13

Universidade de São Paulo
Instituto de Física

MEDIDA DE TOPOGRAFIA DE SUPERFÍCIE USANDO A TÉCNICA DE DESLOCAMENTO DE FASE

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ex. 1
SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO
3473
INSTITUTO DE FÍSICA

Dissertação apresentada para cumprimento parcial das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências

DIOGO SOGA

Banca Examinadora:
Prof. Dr. Mikiya Muramatsu (Orientador - IFUSP)
Profa. Dra. Elisabeth Andreoli de Oliveira (IFUSP)
Prof. Dr. Amilton Sinatora (EPUSP)

DEZEMBRO / 2000

Prof. Armando Corbani Ferraz
Presidente da Comissão de Pós Graduação

SBI-IFUSP
305M810T3473

535.4
S 682 m
M
ex. 1

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Soga, Diogo

Medida de Topografia de Superfície usando a Técnica de Deslocamento de Fase.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. Instituto de Física – Departamento de Física Geral

Orientador: Prof. Dr. Mikiya Muramatsu
Área de Concentração: Física Geral

Unitermos: 1. Topografia de Superfície;
2. Deslocamento de Fase;
3. Técnica não-destrutiva;
4. Interferometria Laser;
5. Retirada de Ambiguidade.

USP/IF/SBI-072/2000

À minha família
pelo apoio para que eu
pudesse realizar este mestrado.

Eduardo Soga Terasaka in memorium.
Mesmo que a tua passagem pela Terra
tenha sido breve, a lembrança de ti
será eterna.

Tio Diogo

Qual a importância da Óptica?
Podemos dizer que dentre todos os ramos da Física a Óptica foi a primeira, pois na própria Bíblia lemos (Gênesis, cap. 1):

1. *No princípio, criou Deus os céus e a terra.*
2. *E a terra era sem forma e vazia; e havia trevas sobre a face do abismo; e o Espírito de Deus se movia sobre a face das águas.*
3. *E disse Deus: Haja luz. E houve luz.*
4. *E viu Deus que era boa a luz; e fez Deus separação entre a luz e as trevas.*
5. *E Deus chamou à luz Dia; e às trevas chamou Noite. E foi a tarde e a manhã, o dia primeiro.*

Mostrando que a luz, bem como a Óptica, surgiu já no primeiro dia da Criação!

Raul D. Paiva Jr.

Agradecimentos

Ao **Prof. Mikiya Muramatsu** pela oportunidade de realizar este trabalho, pelo apoio e pela amizade, além de todo o carinho que recebi de sua família (**Neide, Juliana, Daniela e Flávia**).

Ao **José Alberto Ribeiro** pela minha indicação ao Prof. Mikiya, sem a qual nada disto teria acontecido.

Aos meus colegas do Laboratório de Óptica (**Edson, Eduardo, Felix, Flávio, Gabriel, George, Josmar, Kleiton, Marcos, N. Okuyama, N. Santos, Raul e Regina**) pelas discussões, sugestões, apoio e amizade.

Ao meu amigo **Rogério Marcos Brancaccio** por tirar as minhas dúvidas e agüentar o meu desespero com os problemas experimentais.

Aos amigos **Sarah, Hamilton e Rigotti** pelas orientações sobre LaTeX, apoio e carinho.

Aos amigos **Oswaldo Bueno Martins** e **Oswaldo Sanchez** (Laboratório de Óptica - Instituto de Pesquisas Tecnológicas) pelo apoio técnico e amizade.

Aos membros do Laboratório de Microscopia Eletrônica (**Prof. Pedro, Profa. Marina, Profa. Helena, Simone, Silvio, Regina e Doris**) pelo apoio e amizade.

À **Profa. Lucila H. D. Cescato** (Lab.Óptica - IF-UNICAMP) pelas redes de difração.

Aos **Prof. Mário J. de Oliveira**, **Prof. Otaviano A. M. Helene**, **Prof. Oswaldo Horikawa** (POLI-USP) e aos amigos **Marcelo O. C. Pires** e **Eduardo B. Acedo** pelas discussões luminosas. Aos amigos **Vera B. Henriques** e **Hélio A. Brandão** pela amizade.

Aos funcionários da Secretaria de Pós-Graduação pela paciência para responderem as minhas dúvidas e o pronto atendimento aos meus pedidos.

A todos os colegas, professores, técnicos e funcionários do IFUSP pelo apoio.

Agradeço aos professores e funcionários do *Centro de Investigaciones Opticas* (CIOp) pelas discussões tão luminosas.

Resumo

Neste trabalho, medimos o perfil 3D de superfícies (microtopografia) utilizando uma técnica de interferometria óptica: *Phase-Shifting* (Deslocamento de Fase). Utilizamos um interferômetro do tipo Twyman-Green para produzir figuras de interferência da superfície analisada. Essas imagens foram armazenadas usando-se uma câmera *CCD* ligada à um microcomputador. Para obter a microtopografia, calculamos o Mapa de Fase a partir das imagens digitalizadas usando um programa de microcomputador. Posteriormente um outro programa removeu a ambigüidade da função tangente (*unwrapping*), pela Técnica do Automato Celular, usada no cálculo do Mapa de Fase. Então efetuamos os cálculos para determinar a microtopografia da superfíce. Depois fizemos a análise da microtopografia, levantando informações relevantes para a sua caracterização. Analisamos objetos com alta refletividade (espelhos planos e redes de Ronchi) e obtivemos bons resultados. Também comparamos alguns dos resultados obtidos com a técnica de Deslocamento de Fase com os resultados obtidos pela análise de Franjas de Igual Espessura.

Abstract

In this work we measured the 3D profile of surfaces (microtopography) using a optical interferometric technique: Phase-Shifting. We used a interferometer of type Twyman-Green to produce interferograms from analysed surface. These images was captured using a CCD camera that was linked to a microcomputer. To obtain a microtopography, we calculated the Phase Map using the digitalized images and a software of microcomputer. Then another program removed the wrapping of tangent fuction, using the Cellular-Automata Technique, that was used to calculate the Phase Map. So we calculated the microtopography of the surface. After we did the analyses of the microtopography, find out some important informations of its description. We studied objects with high reflectivity (plane mirrors and Ronchi ruling) and we obtained good results. Also we compared some results with that obtained by analyses of Fringes of Equal Thickness.

Índice

1 Introdução **1**

2 Técnica de Deslocamento de Fase **4**
2.1 Técnica de 3 Passos 7
2.2 Técnica de 4 Passos 7
2.3 Mapa de Fase 8
2.4 Microtopografia 9

3 Retirada da Ambigüidade de Fase **11**
3.1 Técnica de Varredura de Franjas 13
3.2 Técnica de Autômato Celular 15

4 Montagem Experimental **18**
4.1 Interferômetro de Twyman-Green 18
4.1.1 Alinhamento da Montagem 20
4.2 Programas de Cálculo e de Captura de Imagens 22
4.3 Câmera *CCD* 23
4.4 Deslocador *PZT* 23

5 Resultados Experimentais **25**
5.1 Fontes de Erros 25
5.1.1 Erros incontroláveis 26
5.1.2 Incertezas da Intensidade do Interferograma 27
5.1.3 Incertezas no Mapa de Fase 27
5.1.4 Incertezas na Microtopografia 28
5.2 Espelho Plano 29
5.2.1 Calibração do *PZT* 31
5.2.2 Medidas 35
5.3 Redes de Difração 39
5.4 Desempenho dos Programas de Retirada de Ambigüidade 42

6 Conclusão **49**
6.1 Considerações Gerais 49
6.2 Perspectivas Futuras 50

Apêndice **52**

A Cálculos da Técnica de Três Passos 52

B Cálculos da Técnica de Quatro Passos 55

C Siglas de Técnicas Ópticas 58

Referências Bibliográficas 59

Capítulo 1

Introdução

A melhoria de produtos e processos industriais necessita da caracterização dos materiais e subprodutos utilizados, mais especificamente a caracterização das respectivas superfícies. Tais características influenciam em diferentes processos tais como :

- movimento de peças mecânicas;
- retenção de lubrificante entre superfícies para controle do atrito;
- retenção de poeira, adesão de colas, tintas e adesivos;
- controle de refletividade e difusibilidade de superfícies.

Na grande maioria das empresas ainda se utiliza com muita freqüência o tradicional perfilômetro mecânico para a carateterização de superfície, que para algumas finalidades ainda é satisfatório. Porém este tipo de equipamento provoca danos na superfície analisada, bem como mede apenas uma linha (perfil) por vez; para se obter valores representativos da superfície é preciso fazer várias medições. Todavia com a automação das linhas de produção tornou-se necessário introduzir técnicas mais rápidas e que abrangem um intervalo de medidas maior. Para atender estas necessidades surgiram as técnicas ópticas. Além das técnicas ópticas serem não destrutivas elas medem uma área ao invés de um perfil. Este trabalho apresenta a técnica óptica interferométrica conhecida como *Phase-Shifting* [1], que denominaremos de uma maneira livre como Deslocamento de Fase, que permite a medição da microtopografia de uma superfície sem que haja contato ou danos nela.

A técnica de Deslocamento de Fase é uma das várias técnicas ópticas aplicadas à metrologia de formas tridimensional. Em janeiro de 2000 Chen *et al.* [2] apresentaram uma revisão das várias técnicas ópticas existentes, desde 1979 até o presente ano.

O rápido desenvolvimento das técnicas ópticas, baseadas em interferometria, se deve ao crescente avanço da Física do Estado Sólido. Porque a partir dela temos uma câmera *CCD* mais rápida e de alta resolução, acompanhada pelo aumento da velocidade e da capacidade de armazenamento dos microcomputadores. Com isto temos a digitalização de imagens com resolução comparável à dos filmes fotográficos e processamento dos dados quase instantâneo, além de dispensar a necessidade de processamento químico como ocorre com os filmes fotográficos.

Ultimamente uma das técnicas ópticas de grande desenvolvimento é a Técnica de Deslocamento de Fase, sendo K. Creath [1] uma das pioneiras nesta área. Atualmente ela é amplamente utilizada para analisar vibrações, deformações, pequenos deslocamentos e formato de objetos. Uma das motivações para o uso desta técnica foi o trabalho do Prof. Dr. Mitsuo Takeda [3, 4] (University of Eletro-Communication - Japão) para determinar a topografia de superfícies e objetos. Além disso a utilização desta técnica implica em aumento de precisão e de velocidade do processamento dos dados. Outra vantagem desta técnica é o fato de não estar restrita ao estudo de superfícies de perfil gaussiano como é exigido pela técnica da Correlação Angular [5]. Uma das dificuldades inerentes a essa técnica é que para se obter a topografia da superfície precisamos obter inicialmente o Mapa de Fase da superfície, que carrega consigo a ambigüidade da função tangente que modula esse mapa. Muito esforço e tempo são dirigidos para fazer a remoção da ambigüidade do Mapa de Fase, dada a ampla gama de aplicações [6] existentes conforme citado acima.

A parte mais importante deste trabalho é a construção de programas de microcomputador para calcular o Mapa de Fase, retirar a ambigüidade do Mapa de Fase e obter a microtopografia da superfície. Porque a partir de alguns interferogramas digitalizados vamos calcular a microtopografia utilizando os programas, o que agiliza a medição. E entre estes programas destacamos a retirada de ambigüidade do Mapa de Fase, pois temos

uma quantidade maior de conhecimento a ser desenvolvido. Embora alguns trabalhos que tratam deste assunto estejam disponíveis, é necessário desenvolver conhecimentos que não são revelados nesses trabalhos. A disponibilidade de programas comerciais que façam este trabalho é muito limitada porque geralmente são vendidos com equipamentos da ordem de quase uma centena de milhares de dólares. Atualmente no Brasil não existem muitos grupos de pesquisa que utilizem a técnica de Deslocamento de Fase. Outro ponto importante é o fato que os programas de retirada de ambigüidade serem utilizados em diversas aplicações como a medição de forma 3D e medida de tensão mecânica. Portanto o maior fruto deste trabalho serão os programas de cálculo que refletem todo o conhecimento adquirido com as pesquisas. Devido a este fato é que atualmente os programas de computador são altamente valorizados.

No capítulo 2 é apresentada a **técnica de deslocamento de fase** para a obtenção do Mapa de Fase da superfície a ser analisada, e depois como obter a microtopografia a partir do Mapa de Fase. No capítulo 3 são tratadas as técnicas para a **retirada da ambigüidade** presente nos Mapas de Fase obtidos no capítulo 2. No capítulo 4 é descrita a **montagem experimental** utilizada. No capítulo 5 são avaliados os **resultados experimentais** e feita a **comparação com outra técnica**. Neste trabalho foram estudadas apenas superfícies refletoras planas ou quase-planas devido à montagem utilizada. E finalmente no capítulo 6 é apresentada a **conclusão** deste trabalho e as **perspectivas futuras**. Também foram acrescentados os apêndices (A) para os Cálculos da Técnica de Três Passos, (B) para os Cálculos da Técnica de Quatro Passos e (C) para Siglas de Técnicas Ópticas.

Capítulo 2

Técnica de Deslocamento de Fase

Uma figura de interferência (interferograma) pode carregar diversas informações, principalmente aquelas sobre os agentes que causam deformações nas frentes de onda dos feixes de luz que formam a figura de interferência. Se utilizarmos um interferômetro, do tipo divisor de amplitude, com dois feixes de luz cujas frentes de onda são planas, e pudermos garantir que as deformações sejam provocadas somente pela microtopografia de uma superfície refletora em um dos dois feixes, então podemos obter informações de tal superfície analisando a figura de interferência.

