturar imagens de objetos com 50 mm x 50 mm. Utilizando-se um deslocador mecânico que permita reduzir o tempo de medição, a faixa de medição (no eixo z) poderia chegar a 50 mm (considerando o percurso total do parafuso micrométrico utilizado na montagem experimental). O que levaria a uma faixa de medição de:

- 2500 mm² de seção transversal;
- 50 mm de profundidade.

Um outra forma de ampliar a faixa de aplicação seria aumentar a área de medição (x e y) através de deslocamentos nos eixos x e y do mensurando. A

geometria 3D do objeto seria a união de várias medições independentes (de áreas menores), formada pela concatenação dos pontos obtidos em cada medição.

Para trabalhos posteriores, pode-se sugerir:

- Utilizar um motor que permita um deslocamento do espelho de referência em passos de 120° de diferença de caminho óptico. Esse deslocamento permitiria usar apenas um atuador no sistema de medição e a sua contribuição para a incerteza seria menor;
- Rastrear seqüencialmente a origem do erro sistemático no resultado da medição através da: calibração do deslocador mecânico, calibração da composição de blocos padrão e avaliação dos componentes ópticos;
- Compensar por *software* a tendência e avaliar melhor o resultado da medição aplicando a correção;
- Desenvolver procedimentos no *software* para melhorar a robustez do sistema de medição quanto à variações no nível de intensidade detectados no sensor da câmera;
- Desenvolver outras metodologias para detectar a geometria 3D de objetos e comparar os resultados para escolher o melhor procedimento;
- Utilizar uma fonte de luz não-coerente com maior luminância para permitir a medição da geometria de objetos rugosos. A luminância permitiria ajustar o valor de L_c ;
- Construir um protótipo do sistema de medição e testar o seu desempenho em um ambiente industrial. Avaliar os benefícios que a sua utilização pode trazer para a indústria.

Referências

- [1] MALINOVSKY, I.; TITOV, A. In: METROLOGIA-2000, São Paulo. **Interferometric image processing for precise gauge block metrology (Anais do II congresso brasileiro de metrologia - Advances in the application on optical metrology)**. SP: Sociedade Brasileira de Metrologia. 631p. 39-48.
- [2] CREATH, Katherine. **Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry**. Appl. Opt., Vol. 26, N° 14, 2810, 1987.
- [3] FERCHER, A. F.; HU, H. Z.; VRY, U. **Rough surface interferometry with a two-wavelength heterodyne speckle interferometer**. Appl. Opt., Vol. 24, N° 14, 2181-2188, 1985.
- [4] LEE, Byron S.; STRAND, Timothy C. **Profilometry with a coherence scanning microscope**. Appl. Opt., Vol. 29, N° 26, 3784-3788, 1990.
- [5] TIPLER, P. A. **Ótica e Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995. 4 v.
- [6] MOREIRA, I. **Fiber optic channel**. <<http://www.fiberoptic.cjb.net/>> 20 Out. 2001.
- [7] CLÁUDIO, C. de S.; FACHINI, G.; RAMOS, V. G. **Laser na medicina**. <<http://www.cdcc.sc.usp.br/escolas/juliano/laser/laser.html>> 20 Out. 2001.
- [8] DALLY, James W.; RILEY, William F. **Experimental Stress Analysis**. 3. ed. Mc Graw Hill, 1991.
- [9] COSTA, Antonio Carlos da. **Nota Experimental 03 - Interferômetro de Michelson**. <<http://www.ifi.unicamp.br/~accosta>> 19 Ago. 2001.
- [10] GÅSVIK, Kjell J. **Optical Metrology**. 2 ed. John Wiley & Sons, 1995.
- [11] HECHT, Eugene. **Optics**. 3 ed. Addison Wesley Longman, Inc., 1998.

- [12] MELLES GRIOT. **Absorption, transmittance, and optical density**: Catálogo online. <<http://www.mellesgriot.com/pdf/0013.2.pdf>> 20 Out. 2001.
- [13] AGUIRRE, Luis A. **Introdução à identificação de sistemas – Técnicas Lineares e Não-lineares aplicadas a sistemas reais**. Editora UFMG, 2000.
- [14] ETTL, Peter. **Studien zur hochgenauen Objektvermessung mit dem Kohärenzradar**. 1995. 90f. Diplomarbeit (Fach Physik) – Physikalisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Rugosidade das superfícies**: Procedimento, NBR 6405. Rio de Janeiro, 1980. 10p.
- [16] INMETRO. **Sistema Internacional de Unidades - SI**. 6 ed. Brasília, SENAI/DN, 2000. 114 p.
- [17] INMETRO. **Quadro Geral de Unidades de Medida; resolução do CONMETRO n° 12/1988**. 2 ed. Brasília, SENAI/DN, 2000. 39 p.
- [18] HÖFER, Volker. **Weißlichtinterferometrie mit Dispersion**: Ein aperturunabhängiges Verfahren zur Entfernungsmessung an optisch rauhen Oberflächen. 1994. 96f. Diplomarbeit (Fach Physik) – Physikalisches Institut der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- [19] EDMUND SCIENTIFIC. **Optics and Optical Instruments**: Catálogo. EUA, 2000. 301p.
- [20] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Física**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 4 v.
- [21] JONES, D. W.; KEMPER, H. **Projetos Eletrônicos Personalizados – Tipos de motores de passo**. <http://members.nbci.com/eletron/_XMCM/eletron/motorepasso.htm> 7 Jun. 2001.
- [22] STRNGIO, Christopher E. **The RS232 standard – A tutorial with signal names and definitions**. <http://www.camiresearch.com/Data_Com_Basics/RS232_standard.html> 6 Jun. 2001.
- [23] OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 2 ed. Prentice/Hall do Brasil, 1993.
- [24] AARON. **Stepper Motor Controller**. <<http://www.aaroncake.net/circuits/stepper.htm>> 24 Out. 2001.

- [25] MACHADO, Jeronimo. **Programando a porta paralela em visual basic.** <<http://www.jeronimomachado.vila.bol.com.br/lptvb.htm>> 6 Jun. 2001.
- [26] **PORTA paralela.** <<http://www.portaparalela.hpg.ig.com.br/index.htm>> 24 Out. 2001.
- [27] DRESEL, Thomas; HÄUSLER, Gerd; VENZKE, Holger. **Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar.** Appl. Opt., Vol. 31, N° 7, 919-925, 1992.
- [28] BOWE, Brian; TOAL, Vincent. **White light interferometric surface profiler.** Opt. Eng., Vol. 37, N° 6, 1796-1799, 1998.
- [29] DAMIÃO, A. J.; DESTRO, M. A. F.; STEMPNIAK, R. A. In: METROLOGIA-2000, São Paulo. **Caracterização de paralelos ópticos por interferometria (Anais do II congresso brasileiro de metrologia - Advances in the application on optical metrology).** SP: Sociedade Brasileira de Metrologia. 631p. 98-105.
- [30] GONÇALVES, Armando Albertazzi. **Metrologia - Parte I.** Florianópolis: Labmetro, Apostila, 1999.
- [31] FIDÉLIS, Gilberto C.; GONÇALVES, Armando A.; SCHOELER, Nelson; VEIGA, Celso. **Metrologia - Parte II.** Florianópolis: Labmetro, Apostila, 1995.
- [32] FIDÉLIS, Gilberto C.; SCHOELER, Nelson. **Incerteza de Medição.** Florianópolis: Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras, Apostila do curso CM-183, 19 a 21/03/2001. 62 p.
- [33] **Guia para a expressão da incerteza de medição.** 2 ed., International Organization for Standardization, 1998.