Os interferogramas carregam informações da microtopografia da superfície porque ela introduz uma defasagem ao refletir um feixe de luz, isto é, os raios de luz refletidos por cada um dos pontos de uma superfície não-plana percorrem um caminho óptico diferente, conforme ilustrado na figura 2.1. Então para cada ponto (x,y) da superfície podemos associar uma altura h(x,y) que provoca uma variação de fase Φ(x,y). Portanto a partir dos interferogramas podemos determinar a fase Φ(x,y) que por sua vez permite determinar a altura h(x,y) de cada ponto, como será visto a seguir.

Para analisar o interferograma é necessário digitalizá-lo. O processo de digitalização corresponde a discretizar o interferograma, pois os sensores do equipamento de digitalização são elementos de tamanho finito e espaçados por uma distância finita. A quantidade de sensores é muito menor do que a quantidade de pontos na superfície. Portanto temos uma

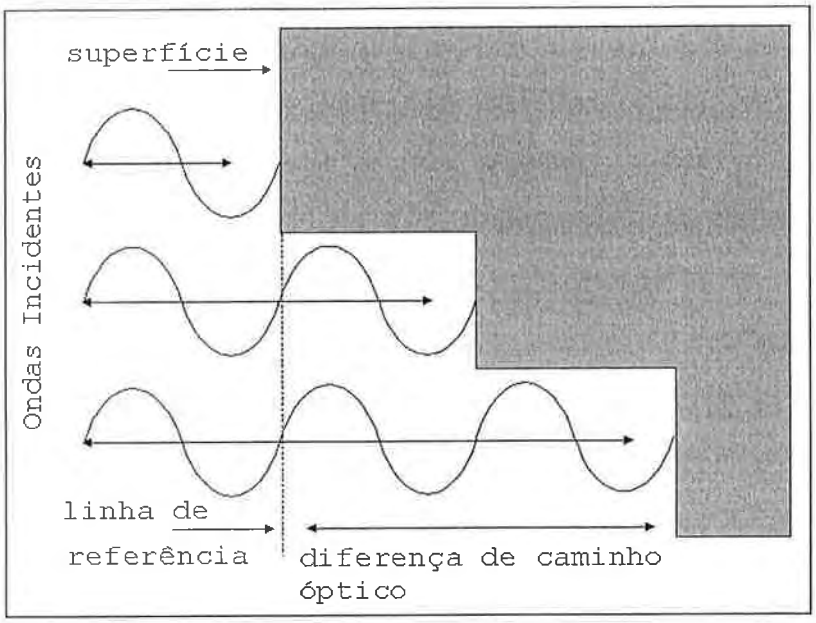

Figura 2.1: Atraso de fase.

amostragem do interferograma. Então as coordenadas (x,y) da superfície são diferentes das coordenadas (i, j) em um interferograma digitalizado. Neste trabalho utilizamos as coordenadas (i, j) do interferograma digitalizado.

As técnicas para a medida de fase a partir de interferogramas podem ser divididas em dois grupos [7] e subgrupos:

1. Medida de fase temporal (*temporal phase-measurement*- TPM). A fase de um determinado ponto em um interferograma é medida como soma das diferenças de fase entre vários interferogramas que variam muito lentamente no tempo mas sem deformar demasiadamente a fase inicial.

2. Medida de fase espacial (*spatial phase-measurement*- SPM). A informação da fase é obtida de um interferograma que possui uma quantidade de franjas que são portadoras de freqüência. Dentro deste tipo encontramos um novo grupo de técnicas para a obtenção de um Mapa de Fase [8] :

   (a) transfomada de Fourier de um único padrão contendo franjas portadoras;

   (b) deslocamento de franjas por incremento de fase conhecido.

Neste trabalho utilizamos uma técnica de medida de fase espacial com incremento de fase, grupo 2b acima, descrita por Creath [1, 7] como técnica de Deslocamento de Fase. A fase do interferograma será calculada a partir das intensidades de interferogramas obtidos de um interferômetro iluminado com luz *laser*. Os vários interferogramas capturados terão as intensidades variando devido a incrementos (variação) de fase feitos por um microdeslocador piezoelétrico linear, mais conhecido como *PZT*. Se o incremento de fase for contínuo no tempo temos a técnica óptica conhecida como *Phase-Shifting* (vide figura (a) de 2.2) e caso o incremento seja discreto temos a técnica conhecida como *Phase-Stepping* (vide figura (b) de 2.2), que pode ser entendida como uma variação da primeira técnica. Foi utilizada a segunda técnica porque é mais simples do que a primeira e facilita muito os procedimentos experimentais. Uma seqüência de interferogramas é capturada e entre cada par de interferogramas introduzimos uma variação conhecida no feixe de luz referência, o que auxiliará na determinação da fase de cada ponto do interferograma. De acordo com a quantidade de interferogramas capturados temos uma dada técnica conforme descrito abaixo. A partir destes interferogramas vamos obter a fase $\Phi(x, y)$ aplicando as técnicas descritas adiante.

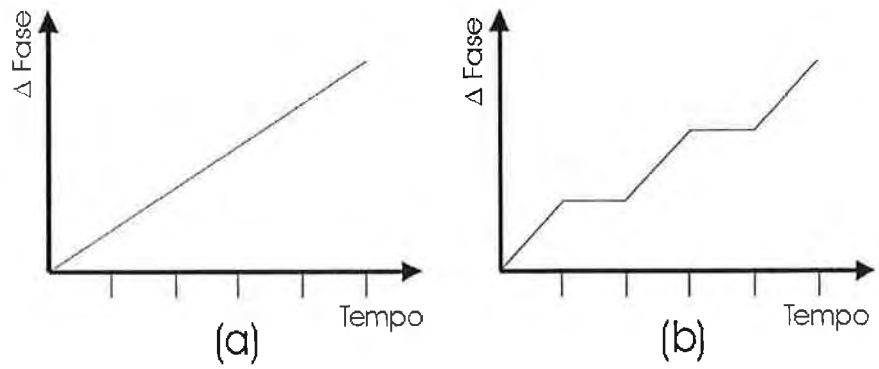

Figura 2.2: Variação de fase. Na figura (a) temos a técnica *Phase-shifting*. Na figura (b) temos a técnica *Phase-stepping*.

Vamos obter alguns interferogramas digitalizados que possuem incrementos de fase entre si, depois utilizando as técnicas de incremento de fase, descritas a seguir, vamos calcular os Mapas de Fase. E a partir daí obter a microtopografia da superfície considerada.

2.1 Técnica de 3 Passos

A técnica de três passos é assim denominada porque prevê o uso de três interferogramas para determinar a fase de um ponto (i, j). Considerando um interferômetro de dois feixes, então a intensidade em um interferograma pode ser escrita como:

$$I(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}\cos\Phi(i,j), \tag{2.1}$$

onde I_1(i, j) corresponde à parte do feixe 1, I_2(i, j) corresponde à parte do feixe 2, e o terceiro termo é o termo de interferência dos dois feixes. Em cada interferograma introduzimos uma variação de fase (θ) em um dos feixes que o forma, sendo utilizados os seguintes valores de incremento de fase[1]: $\pi/4$, $3\pi/4$ e $5\pi/4$. Podemos formular tais valores na equação:

$$\theta = \frac{(2.n-1)\pi}{4}, \text{ n = 1, 2 e 3.}$$

Vamos considerar apenas o termo de interferência da equação 2.1, pois os dois primeiros termos serão desnecessários no cálculo de Φ(i, j). Dessa forma, os valores da intensidade I_n(i, j) em cada ponto (i, j) do interferograma, para cada variação de fase, podem ser escritos como :

$$I_n(i,j) = I_0(i,j)\cos\left[\Phi(i,j) + \frac{(2.n-1)\pi}{4}\right], \text{ n = 1, 2 e 3,} \tag{2.2}$$

utilizando relações de cossenos e combinando as intensidades obtemos a fase Φ(i, j):

$$\Phi(i,j) = \arctan\left[\frac{I_3(i,j) - I_2(i,j)}{I_1(i,j) - I_2(i,j)}\right]. \tag{2.3}$$

Dessa forma para obtermos a fase num determinado ponto precisamos ter 3 valores distintos de intensidade.

2.2 Técnica de 4 Passos

A técnica de quatro-passos é assim denominada porque prevê o uso de quatro interferogramas para determinar a fase de um ponto (i, j). De forma análoga, utilizando a equação 2.1 e introduzindo em cada interferograma uma variação de fase (θ) em um dos feixes que o

[1]Vide a dedução destes valores no apêndice A.

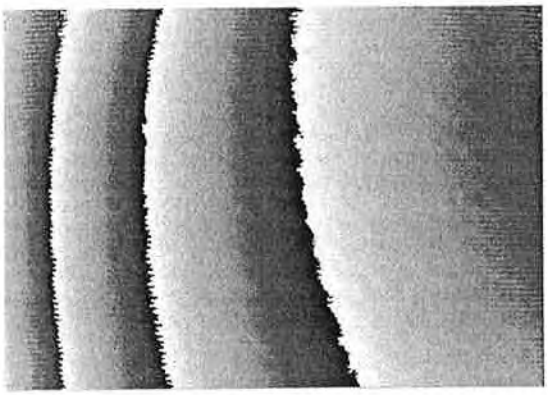

Figura 2.3: Mapa de fase.

forma, utilizando os seguintes valores de incremento de fase[2]: 0, $\pi/2$, π e $3\pi/2$. Podemos formular tais valores na equação:

$$\theta = \frac{(n-1)\pi}{2}, \text{ n = 1, 2, 3 e 4.}$$

Novamente o termo que traz a informação é o termo de interferência e portanto os valores da intensidade I_n(i, j) em cada ponto (i, j) do interferograma para cada variação de fase podem ser escritos como :

$$I_n(i,j) = I_0(i,j)\cos\left[\Phi(i,j) + \frac{(n-1)\pi}{2}\right], \text{ n = 1, 2, 3 e 4,} \tag{2.4}$$

utilizando relações de cossenos e combinando as intensidades obtemos a fase Φ(i, j):

$$\Phi(i,j) = \arctan\left[\frac{I_4(i,j) - I_2(i,j)}{I_1(i,j) - I_3(i,j)}\right]. \tag{2.5}$$

Aqui precisamos ter 4 valores de intensidade para determinar a fase Φ.

2.3 Mapa de Fase

Conhecendo a fase Φ(i, j) de cada ponto (i, j), podemos montar uma representação gráfica bidimensional onde as coordenadas i e j identificam um ponto no plano xy e cada valor da fase como uma intensidade de nível de cinza no ponto, variando entre o branco e o preto. Este gráfico é o Mapa de Fase (vide figura 2.3) que é uma das formas de representar a fase de cada ponto da superfície. Ele pode ser facilmente identificado pelo fato de que

[2]Vide a dedução destes valores no apêndice B.

geralmente possui muitas variações do nível de cinza ao longo do plano xy. Porém, um Mapa de Fase real, isto é, sem a ambigüidade da função tangente, apresenta as variações de cinza de um modo diferente daquele mapa com a ambigüidade presente. Uma discussão mais profunda sobre a retirada da ambigüidade da fase Φ(i, j) será feita no capítulo 3.

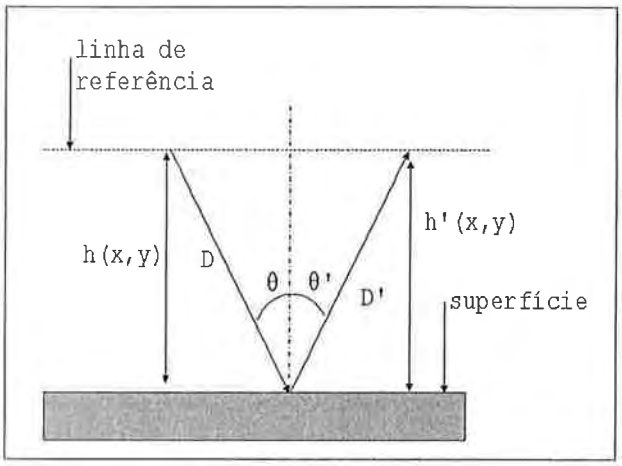

Figura 2.4: Caminho Óptico.

2.4 Microtopografia

Obtido o Mapa de Fase, e após retirar a ambigüidade da função tangente, podemos calcular a microtopografia da superfície. Partindo da Diferença de Fase (vide figura 2.4):

$$D + D' = \frac{\Phi(i,j)\lambda}{2\pi}, \tag{2.6}$$

onde D e D' são as distâncias percorridas no meio (nesse caso considerando n $\cong$ 1), e λ é o comprimento de onda da luz *laser* utilizada. Podemos escrever as distâncias em termos das alturas h(i, j) e h'(i, j) mas neste caso h(i, j) = h'(i, j), logo:

$$\frac{h(i,j)}{\cos\theta} + \frac{h(i,j)}{\cos\theta'} = \frac{\Phi(i,j)\lambda}{2\pi},$$

$$h(i,j)\frac{(\cos\theta + \cos\theta')}{\cos\theta\cos\theta'} = \frac{\Phi(i,j)\lambda}{2\pi},$$

isolando h(i, j) obtemos:

$$h(i,j) = \frac{\Phi(i,j)\lambda\cos\theta\cos\theta'}{2\pi(\cos\theta + \cos\theta')}, \tag{2.7}$$

fazendo uma expansão[3] dos cossenos para ângulos pequenos:

$$h(i,j) = \frac{\Phi(i,j)\lambda}{2\pi(\cos\theta + \cos\theta')},$$

então para o caso particular de incidência normal:

$$h(i,j) = \frac{\Phi(i,j)\lambda}{4\pi}. \tag{2.8}$$

Assim podemos conhecer a topografia de uma superfície desde que a fase Φ seja conhecida sem ambigüidades.

Portanto podemos obter a microtopografia da superfície a partir dos interferogramas, para isto calculamos a fase Φ usando as técnicas de 3 ou 4 passos, equações 2.3 ou 2.5. Depois retiramos a ambigüidade da fase Φ usando as técnicas descritas no capítulo 3. Então calculamos a microtografia usando as equações 2.7 ou 2.8.

[3] A expansão dos cossenos é: $\cos\theta \approx 1 - \theta^2/2! + \theta^4/4! - ...$, porém em um produto de cossenos de ângulos pequenos consideramos apenas o primeiro termo.

Capítulo 3

Retirada da Ambigüidade de Fase

O Mapa de Fase é apresentado como uma imagem com tons de cinza, pois utiliza um padrão de níveis de cinza para relacionar com os valores da fase $\Phi(i,j)$. O preto corresponde a $-\pi$ e o branco a $+\pi$, e entre eles os tons de cinza correspondem aos valores entre $-\pi$ e $+\pi$, sendo divididos por 256 níveis de cinza para um sistema de imagem de 8 bits.

A maior dificuldade deste trabalho consiste em eliminar a ambigüidade da fase $\Phi(i,j)$ do Mapa de Fase que é devida ao fato da função tangente estar limitada entre $-\pi$ e $+\pi$, logo não é possível distinguir os valores de fase que ultrapassam esses limites pois os valores da função tangente repetem-se. Tal ambigüidade aparece nos mapas de fases como regiões que não acompanham a variação de fase das regiões próximas. São variações bruscas nos valores da fase, isto é, uma variação de fase maior do que π, em módulo. Tais variações são conhecidas como saltos de fase. Quando ocorre tal ambigüidade é dito que a fase está com ambigüidade (*wrapped phase*). E quando removemos a ambigüidade dizemos que a fase está sem ambigüidade (*unwrapped phase*). Este processo de retirada da ambigüidade é chamado de *unwrapping* [9, 10].

Itoh [9] demonstrou, para o caso unidimensional, que o processo de retirada de ambigüidade consiste em fazer a integração das fases:

$$\phi(m) = \phi(0) + \sum_{n=1}^{m} W_2[\Delta W_1[\phi(n)]], \tag{3.1}$$

onde W é o operador de ambigüidade (*wrapping*) que atua sobre a fase $\phi(n)$. Podemos

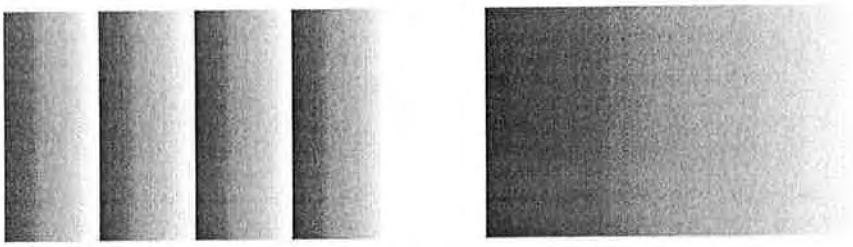

Figura 3.1: Mapas de Fase. Na figura (a) temos a presença da ambigüidade (*wrapped phase*). Na figura (b) não temos a ambuiguidade (*unwrapped phase*).

ler esta equação como: o valor da fase, sem ambigüidade, de um ponto m em relação ao ponto 0, é recuperado com a integração da diferença de fase com ambigüidade. Isto é, vamos somar, ou subtrair, quantas vezes forem necessárias a quantidade de 2π para retirar a ambigüidade. Ghiglia *et al.* [11] estenderam para o caso bidimensional[1], podemos percorrer o caminho:

$$\phi(m,n) = \phi(m,0) + \sum_{l=1}^{n} W_2[\Delta_n W_1[\phi(m,l)]], \tag{3.2}$$

onde:

$$\phi(m,0) = \phi(0,0) + \sum_{j=1}^{m} W_3[\Delta_m W_1[\phi(j,0)]], \tag{3.3}$$

ou outro caminho:

$$\phi(m,n) = \phi(0,n) + \sum_{j=1}^{m} W_3[\Delta_m W_1[\phi(j,n)]], \tag{3.4}$$

onde:

$$\phi(0,n) = \phi(0,0) + \sum_{l=1}^{n} W_2[\Delta_n W_1[\phi(0,l)]]. \tag{3.5}$$

A retirada de ambigüidade não é um problema restrito apenas aos Mapas de Fase da Interferometria Óptica mas ocorre também em áreas como : *Synthetic Aperture Radar* (SAR) e *Magnetic Resonance* (MR). A primeira área trata do mapeamento topográfico usando ondas de radar. E a segunda área trata de imagens médicas. Algumas técnicas são aplicadas a duas ou mais áreas mas outras técnicas são muito restritas, como o trabalho de Saldner [8] *et al.* que é aplicado ao estudo de deformações/carga mecânica na Engenharia.

[1] Vide seção Técnica de Autômato Celular.

Ao longo dos anos foram publicados diversos trabalhos sobre técnicas de retirada de ambigüidade. Podemos conhecer algumas delas em dois artigos que apresentam uma revisão sobre alguns trabalhos que ganharam destaque em sua época. Em 1994 Judge *et al.* [6] apresentam várias técnicas : *Cellular Automata*, *Noise-Immune Cut*, *Flood Phase*, *Phase Unwrapping by Regions*, *Minimum Spanning Tree*, *Band Limits of a Function* e *Temporal Phase Unwrapping*. Cinco anos mais tarde Strand *et al.* [12] apresentam outras técnicas: *Block Least Squares*, *Adaptive Integration*, *Quality Guided Path Following*, *Mask Cut*, *Multigrid*, *Preconditioned Conjugate Gradient*, *Flynn's* e *Liang's*. Embora existam muitas técnicas, nem sempre são aplicáveis, portanto o uso de uma técnica ou de outra depende das condições existentes em cada caso.

Um caso didático e simples de ser entendido é o de um espelho plano e inclinado como uma cunha (vide parte (a) da figura 3.1). Neste caso os vários saltos de fase variam igualmente, a cor preta corresponde ao valor de fase $-\pi$ e a cor branca corresponde ao valor de fase $+\pi$, então podemos retirar a ambigüidade somando múltiplos valores de 2π, para cada salto de fase percorrido a partir do canto superior à direita em direção ao canto inferior esquerdo. Após isto obtemos um Mapa de Fase sem a ambigüidade e a partir daí a superfície 3D da cunha (vide parte (b) da figura 3.1) usando a equação 2.8.

A técnica de retirada de ambigüidade descrita acima é a mais simples que existe, porém a maioria dos casos reais é mais complicada e esta técnica não consegue resolver. Na última década surgiram vários trabalhos tentando resolver tal problema. Vamos utilizar a técnica do Automato Celular conforme descrito mais adiante.

3.1 Técnica de Varredura de Franjas

Esta técnica, explicada sucintamente acima, foi aplicada ao caso do espelho plano. Faz-se uma varredura pelo mapa de fase em uma dada direção, linha a linha ou coluna a coluna. Comparando a fase entre dois pontos consecutivos, verificamos se ocorre um salto de fase, isto é, uma variação de fase maior do que π, em módulo, se ocorrer então é feito um acréscimo ou descréscimo no valor da fase dos pontos seguintes conforme descrito abaixo:

- $\Delta\Phi$ maior do que π - temos a variação de fase do tipo $\Phi_1 = -\pi$ para $\Phi_2 = +\pi$, então subtraímos à fase de Φ_2 e dos demais pontos um valor 2π, pois a diferença tornar-se-à menor ou igual a π.

- $\Delta\Phi$ menor do que -π - temos a variação de fase do tipo $\Phi_1 = +\pi$ para $\Phi_2 = -\pi$, então somamos à fase de Φ_2 e dos demais pontos um valor 2π, pois a diferença tornar-se-à menor ou igual a π.

Fazemos este procedimento a cada vez que encontrarmos um salto de fase. Por exemplo, se houvesse 3 saltos de fase em perfil de um Mapa de Fase (vide figura 3.2 (a)) faremos :

- um acréscimo de 2π nos valores de fase entre o primeiro e o segundo saltos de fase;

- um acréscimo de 4π nos valores de fase entre o segundo e o terceiro saltos de fase;

- um acréscimo de 6π nos valores de fase entre o terceiro salto de fase e o final do perfil;

obtendo um perfil sem nenhum salto de fase (vide figura 3.2 (b)).

Após esta etapa inicial é preciso modular a fase em todos os pontos do Mapa de Fase para que fiquem no intervalo entre -π e π. Então no Mapa de Fase não deverá aparecer nenhum salto de fase.

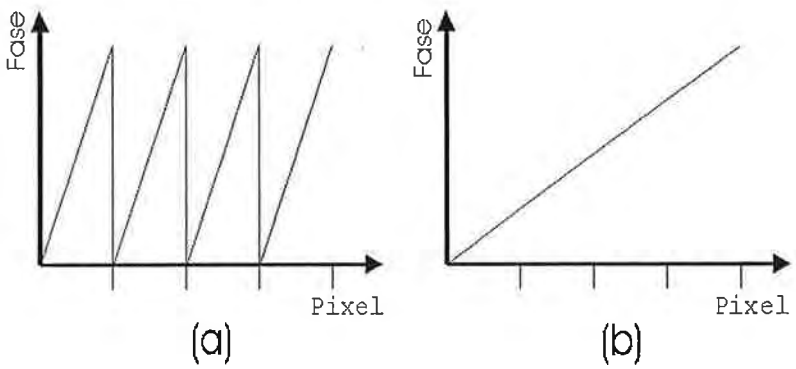

Figura 3.2: Perfil de uma Mapa de Fase. Na figura (a) temos o perfil com 3 saltos de fase. Na figura (b) não temos nenhum salto de fase.

Esta técnica é do tipo dependente do caminho (*path-dependent*) pois se percorrermos caminhos diferentes obteremos resultados diferentes. Outro ponto negativo é o fato desta técnica ser muito sensível à ruídos.

3.2 Técnica de Autômato Celular

Esta técnica foi desenvolvida por Ghiglia *et al.* [11] em 1986. Como dito anteriormente temos que a retirada de ambiguidade procede-se pela integração das fases dos pontos vizinhos, como na equação 3.2.

O algoritmo desta técnica desenvolve a integração das fases através de uma série de regras que são aplicadas a uma matriz de valores, neste caso o Mapa de Fase, aonde cada ponto é dito ser um célula. As mudanças impostas a cada ponto dependem do estado (valores) dos seus vizinhos ortogonais em um dado instante de tempo t, isto é, se um dado ponto muda de estado os seus vizinhos sentirão a sua mudança no instante de tempo seguinte ($t+1$). Tais mudanças são o incremento ou o decremento dos estados até que se chegue a um mapa de fase sem ambigüidades. As regras aplicadas são as seguintes :

1. Cada ponto olha os seus primeiros vizinhos ortogonais, sendo quatro ao todo, não são considerados os vizinhos diagonais (os pontos na borda do mapa olham apenas dois ou três vizinhos). A diferença de fase entre o ponto de interesse e cada um dos vizinhos é calculada ($\Phi_{ponto} - \Phi_{vizinho}$).

2. Ao dividir a diferença de fase por 2π radianos e aproximando ao menor inteiro mais próximo obtemos a força de voto de cada vizinho, que é o número de inteiros de 2π radianos necessários para superar as respectivas diferenças de fase. A força de voto é uma quantização da influência do estado do vizinho sobre o ponto atual, depois a força é acumulada.

3. O valor do ponto é mudado pelo valor de 2π radianos se o acumulado de forças de voto for não-nulo. A direção, positiva ou negativa, da alteração depende das direções das forças de voto de cada vizinho, isto é, pela direção do acumulado, se for negativo a alteração será negativa, caso contrário será positiva.

4. Se nenhum vizinho difere mais do que π radianos do ponto de interesse, nenhuma alteração é feita no ponto. Se o acumulado de força é igualmente zero, o ponto é mudado por $+2\pi$ radianos.

Ao atender todas as regras numeradas acima, teremos percorrido uma iteração local. Porém ainda não teremos um Mapa de Fase sem a ambigüidade. Após mais algumas iterações locais obtemos um Mapa de Fase com alguma ambigüidade, mas em quantidade menor do que o mapa original, e os valores de fase de cada ponto do mapa oscilando entre dois estados apenas. Este ponto fecha uma iteração global e para avançar é calculada a média dos dois estados e o processo começa novamente com as iterações locais. A iteração global finaliza quando chegamos a um estado constante e único, então teremos o Mapa de Fase sem ambigüidade (*unwrapped phase*).

Antes de iniciar o processo, é feito um levantamento para detectar os defeitos no Mapa de Fase, que é um processo para isolar os pontos de inconsistência e não considerá-los na execução da técnica. Tomando uma região de 2 x 2 pixels, como um laço, e verificando se a soma das diferenças de fase de cada dupla de pontos vizinhos é nula, então os 4 pontos são ditos consistentes, senão serão marcados como inconsistentes e o algoritmo de retirada de ambigüidade não é aplicado a eles. A inconsistência indica que tal região apresentará problemas se for processada pelo algoritmo.

Esta técnica é do tipo independente do caminho (*path-independent*) pois se percorrermos caminhos diferentes obteremos resultados iguais. E também ela é pouco sensível à ruídos. Estas eram as limitações da técnica de Varredura de Franjas. Portanto vamos utilizar esta técnica para retirar a ambigüidade do Mapa de Fase.

Após o trabalho de Ghiglia surgiram algumas variantes mas apenas parte delas são aplicáveis, dependemos do tipo de aplicação, técnicas de processamento e equipamentos. Adotamos a variante desenvolvida por Spik *et al.* [13] que difere ligeiramente da técnica desenvolvida por Ghiglia *et al.*. A diferença é quanto ao processo que isola os defeitos no mapa. A quantidade de pontos analisados é maior, são 8 pontos em forma de laço, o que

aumenta a velocidade do processamento. E o processo é aplicado antes da primeira iteração global e ao fim de cada iteração global.

Capítulo 4

Montagem Experimental

Antes de calcular o mapa de fase da superfície é preciso obter os interferogramas usando como montagem experimental um interferômetro. Existem vários tipos de interferômetro e para este trabalho foi utilizado o interferômetro de Twyman-Green [14], patenteado em 1916 para testar prismas e objetivas de microscópio. Este tipo de interferômetro é uma variação do interferômetro de Michelson usado para testar componentes ópticos.

Os interferogramas obtidos são capturados por uma câmera *CCD*, digitalizados e armazenados num microcomputador. A partir dos interferogramas digitalizados e através de um programa de microcomputador calcula-se o Mapa de Fase, são retiradas as ambigüidades do Mapa de Fase e calcula-se a microtopografia da área de análise.

4.1 Interferômetro de Twyman-Green

O interferômetro (vide figura 4.1) é composto pelos seguintes elementos:

- mesa óptica com suportes para isolamento de vibrações (Newport Co.);
- fonte cilíndrica de luz *laser* de He-Ne, potência nominal mínima de 5 mW, comprimento de onda de 632,8 nm e cintura de feixe (*beam-wast*) de 0,8 mm (Melles Griot, Inc.);
- cubo divisor de feixe, transmitância de 50%/ refletância de 50%, não polarizado, dimensões 30 x 30 x 30 mm (Melles Griot, Inc.);

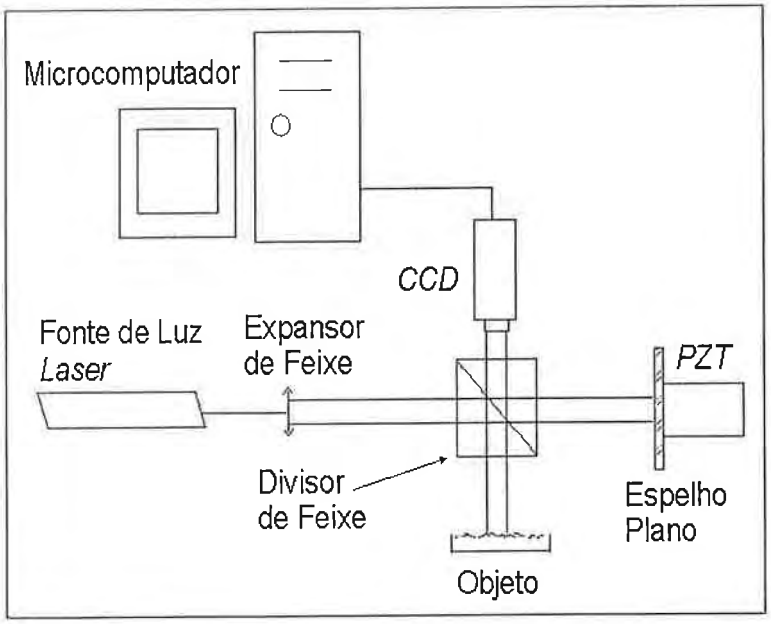

Figura 4.1: Montagem Experimental.

- lente objetiva de microscópio, aumento de 10X (Newport Co.);
- *pinhole* de diâmetro de $50\mu m$ (Melles Griot, Inc.);
- lente tipo dubleto, comprimento focal 117,5 mm, acromática;
- espelho plano de dielétricos, planicidade $\lambda/10$ (Thor Labs, Inc.);
- câmera *CCD* monocromática, modelo KP-M1, com resolução de 480 x 640 *pixels*, tamanho nominal de cada *pixel* é de 11μm por 13μm (Hitachi Denshi Ltda.);
- placa digitalizadora DT-3155, 640 x 480 *pixels* (60Hz), 8 bits, velocidade 1/30 s (60Hz) (Data Translation, Inc.);
- deslocador piezo-elétrico (*PZT*)[1], modelo PZL-015, deslocamento máximo de $10\mu m$ (Burleigh Instruments, Inc.);
- controladora do deslocador *PZT* (*step driver*), modelo PZ-100 (Burleigh Instruments, Inc.);
- microcomputador com microprocessador Pentium MMX de 200 MHz;

[1]Para maiores informações veja a seção 4.4

- sistema operacional DOS 6.22 / Windows 3.11.

Os três últimos itens acima, não fazem parte diretamente do interferômetro mas auxiliam na tomada de dados e na variação de fase do feixe referência.

O interferômetro foi montando sobre a mesa óptica. A fonte de luz *laser* emite um feixe fino que é expandido e filtrado pelo conjunto objetiva de microscópio, *pinhole* e dubleto. O feixe expandido tem cintura de feixe (*beam-wast*) de 6,4 $\pm 0,2$ mm. Depois é dividido pelo cubo divisor de feixe. Um dos feixes incide sobre um espelho de referência (espelho plano) e retorna ao divisor de feixe. O outro feixe incide sobre o objeto a ser analisado, que provoca uma mudança de fase no feixe de luz refletido devido à distribuição de alturas da superfície. Os feixes se combinam no divisor de feixe e incidem sobre a câmera *CCD*. Os dois feixes estão defasados porém coerentes, formando franjas de interferência no plano da câmera *CCD*. O espelho de referência está montado sobre o deslocador piezo-elétrico *PZT* que tem a função de modular a fase do feixe de referência efetuando deslocamentos na mesma direção do feixe e em distâncias conhecidas, geralmente da ordem do comprimento de onda da luz (λ) utilizada ou de frações da mesma. A câmera *CCD* captura o interferograma e depois o microcomputador digitaliza a imagem pela placa digitalizadora. Ao final de cada deslocamento do *PZT* iremos capturar uma imagem com o programa Global Lab, da empresa Data Translation. O processamento dos dados será feito através de algoritmos computacionais desenvolvidos e comerciais.

4.1.1 Alinhamento da Montagem

É necessário extremo cuidado no alinhamento do interferômetro e o uso de componentes de excelente qualidade, caso contrário não teremos ondas planas chegando ao divisor de feixe, então estaremos fugindo das condições teóricas assumidas. Uma das causas para a deformação das frentes de onda são as aberrações ópticas presentes em lentes. No caso das frentes de ondas serem não-planas ocorrem franjas no interferograma, portanto o interferograma apresentará franjas além daquelas que seriam oriundas apenas do objeto sob análise. O capítulo 2 da referência [14] possue algumas figuras de aberrações que ilustram o efeito

da presença de diversas aberrações no interferograma.

Para fazer o alinhamento utiliza-se como objeto um espelho plano de boa qualidade. Neste caso deveremos ter um interferograma formado apenas por ondas planas, então todos os pontos do interferograma deverão ter a mesma intensidade, a não ser pela presença de franjas devido a algum defeito ou sujeira nos componentes do interferômetro, ou alguma outra fonte de ruído. E caso desloquemos o objeto na mesma direção do feixe de luz obteremos uma variação na intensidade do interferograma.

Caso ocorram franjas circulares no interferograma temos um indício de que a onda que sai da lente colimadora não é plana mas sim esférica. As fontes de ruído podem ser:

- aberrações na lente objetiva de microscópio e / ou lente colimadora do feixe;
- desfocalização da lente objetiva de microscópio e / ou lente colimadora do feixe;
- descentralização da lente colimadora do feixe.

Quanto as aberrações somente podem ser sanadas pela troca de componentes previamente corrigidos. Para a desfocalização e a descentralização podemos corrigir orientando-se pela forma das franjas. Quanto mais longe do foco e/ou do centro das lentes as franjas diminuem de espessura e a quantidade visível torna-se maior pois as frentes de onda estarão mais esféricas. Quando se está mais perto do foco e do centro, temos que as franjas tendem a ter um diâmetro maior e a sumir do campo visual, pois as ondas serão quase-planas. Informações adicionais podem ser obtidas no trabalho de Oliveira [15] *et al.*

Outro ponto crítico no interferômetro é o diâmetro do *pinhole* usado, pois se não houver uma filtragem adequada, ocorrerão franjas ao redor da mancha que sai do filtro espacial e que perturbarão o interferograma. Abaixo temos a relação[2] que define o diâmetro do *pinhole* ($D_{pinhole}$) em termos de outros parâmetros da montagem :

$$D_{pinhole} = \frac{2,4 \cdot \lambda \cdot f_{objetiva}}{d_{laser}} \tag{4.1}$$

[2]Esta relação é fornecida nos catálogos dos fabricantes de filtro espacial, em nosso caso usamos o catálogo da Melles Griot.

Na relação acima, λ é o comprimento de onda do *laser* utilizado, $f_{objetiva}$ é o comprimento focal da objetiva e d_{laser} é a cintura de feixe do *laser* utilizado.

Para o alinhamento da câmera *CCD*, a solução encontrada foi de alinhar com um espelho, isto é, colocar um espelho plano apoiado na entrada da *CCD* e o forçar o feixe de um dos braços refletir sobre o mesmo caminho do outro braço.

4.2 Programas de Cálculo e de Captura de Imagens

A captura dos interferogramas foi feita pelo programa Global Lab enquanto que os cálculos foram feitos em programas específicos ou genéricos.

Os programas de cálculo (mapa de fase, retirada de ambigüidade e microtopografia) foram construídos para o ambiente Windows 3.11 com o compilador Borland C++ v4.5 e com as bibliotecas de funções da Data Translation Global Lab [16]. As bibliotecas de funções agilizam a programação e o processamento das imagens que forem capturadas pelas placas digitalizadoras da Data Translation, neste trabalho foi utilizado a placa DT-3155. Os algoritmos dos programas estão descritos nos artigos mencionados anteriormente. Foi escolhido o sistema operacional Windows 3.11 devido ao fato da placa DT-3155 operar com o programa Global Lab somente nesse sistema operacional.

Além dos programas construídos foi utilizado o programa MathCad Professional v8.0, da Mathsoft. Este programa foi utilizado para reduzir a quantidade de programas a serem desenvolvidos. Sem ele seria necessário construir programas para fazer o traçado de superfície e para analisar a microtografia obtida.

O procedimento a ser utilizado é o seguinte :

1. capturar as imagens com o programa Global Lab;
2. calcular o Mapa de Fase;
3. retirar a ambigüidade do Mapa de Fase;

4. calcular a microtopografia;

5. traçar e analisar a supefície com o programa Mathcad.

4.3 Câmera *CCD*

É importante destacar algumas qualidades deste equipamento que influenciam diretamente na precisão da medida, conforme descrito por Creath [1].

A câmera *CCD* utilizada é o modelo KP-M1 da Hitachi. Ela fornece imagens de 8 bits, em escala de níveis de cinza, e cada pixel fornece intensidade variando de 0 a 255.

É importante destacar um trabalho de análise desta câmera feito por Blane *et al.* [17] utilizando figuras de difração bem conhecidas. Este trabalho verificou a perfeita linearidade desta câmera e bem como a funcionalidade das linhas pares e ímpares. Além disso um dado importante é a resolução espacial medida que foi de $70\mu m$. A distância medida entre pixels de uma imagem foi de $12,3(2)\mu m$ (direção x) e $12,3(1)\mu m$ (direção y).

4.4 Deslocador *PZT*

O *PZT* da Burleigh modelo PZL-015 é uma peça de cerâmica que dilata ao receber uma tensão elétrica, o *PZT* recebe uma tensão elétrica de uma controladora *Step Driver* PZ-100 da Burleigh. Este último equipamento transforma o deslocamento que informamos a ele em uma tensão de saída que é aplicada ao *PZT*. Quanto maior a tensão aplicada maior a dilatação e maior o deslocamento.

Este modelo de microdeslocador tem deslocamento máximo de $10\mu m$ ao receber a tensão de 100V, enquanto que a controladora trabalha com tensão máxima de saída de 100 V, com resolução de 1V por passo. Na controladora existe o parâmetro Percurso Máximo (*Maximum Travel*) o que permite ajustar a resolução da voltagem de saída. Este parâmetro informa qual é o deslocamento máximo do *PZT*, sendo o maior valor de 250. Ao aumentar o valor do parâmetro temos que o valor da tensão aplicada diminui para cada passo, o

que resulta em passos menores no *PZT*. Por exemplo, se ajustamos Percurso Máximo = 250, temos que a cada passo acionado na controladora, estaremos aplicando a tensão de 100V/250 = 0,4 V.

O *PZT* opera em condições não ideais, por exemplo, a umidade do ambiente é da ordem de 70% de umidade relativa, enquanto que o fabricante recomenda operar e armazenar abaixo de 50% de umidade relativa. Portanto será necessário calibrar os deslocamentos. Isto será possível usando como objeto um espelho plano levemente inclinado com relação ao espelho plano de referência. O inclinamento introduzirá no interferograma Franjas de Igual Espessura[3]. As franjas podem ser facilmente observadas e principalmente os seus deslocamentos, ao introduzirmos diferenças de fase entre os espelhos com o uso do *PZT*. Ao deslocarmos o espelho de referência com o *PZT* por uma distância igual a $\lambda/2$, todas as franjas deslocarão até que cada franja se posicione na mesma posição da franja vizinha. Portanto se determinarmos a quantidade de passos necessários, na controladora do *PZT*, para que o *PZT* desloque pela distância igual a $\lambda/2$, podemos determinar o quanto deslocou por cada passo, pois basta dividir $\lambda/2$ pela quantidade de passos.

[3]Para maiores detalhes ver cap. 9 da ref.[18]

Capítulo 5

Resultados Experimentais

Neste capítulo apresentaremos, inicialmente, a nossa análise de fonte de erros nas nossas medições, e também apresentaremos procedimentos para eliminar ou minimizar tais fontes de erros. Além disso temos os nossos cálculos para estimar as incertezas de nossas medições.

A seguir vamos apresentar os resultados obtidos com a medição de objetos altamente refletores, segundo a Técnica de Deslocamento de Fase. Os objetos medidos foram espelhos planos e duas redes de Ronchi, gentilmente cedidas pela Profa. Lucila H. D. Cescato (Lab.Óptica - IF-UNICAMP). Também fizemos comparações de alguns resultados com os obtidos analisando Franjas de Igual Espessura.

5.1 Fontes de Erros

Foram detectadas algumas fontes de erros na montagem, elas são:

1. Alinhamento da câmera *CCD*. Se o plano do chip da *CCD* não estiver devidamente alinhado com o plano do interferograma o mapa de fase será distorcido.

2. Calibração do *PZT*. O *PZT* pode não introduzir a variação de fase desejada.

3. Variação na intensidade da fonte de luz *laser*. Pois o equipamento utilizado não é totalmente estabilizado.

4. Correntes de ar. A presença de correntes de ar modifica o índice de refração do meio e acarreta em variações na fase da frente de onda.

5. Vibrações. É similar ao item acima.

O alinhamento da câmera *CCD* foi feito conforme descrito na subseção 4.1.1, um desalinhamento da *CCD*, neste caso, virá do fato de que o plano do chip da *CCD* não esteja alinhado com o bocal da *CCD*, e não há nada a ser feito.

Quanto a calibração do *PZT*, também não há nada a ser feito a não ser estimar os erros. Para isto foram utilizadas franjas de interferência que foram deslocadas e calculadas as variações de fase que originariam tais deslocamentos, depois foram confrontados os valores com os fornecidos à controladora do *PZT*, veja subseção 5.2.1.

Para as três últimas fontes de erros descritas acima não há nada a se fazer, a não ser estimar o erro originado por elas. Elas serão chamadas de Erros Incontroláveis, os cálculos estão na subseção 5.1.1.

5.1.1 Erros incontroláveis

Para estimar estes erros foram capturadas imagens de interferogramas usando como objeto um espelho plano. Foram capturadas várias imagens com intervalos de tempo iguais. Porém foi guardada apenas uma linha de cada imagem, compondo uma imagem com estas linhas. E então teremos uma imagem com linhas verticais que variam lentamente com o tempo, demonstrando a evolução temporal da intensidade daquela linha do interferograma. Para obter esta imagem foi usado o programa Dinamico, que originalmente foi projetado para análise de *speckle* dinâmico[1].

O intervalo de tempo utilizado entre cada linha foi de 15 segundos pois este foi o tempo médio utilizado para poder capturar as imagens para formar o mapa de fase. O tempo total usado foi de 6,25 minutos, o que corresponde a 25 imagens (vide a figura 5.1). E este procedimento foi usado durante cada medida, após um pré-aquecimento da fonte de luz

[1]Maiores informações na referência [19]

Figura 5.1: Imagem com a variação temporal de intensidade da fonte de luz *laser* com 25 linhas.

laser por cerca de uma hora.

Em cada imagem temos várias colunas variando de intensidade, que indicam a evolução temporal de alguns pontos do interferograma original. Porém cada ponto pode variar de uma forma diferente de outro ponto. Para obtermos uma avaliação mais concreta do interferograma como um todo, foi calculada a média dos desvios-padrão da intensidade em cada ponto. Então utilizaremos esta média dos desvios-padrão ($\sigma_{aleatório}$) para os cálculos das incertezas das medidas.

5.1.2 Incertezas da Intensidade do Interferograma

Conforme visto nas subseções anteriores, a intensidade de cada ponto do interferograma depende basicamente de duas fontes de erros: do PZT e de erros incontroláveis. Como são independentes, vamos calcular a incerteza da intensidade como:

$$\sigma_I(i,j) = \sqrt{\sigma^2_{aleatório} + \sigma^2_{PZT}}, \tag{5.1}$$

contudo $\sigma_{aleatório}$ e σ_{PZT} independem da posição (i, j), então podemos escrever da seguinte forma:

$$\sigma_I = \sqrt{\sigma^2_{aleatório} + \sigma^2_{PZT}}. \tag{5.2}$$

5.1.3 Incertezas no Mapa de Fase

Para a **Técnica de 3 Passos**, temos que a fase Φ(i, j) é dada pela equação 2.3, estaremos omitindo a dependência de Φ de (i, j) para facilitar a notação, portanto o cálculo da incerteza será:

$$\sigma^2_\Phi(i,j) = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial I_1}\right)^2 \sigma^2_{I_1}(i,j) + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial I_2}\right)^2 \sigma^2_{I_2}(i,j) + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial I_3}\right)^2 \sigma^2_{I_3}(i,j),$$

abrindo a derivada[2]:

$$\sigma_{\Phi}^2(i,j) = \left(\frac{1}{1+u^2}\frac{\partial u}{\partial I_1}\right)^2 \sigma_{I_1}^2(i,j) + \left(\frac{1}{1+u^2}\frac{\partial u}{\partial I_2}\right)^2 \sigma_{I_2}^2(i,j) + \left(\frac{1}{1+u^2}\frac{\partial u}{\partial I_3}\right)^2 \sigma_{I_3}^2(i,j).$$

onde u é o argumento da função arctan. Fazendo a subtituição de u e abrindo a derivada parcial:

$$\sigma_{\Phi}(i,j) = \frac{1}{1+[\frac{I_3(i,j)-I_2(i,j)}{I_1(i,j)-I_2(i,j)}]^2}\left(\frac{1}{I_1(i,j)-I_2(i,j)}\right)\left\{\left(\frac{I_3(i,j)-I_2(i,j)}{I_1(i,j)-I_2(i,j)}\right)^2 \sigma_{I_1}^2(i,j) + \left(\frac{I_3(i,j)-I_2(i,j)}{I_1(i,j)-I_2(i,j)}-1\right)^2 \sigma_{I_2}^2(i,j) + \sigma_{I_3}^2(i,j)\right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (5.3)$$

Analogamente para a **Técnica de 4 Passos**, em que a fase Φ(i, j) é dada pela equação 2.5, teremos o cálculo da incerteza:

$$\sigma_{\Phi}^2(i,j) = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial I_1}\right)^2 \sigma_{I_1}^2(i,j) + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial I_2}\right)^2 \sigma_{I_2}^2(i,j) + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial I_3}\right)^2 \sigma_{I_3}^2(i,j) + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial I_4}\right)^2 \sigma_{I_4}^2(i,j),$$

e abrindo a derivada:

$$\sigma_{\Phi}^2(i,j) = \left(\frac{1}{1+u^2}\frac{\partial u}{\partial I_1}\right)^2 \sigma_{I_1}^2(i,j) + \left(\frac{1}{1+u^2}\frac{\partial u}{\partial I_2}\right)^2 \sigma_{I_2}^2(i,j) + \left(\frac{1}{1+u^2}\frac{\partial u}{\partial I_3}\right)^2 \sigma_{I_3}^2(i,j) + \left(\frac{1}{1+u^2}\frac{\partial u}{\partial I_4}\right)^2 \sigma_{I_4}^2(i,j).$$

onde u é o argumento da função arctan. Fazendo a subtituição de u e abrindo a derivada parcial:

$$\sigma_{\Phi}(i,j) = \frac{1}{1+[\frac{I_4(i,j)-I_2(i,j)}{I_1(i,j)-I_3(i,j)}]^2}\left(\frac{1}{I_1(i,j)-I_3(i,j)}\right)\left\{\left(\frac{I_4(i,j)-I_2(i,j)}{I_1(i,j)-I_3(i,j)}\right)^2 \sigma_{I_1}^2(i,j) + \sigma_{I_2}^2(i,j) + \left(\frac{I_4(i,j)-I_2(i,j)}{I_1(i,j)-I_3(i,j)}\right)^2 \sigma_{I_3}^2(i,j) + \sigma_{I_4}^2(i,j)\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

5.1.4 Incertezas na Microtopografia

A microtopografia h(i, j) é dada pela equação 2.7, portanto o cálculo das incertezas é dado por:

$$\sigma_h(i,j) = \sqrt{\left(\frac{\partial h(i,j)}{\partial\Phi(i,j)}\right)^2 \sigma_{\Phi}^2(i,j) + \left(\frac{\partial h(i,j)}{\partial\lambda}\right)^2 \sigma_{\lambda}^2 + \left(\frac{\partial h(i,j)}{\partial\theta}\right)^2 \sigma_{\theta}^2 + \left(\frac{\partial h(i,j)}{\partial\theta'}\right)^2 \sigma_{\theta'}^2}$$

[2]Lembrando que a derivada da função arctag u é: ∂arctag u/ ∂x = (1/(1+u^2)).(∂u/∂x).

substituindo h(i, j) e calculando a derivada obtemos:

$$\sigma_h(i,j) = \frac{1}{2\pi(\cos\theta + \cos\theta')}\Big\{(\lambda\cos\theta\cos\theta')^2\sigma_\Phi^2(i,j) + (\Phi(i,j)\cos\theta\cos\theta')^2\sigma_\lambda^2 + (\Phi(i,j)\lambda\cos\theta')^2\Big(-\sin\theta + \frac{\cos\theta\sin\theta}{(\cos\theta+\cos\theta')}\Big)^2\sigma_\theta^2 + (\Phi(i,j)\lambda\cos\theta)^2\Big(-\sin\theta' + \frac{\cos\theta'\sin\theta'}{(\cos\theta+\cos\theta')}\Big)^2\sigma_{\theta'}^2\Big\}^{\frac{1}{2}} \tag{5.5}$$

No caso simplificado da equação 2.8, temos:

$$\sigma_h(i,j) = \frac{1}{4\pi}\sqrt{\lambda^2\sigma_\Phi^2(i,j) + \Phi^2(i,j)\sigma_\lambda^2}. \tag{5.6}$$

Considerando desprezível a incerteza no comprimento de onda, teremos:

$$\sigma_h(i,j) = \frac{\lambda\sigma_\Phi(i,j)}{4\pi}. \tag{5.7}$$

5.2 Espelho Plano

Um bom exemplo para avaliarmos as condições da montagem e dos programas é utilizar como objeto um espelho plano de boa qualidade, pois quando o espelho-objeto está devidamente alinhado paralelamente ao espelho de referência temos que o interferograma deve ser uma imagem de intensidade uniforme, a não ser pela presença de algumas franjas devido a algum ruído como alguma sujeira ou poeira na superfície dos componentes ópticos, como descrito na seção 5.1. E neste caso o mapa de fase deve ter uma tonalidade de nível de cinza constante.

Inclinando o espelho-objeto em uma dada direção vemos a presença de franjas retas devido a diferença constante na fase. As franjas são perpendiculares à direção de inclinação do espelho, ou em outras palavras, paralelas ao eixo de rotação do mesmo. Tais franjas são conhecidas como franjas de Igual Espessura, pois temos uma fonte monocromática e colimada, o índice de refração é constante (n $\cong$ 1), logo somente a espessura varia. Podemos associar a diferença de fase introduzida como se as franjas fossem produzidas por uma cunha de ar, vide figura 5.2. Então temos que a distância Δx entre duas franjas máximas consecutivas é dada por:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\alpha}, \tag{5.8}$$

onde α é o ângulo de abertura da cunha e λ é o comprimento de onda da luz incidente na cunha. Podemos manipular esta equação para obter:

$$\alpha = \frac{\lambda}{2\Delta x}, \tag{5.9}$$

portanto poderemos comparar a inclinação obtida pela medição das Franjas de Igual Espessura com aquela obtida ajustando um plano inclinado na microtopografia do espelho plano inclinado. Além disso podemos utilizar as Franjas de Igual Espessura para calibrar o *PZT*, vide subseção 5.2.1.

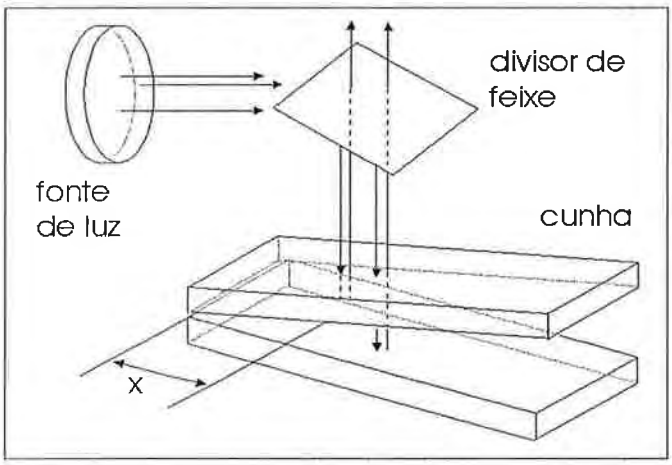

Figura 5.2: Cunha de Ar, neste caso temos as franjas de Igual Espessura.

Da posição dos picos podemos determinar o valor de Δx e usando $\lambda = 0,6328\mu m$ obtemos o valor de α. Para obter o valor Δx precisamos medir as posições das franjas claras. Tentar medir diretamente a posição do pico é complicado, pois se houver ruído na imagem a forma do pico é deformada. Porém vamos analisar a intensidade em um interferograma que pode ser escrita como:

$$I(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}\cos\Phi(i,j),$$

em nosso caso temos I_1(i, j) = I_2(i, j) = I_0(i, j) então:

$$I(i,j) = I_0(i,j) + I_0(i,j) + 2I_0(i,j)\cos\Phi(i,j)$$

rearranjando:

$$I(i,j) = 2I_0(i,j)\{1 + \cos\Phi(i,j)\} \tag{5.10}$$

usando as relações dos cossenos:

$$\begin{aligned} I(i,j) &= 2I_0(i,j)\left\{1 + \left[\cos^2\frac{\Phi(i,j)}{2} - \sin^2\frac{\Phi(i,j)}{2}\right]\right\} \\ &= 2I_0(i,j)\left\{1 + 2\cos^2\frac{\Phi(i,j)}{2} - 1\right\}, \end{aligned}$$

logo:

$$I(i,j) = 4I_0(i,j)\cos^2\frac{\Phi(i,j)}{2}. \tag{5.11}$$

De onde vemos que as franjas são simétricas e positivas, portanto podemos determinar a posição do pico como a posição média em relação às bordas da franja.

5.2.1 Calibração do *PZT*

Inicialmente, o fabricante aconselha a operar e a armazenar o *PZT* em local com umidade relativa abaixo de 50%, porém isto não foi possível em nosso caso. Para tentar adequar o ambiente fizemos algumas experiências de desumidificar o ambiente com o uso do ar-condicionado. Foi verificado que após cerca de 2 horas de uso do ar-condicionado na capacidade máxima, com a sala vazia, foi possível alcançar o valor de 62% ($\pm$ 1%) de umidade relativa. Normalmente nos dias sem chuva a umidade alcançava valores em torno de 70%, sem o uso do ar-condicionado. Um outro procedimento que mostrou-se eficaz é deslocar o *PZT* até o percurso máximo e voltar, antes de efetuar qualquer medição, junto com o uso do ar-condicionado.

Para fazer a calibração do *PZT* utilizamos as Franjas de Igual Espessura, que foram discutidas acima. O procedimento utilizado foi deslocar o *PZT* para que uma franja clara ocupasse o lugar da franja clara vizinha, este deslocamento corresponde a um incremento de fase de 2π e a um deslocamento do *PZT* de d=$\lambda/2$. Durante este deslocamento foram contados quantos passos eram necessários na controladora. Portanto para determinar qual seria o valor real do deslocamento do *PZT* basta dividir a meia-onda pelo número de passos

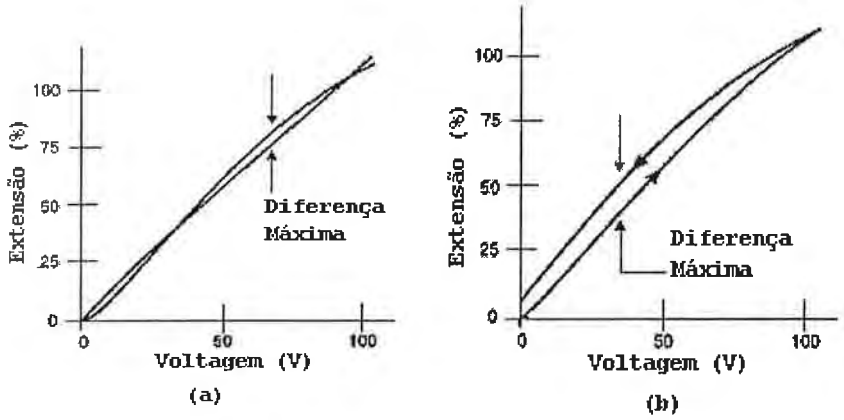

Figura 5.3: (a) Curva de Linearidade do *PZT*. (b) Curva de Histere do *PZT*. [fonte:*PZL/PZO/PZS Operating Manual, Burleigh Instruments, Inc.*].

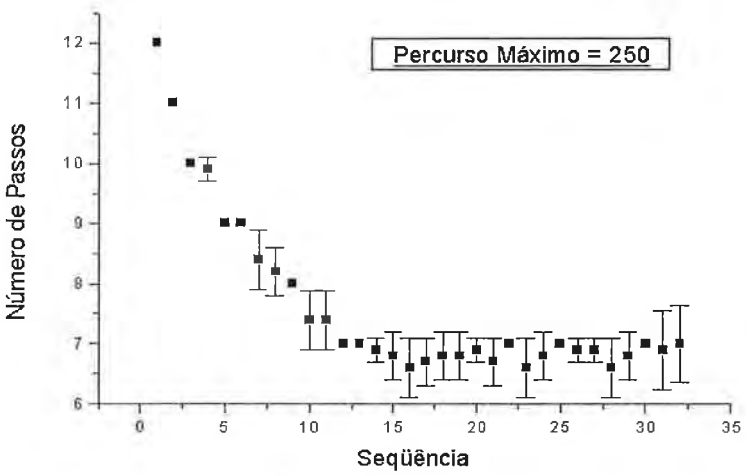

Figura 5.4: Gráfico do estudo da linearidade do *PZT*, Percurso Máximo = 250 μm.

efetuados. Por conseguinte obteremos os incrementos de fase: $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ (Técnica de 4 Passos); e os incrementos: $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4$ (Técnica de 3 passos).

Fazendo uma série de deslocamentos de d=$\lambda/2$ observamos uma falta de linearidade no deslocamento do *PZT* (vide figura (a) de 5.3). Pois a quantidade de passos para deslocar as franjas não era constante. Calculamos a média de cinco séries de medidas, vide figura 5.4.

Tabela 5.1: Calibração do *PZT* - Número de Passos.

Percurso Máximo	Deslocamento (Passos)	Posição Média (pixels)
$250\mu m$	11	-1,1 (± 0,5)
	12	0,5 (± 0,5)
	13	3 (± 1)
$180\mu m$	7	-4,1 (± 0,9)
	8	0 (± 1)
	9	3 (± 1)

Temos que da seqüência 12 em diante observamos uma região linear com valores de 7 passos. Vamos somar a quantidade de passos avançados do começo até a seqüência 9 e multiplicar pela tensão de cada passo para este caso:

$$\frac{100V}{250}.85 = 0,4V.85 = 34V. \tag{5.12}$$

Se analisarmos o gráfico de linearidade, poderemos ver que a curva na região após esta tensão, está mais próxima da reta do que em outros pontos. Porém nesta região, a quantidade de passos necessários não é divisível por 4, pois para a técnica de 4 Passos precisamos de 4 passos de $\pi/2$, o que corresponde a passos de $2\pi/4$.

Recomenda-se operar na região de menor tensão para não danificar o *PZT*, principalmente por tempos longos. Portanto trabalhamos em regiões de baixas tensões apesar da não linearidade.

Outro ponto crucial é a histerese (vide figura (b) de 5.3) que afeta o *PZT*. Portanto todas as medições devem ser feitas sempre a partir de voltagem zero.

Experimentalmente determinamos que para fazer o deslocamento d=$\lambda/2$ precisamos de 12 e 8 passos, para os valores 250 e 180 do parâmetro Percurso Máximo da controladora do *PZT*, respectivamente. Tais valores foram determinados medindo o deslocamento de fran-

Tabela 5.2: Calibração do PZT - Erros Sistemáticos nos Incrementos de Fase.

Incremento de Fase	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
Erro de Desloc.(μm)	-0,006	-0,009	-0,002
Erro relativo	3,8 %	2,8 %	0,4 %
Desloc.Teórico (μm)	0,158	0,316	0,475
Incremento de Fase	$\pi/4$	$3\pi/4$	$5\pi/4$
Erro de Desloc.(μm)	-0,005	-0,01	-0,005
Erro relativo	6,3 %	4,2 %	1,3 %
Desloc.Teórico (μm)	0,079	0,237	0,396

Tabela 5.3: Calibração do PZT - Incertezas nos Incrementos de Fase.

Percurso Máximo	Incremento de Fase	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
$250\mu m$	Posição (μm)	0,073 ($\pm 0,006$)	0,149 ($\pm 0,008$)	0,236 ($\pm 0,009$)
	Incerteza	8,2%	5,4%	3,8%
Percurso Máximo	Incremento de Fase	$\pi/4$	$3\pi/4$	$5\pi/4$
$180\mu m$	Posição (μm)	0,034 ($\pm 0,009$)	0,112 ($\pm 0,009$)	0,193 ($\pm 0,005$)
	Incerteza	26,5%	8,0%	2,6%

jas aonde variamos a quantidade de passos informada na controladora (vide tabela 5.1). E estes valores são ideais para executar os incrementos de fase necessários para as técnicas de Deslocamento de Fase citadas acima. Na tabela 5.2 vemos os valores dos erros sistemáticos nos incrementos de fase devido a não-linearidade do PZT, para cada incremento de fase. Estes valores foram calculados da seguinte forma: primeiro foram medidas as posições dos picos após os incrementos de fase, depois comparadas com as posições teóricas. Os valores em porcentagem são os valores dos erros em relação às posições teóricas.

Determinamos a variação da posição das franjas após os vários incrementos de fase, vide tabela 5.3. Os valores obtidos apresentam incertezas razoáveis, exceto para o incremento $\pi/4$, este valor é muito grande pois está no começo da curva de linearidade aonde podemos ver uma curvatura mais acentuada do que em outros pontos, além do que requer resolução maior do *PZT* do que os outros incrementos de fase. Este valor prejudicará as medidas com a Técnica de 3 Passos, pois as incertezas na Técnica de 4 Passos são bem menores. As incertezas refletem a imprecisão do *PZT* então podemos usá-las como a incerteza do *PZT*, porém tais valores estão em dimensões do comprimento (metro) o que não é adequado para ser usado na equação 5.2. Para isto precisamos convertê-lo em intensidade. Porém esta não é uma tarefa fácil, pois para obtermos a incerteza apenas devido ao *PZT* precisaríamos isolar a incerteza provocada pelo *laser* e de mais informações como visto abaixo:

$$\sigma_I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial \Phi}\right)^2 \sigma_\Phi^2}$$

onde I é dada pela equação 5.10, porém não conhecemos I_0 nem Φ. A melhor solução é estimar que a incerteza em termos da intensidade seja proporcionalmente a mesma que em comprimento, isto é, calculando a razão da incerteza pela extensão percorrida pelo *PZT* e então estimar que proporcionalmente seja igual em termos da intensidade, vide tabela 5.3. Estamos fazendo uma aproximação linear para um caso aonde não temos uma estimativa melhor para fazer. Vamos somar às incertezas dos incrementos, em porcentagem, aos valores de erros sistemáticos calculados acima, em porcentagem, e considerar este valor como a incerteza do *PZT*.

5.2.2 Medidas

Na figura 5.5 ilustramos os interferogramas digitalizados de um espelho plano alinhado e na figura 5.6 temos o Mapa de Fase calculado com esses interferogramas, o Mapa de Fase após processamento, calculado pela Técnica de Automato Celular de Spik, e a microtopografia da superfície que gerou os interferogramas. Podemos notar que os Mapas de Fase antes e depois de ser processado pelo programa de retirada de ambigüidade são idênticos, como o Mapa de Fase inicial não possue saltos de fase então ele não é alterado. Apesar do espelho plano ser de boa qualidade os interferogramas apresentam variações de intensidade. Isto decorre basicamente devido a presença de franjas oriundas dos filmes finos no divisor de

feixe e da cola na lente colimadora, que é um dubleto. Além disso temos um pouco de ruído.

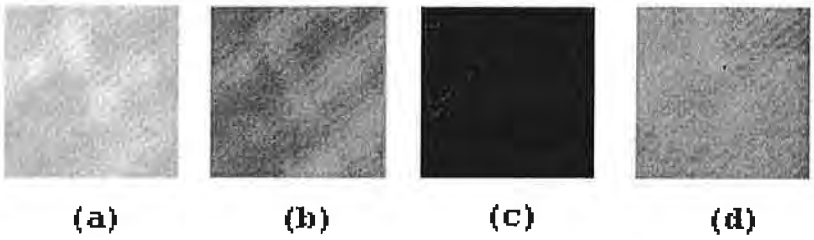

Figura 5.5: Interferogramas de um espelho plano alinhado. (a) $\theta = 0$. (b) $\theta = \pi/2$. (c) $\theta = \pi$. (d) $\theta = 3\pi/2$.

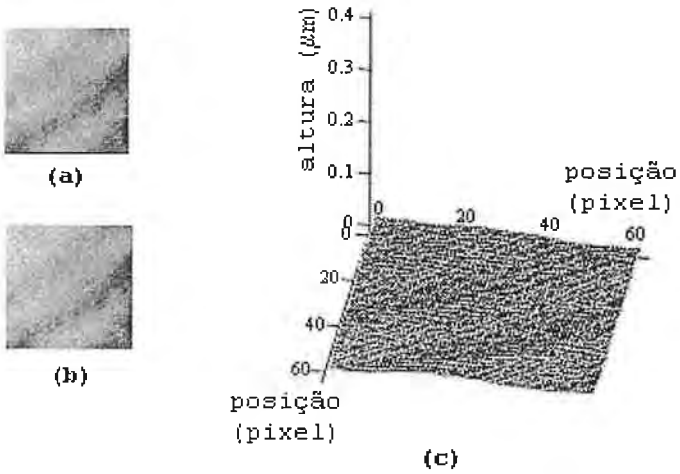

Figura 5.6: Mapas de Fase e traçado de superfície da microtopografia do espelho plano alinhado. (a) Mapa de Fase original. (b) Mapa de Fase após processamento. (c) Microtopografia.

Na figura 5.7 ilustramos os interferogramas digitalizados de um espelho plano inclinado. E na figura 5.8 o Mapa de Fase calculado com os interferogramas digitalizados, e o Mapa de Fase sem a ambigüidade, calculado pela Técnica de Automato Celular de Spik, além disso temos a microtopografia da superfície que gerou os interferogramas. Neste caso vemos uma mudança do mapa de fase original após o processamento, pois tínhamos a presença

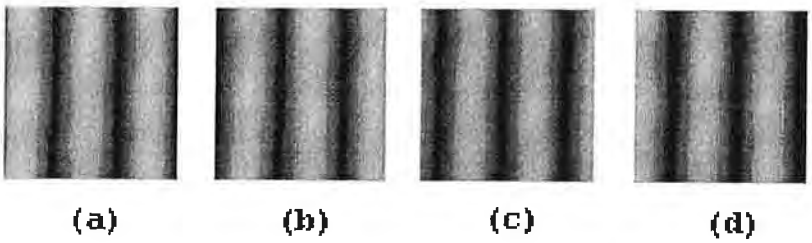

Figura 5.7: Interferogramas de um espelho plano inclinado. (a) $\theta = 0$. (b) $\theta = \pi/2$. (c) $\theta = \pi$. (d) $\theta = 3\pi/2$.

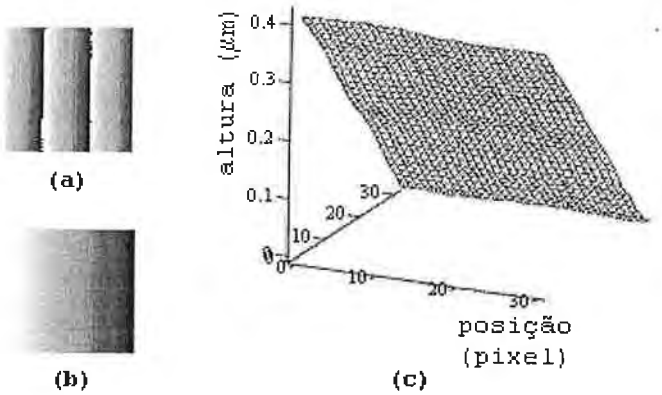

Figura 5.8: Mapas de Fase e traçado de superfície da microtopografia do espelho plano inclinado. (a) Mapa de Fase com ambigüidade. (b) Mapa de Fase sem ambigüidade. (c) Microtopografia.

de saltos de fase no mapa original.

Na tabela 5.4 vemos o ângulo de inclinação (α) obtido por três técnicas, pelo Deslocamento de Fase (4 Passos e 3 Passos) e pela Medição de Franjas de Igual Espessura. As incertezas apresentadas na Técnica de Deslocamento de Fase são pequenas devido ao ajuste de reta feito pela técnica de Mínimos Quadrados. Os valores entre as duas técnicas apresentam uma compatibilidade muito grande. Isto era esperado das técnicas ópticas de grande precisão.

Tabela 5.4: Ângulo de Inclinação do Espelho Plano inclinado, pela Técnica de Deslocamento de Fase (4 Passos e 3 Passos) e pela Medição de Franjas de Igual Espessura.

Medida	Deslocamento de Fase 4P (mrad)	Franjas (mrad)	Deslocamento de Fase 3P (mrad)	Franjas (mrad)
1	1,11 ± 0,01	1,02 ± 0,01	1,12 ± 0,01	1,05 ± 0,01
2	1,11 ± 0,01	1,01 ± 0,02	1,12 ± 0,01	1,06 ± 0,03
3	1,12 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,11 ± 0,01	1,11 ± 0,02
4	1,12 ± 0,01	1,01 ± 0,00	1,12 ± 0,01	1,09 ± 0,02
5	1,12 ± 0,01	1,00 ± 0,02	1,11 ± 0,01	1,19 ± 0,03
média	1,116 ± 0,007	1,01 ± 0,01	1,12 ± 0,01	1,10 ± 0,06

Tabela 5.5: Ângulo de inclinação de Espelho Plano alinhado com o espelho de referência, pela Técnica de Deslocamento de Fase (4 Passos e 3 Passos).

Medida	Deslocamento de Fase 4P (rad) x10^{-5}	Deslocamento de Fase 3P (rad) x10^{-5}
1	2 ± 1	1 ± 2
2	2 ± 1	2 ± 1
3	2 ± 1	3 ± 2
4	2 ± 1	2 ± 1
5	2 ± 1	2 ± 1
média	2 ± 0	2,0 ± 0,7

Na tabela 5.5 vemos o ângulo de inclinação (α) obtido pelas duas técnicas de Deslocamento de Fase (4 Passos e 3 Passos), para o caso do espelho plano alinhado paralelamente ao espelho plano de referência. Estes valores de inclinação do espelho alinhado são duas ordens de grandeza menores daqueles obtidos com o espelho inclinado (vide a tabela 5.4), portanto podemos considerar que o espelho esteja bem paralelo ao espelho de referência.

5.3 Redes de Difração

Medimos duas Redes de Ronchi de 4 l/mm. A imagem analisada tem a área de 128 x 128 pixels, entre dois pixels temos a distância de 12,3 μm.

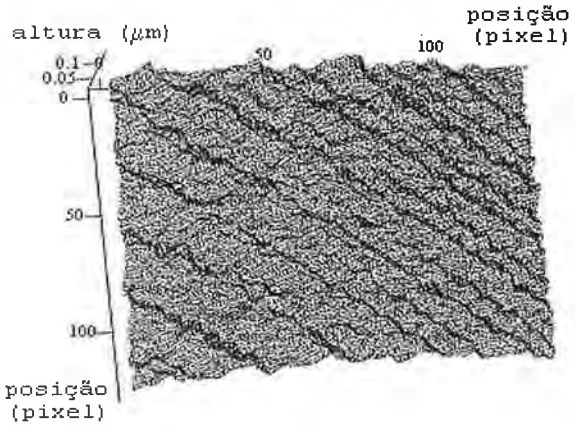

Figura 5.9: Topografia da Rede Ronchi 1, 4 l/mm.

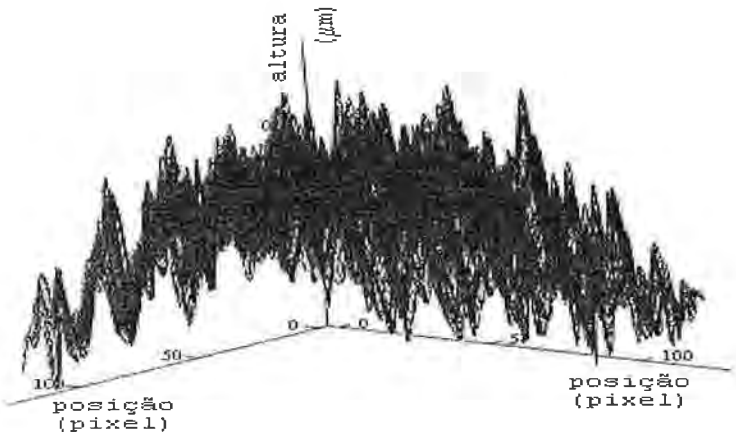

Figura 5.10: Vista lateral da topografia da Rede Ronchi da figura 5.9.

Podemos ver a topografia da Rede 1 na figura 5.9. Podemos visualizar a vista lateral da rede na figura 5.10, esta figura foi obtida através de rotações do traçado de superfície. No caso da Rede 2 podemos ver a microtopografia na figura 5.11 e podemos visualizar a

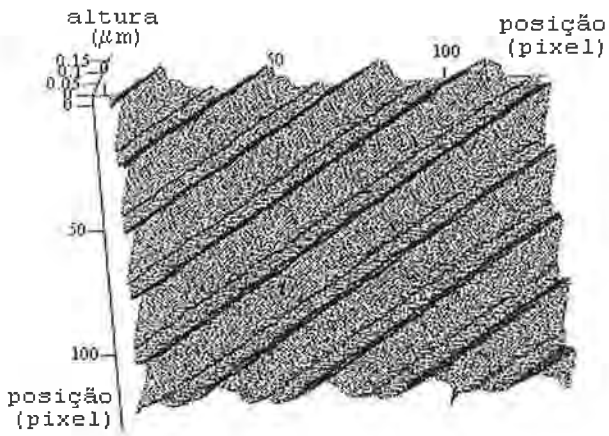

Figura 5.11: Topografia da Rede Ronchi 2, 4 l/mm.

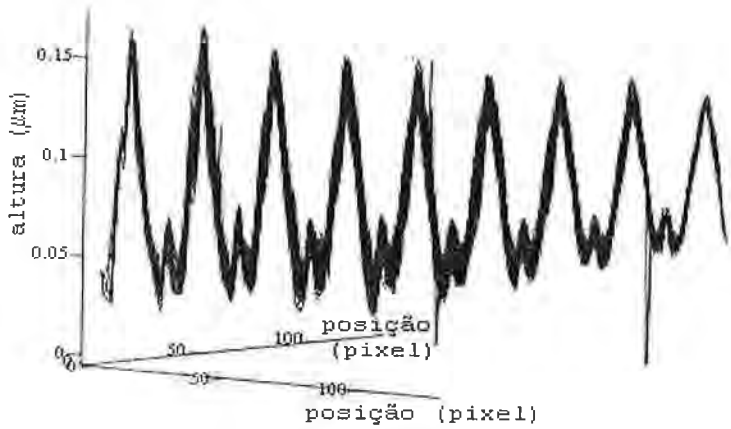

Figura 5.12: Vista lateral da topografia da Rede Ronchi da figura 5.11.

vista lateral da rede na figura 5.12, esta figura foi obtida através de rotações do traçado de superfície.

Observando as figuras 5.9 e 5.11 vemos que as linhas estão inclinadas em relação às bordas da rede. No caso da Rede 1 podemos verificar que as linhas são levemente curvas o que não permite uma visualização boa do perfil das linhas de difração, vide figura 5.10. Porém o mesmo não ocorre com a Rede 2, aonde vemos que as linhas são picos grandes alternados por alguns picos bem menores, vide figura 5.12.

Medimos na Rede 2 o espaçamento de duas linhas de difração vizinhas (L1 e L2). O procedimento adotado foi:

- Determinamos as posições de duas linhas L1 e L2 vizinhas.
- Pelo Método dos Mínimos Quadrados ajustamos duas retas (R1 e R2) em relação a L1 e L2 respectivamente.
- Calculamos a reta perpendicular (Rp) às R1 e R2.
- Calculamos as coordenadas de intersecção da reta Rp e as retas R1 e R2.
- Por último calculamos a distância entre os pontos de intersecção, o que corresponde à distância entre as linhas L1 e L2.

Os valores obtidos indicaram que as linhas são paralelas, o ângulo de inclinação de R1 é -0,812 $\pm$ 0,001 rad e de R2 é -0,842 $\pm$ 0,001 rad. Apesar da diferença entre os valores, podemos admitir que são paralelas devido ao fato de estarmos em uma região pequena, em torno de 1,5 x 1,5 mm^2. O valor obtido de separação das linhas foi de 260 $\pm$ 10 μm e quando comparado com o valor informado de 250 μm podemos admitir que o resultado foi bom.

As alturas das linhas de difração são menores do que 0,20 μm, lidas diretamente no microtopografia, porém estas leituras não são compatíveis com o valor fornecido de 2 μm. Isto ocorre devido às limitações da montagem experimental. Se tentarmos visualizar um objeto como um cilindro, paralelamente ao seu comprimento, isto é, estivermos vendo a sua secção, não conseguiremos obter nenhum informação à respeito do seu comprimento. Para obter esta informação, geralmente, inclinamos um pouco o cilindro e começamos a ver a parte do seu comprimento (a lateral). Porém para podermos visualizar plenamente o seu comprimento precisaríamos inclinar muito. Em nossa montagem uma inclinação acentuada implicaria em sair das condições estabelecidas, os ângulos de incidência e reflexão não seriam nulos, além de não ocorrer a superposição dos feixes. Tentamos ampliar o máximo possível a imagem com um conjunto de lentes, uma objetiva de microscópio com aumento

de 40X e um dubleto de foco 117,5mm. Porém devido a presença de sujeiras nas lentes, principalmente na objetiva de microscópio, e outros ruídos, a imagem ficou cheia de figuras de difração, o que impossibitou a compreensão do que estava sendo observado, além disso os mapas de fase obtidos estavam incompreensíveis. Está claro que esta é uma limitação a esta técnica. Contudo situações aonde o objeto possua detalhes largos, podemos medir corretamente a sua altura, como o caso do espelho inclinado, vide figura (c) de 5.8, aonde vemos que a altura é de 0,4 μm. Quanto a leitura de dimensões laterais podemos dizer que são plenamente satisfatórias, vide a medida de inclinação do espelho plano e a distância entre as linhas da rede de Ronchi.

5.4 Desempenho dos Programas de Retirada de Ambigüidade

Fizemos uma série de testes comparativos simples entre as técnicas de retirada de ambigüidade com o objetivo de caracterizar o comportamento das técnicas frente a variação de tamanho e de quantidade de saltos de fase no Mapa de Fase. As imagens utilizadas estão nas figuras: 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16. O equipamento utilizado para realizar estes testes foi um microcomputador Intel Pentium II 233 MHz, com 64 Kb de memória RAM e sistema operacional MS-Windows 95.

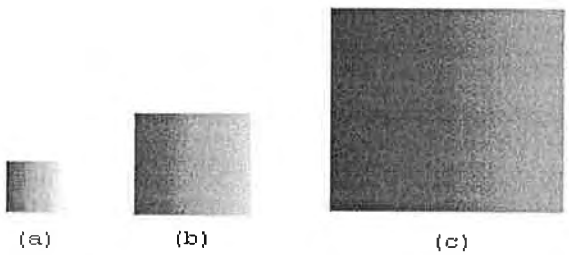

Figura 5.13: Imagens de mapa de fase sem nenhum salto de fase. (a) Imagem de 32x32 *pixels*. (b) Imagem de 64x64 *pixels*. (c) Imagem de 128x128 *pixels*

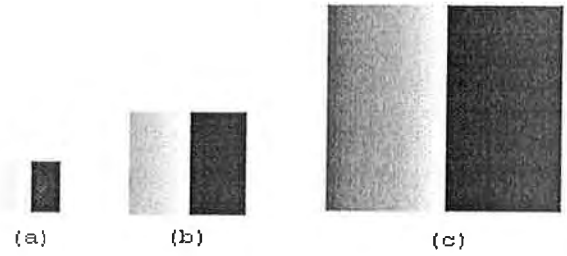

Figura 5.14: Imagens de mapa de fase com ambiguidade, com um salto de fase. (a) Imagem de 32x32 *pixels*. (b) Imagem de 64x64 *pixels*. (c) Imagem de 128x128 *pixels*

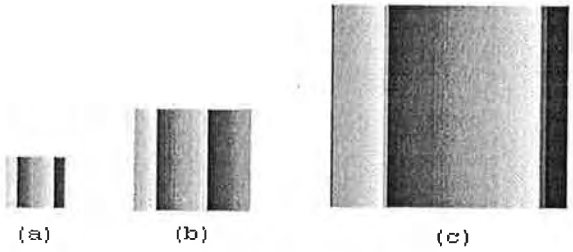

Figura 5.15: Imagens de mapa de fase com ambiguidade, com dois saltos de fase. (a) Imagem de 32x32 *pixels*. (b) Imagem de 64x64 *pixels*. (c) Imagem de 128x128 *pixels*

Foram feitas cinco medidas da mesma imagem e depois foi calculada a média simples. Na maioria dos casos o tempo de execução de cada técnica variou um pouco, pois o sistema operacional não dedica toda a capacidade de processamento ao programa de retirada de ambigüidade, provocando paradas durante o processamento para executar outras tarefas, por exemplo, executar o programa de anti-vírus. O resultado de cada processamento pode ser encontrado na figura 5.17 (na figura (a) vemos para o caso de imagem de tamanho 32x32 *pixels*, na figura (b) vemos para o caso de imagem de tamanho 64x64 *pixels* e na figura (c) vemos para o caso de imagem de tamanho 128x128 *pixels*). Independente da quantidade de saltos de fase presentes no Mapa de Fase o resultado é o mesmo. Temos uma exceção para o caso da figura 5.13 aonde não temos saltos de fase logo não são alterados.

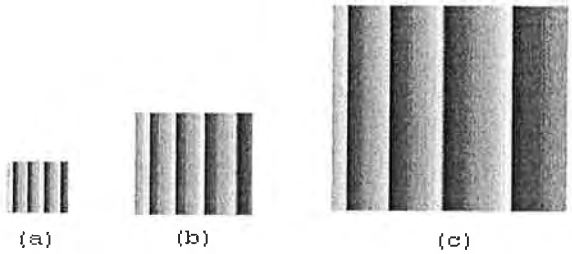

Figura 5.16: Imagens de mapa de fase com ambiguidade, com quatro saltos de fase. (a) Imagem de 32x32 *pixels*. (b) Imagem de 64x64 *pixels*. (c) Imagem de 128x128 *pixels*

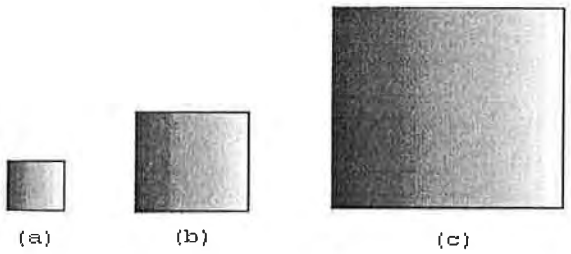

Figura 5.17: Imagens de mapa de fase sem ambiguidade. (a) Imagem de 32x32 *pixels*. (b) Imagem de 64x64 *pixels*. (c) Imagem de 128x128 *pixels*

Analisando os gráficos nas figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21, vemos que a Técnica de Spik é mais rápida do que a Técnica de Ghiglia, e a diferença aumenta quanto maior for o tamanho da imagem a ser processada e maior a quantidade de saltos de fase, porém estas duas técnicas são muito mais lentas do que a Técnica de Varredura. Isto pode ser explicado pelo fato que as técnicas de Automato Celular precisam executar várias iterações para obter o resultado final enquanto que a técnica de Varredura executa apenas uma iteração. Outra característica interessante é que quanto maior a quantidade de saltos de fase presentes na imagem, tanto maior é o tempo de processamento. Podemos notar no gráfico 5.18 que as duas técnicas de Automato Celular não apresentam diferenças, os pontos estão sobrepostos, o que seria esperado já que os mapas de fase utilizados não possuem salto de fase.

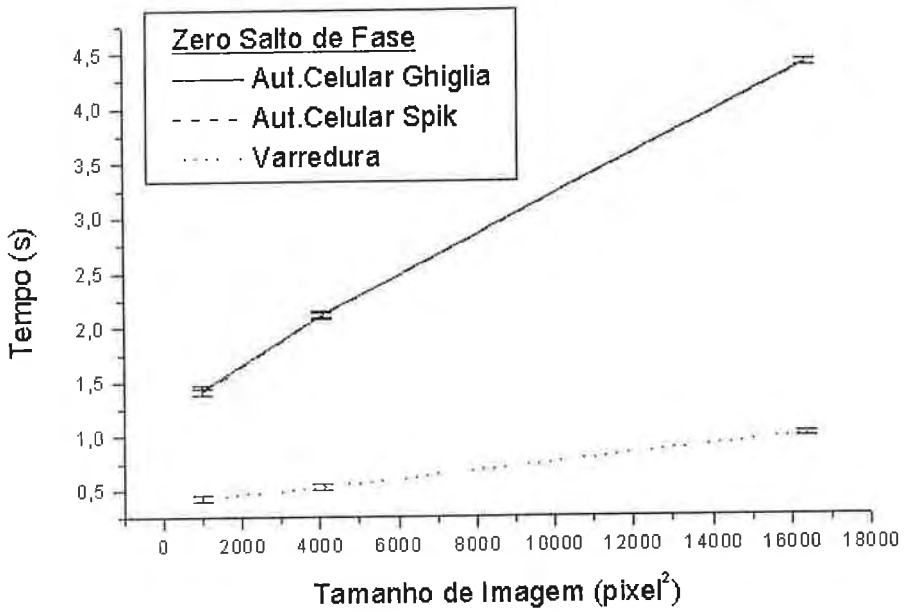

Figura 5.18: Gráfico de Desempenho em Mapas de Fase sem nenhum salto de fase. (Os pontos das duas técnicas de Automato Celular estão sobrepostos.)

Como nem sempre foi possível ver as curvas referentes à Técnica de Varredura de Franjas, esses dados estão mostrados na figura 5.22. Podemos perceber que esta técnica independe da quantidade de saltos de fase presentes na imagem. O que é razoável, pois esta técnica executa uma única iteração. Esta característica também confere a rapidez no processamento. Vemos que aparenta um comportamento linear e aumenta o tempo de processamento com o aumento de tamanho da imagem, o que é razoável.

Fizemos um teste com um mapa de fase com ruído, vide figura 5.23. O Mapa de Fase original apresenta alguns ruídos no topo do mapa. A técnica de Varredura de Franjas, vide figura b, expandiu o ruído por um trecho no topo do mapa, pois percorre o mapa na direção horizontal. Enquanto que as técnicas de Automato Celular isolaram o ruído sem expandí-lo.

Na tabela 5.6 fazemos uma comparação entre as técnicas expostas, discutindo algumas características delas.

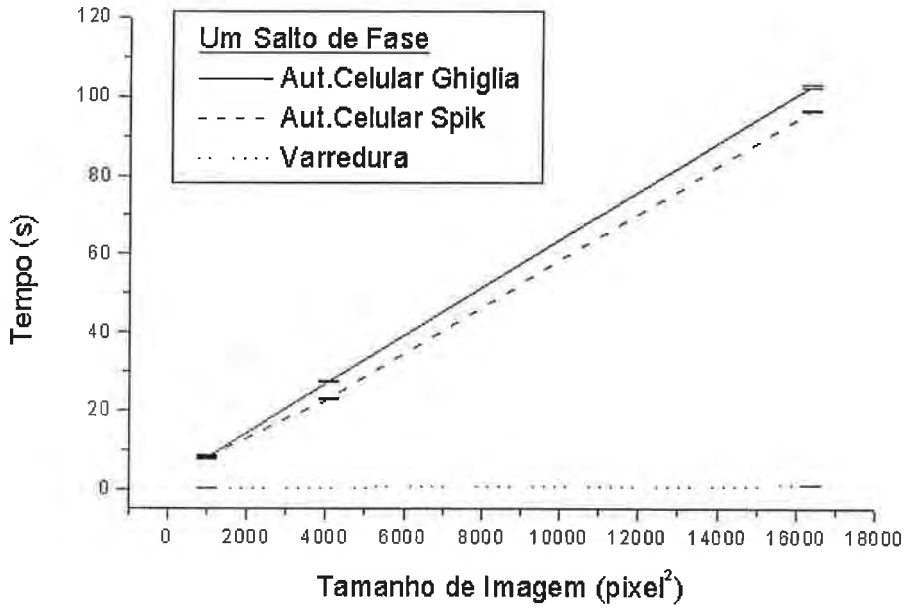

Figura 5.19: Gráfico de Desempenho em Mapas de Fase com um salto de fase.

Tabela 5.6: Comparação entre Técnicas

Técnica	vantagens	desvantagens
Autômato Celular	processa casos difíceis	meio lento
Varredura de Franjas	rápido	não processa casos difíceis

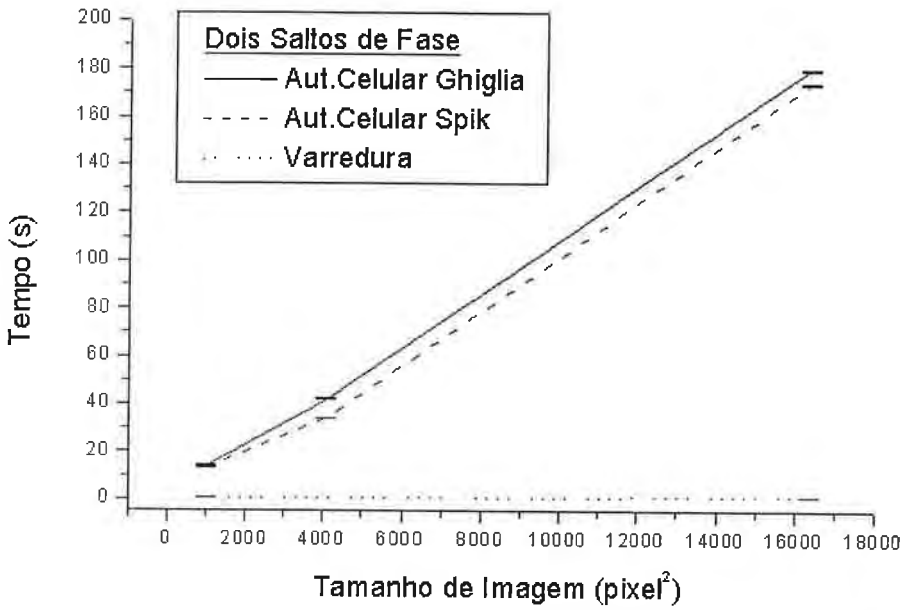

Figura 5.20: Gráfico de Desempenho em Mapas de Fase com dois saltos de fase.

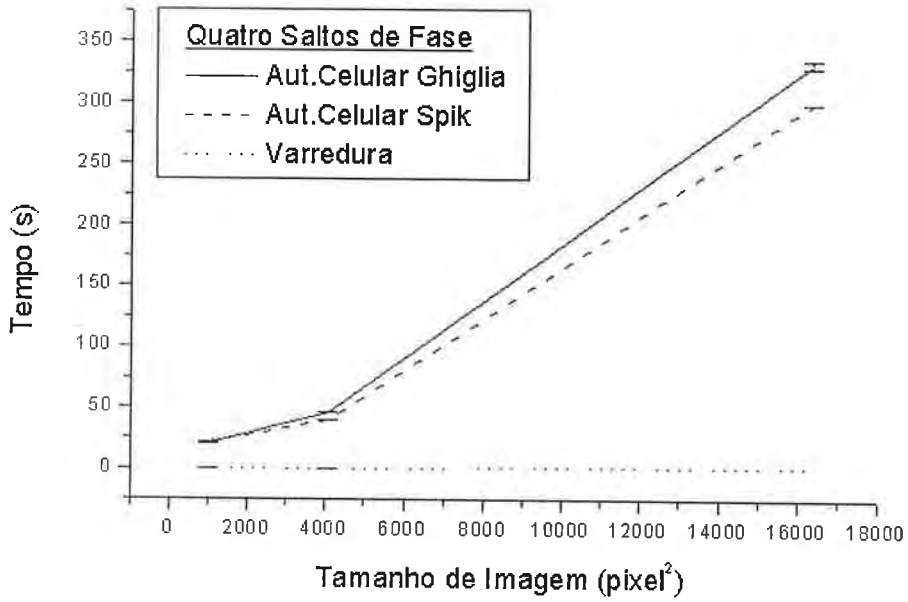

Figura 5.21: Gráfico de Desempenho em Mapas de Fase com quatro saltos de fase.

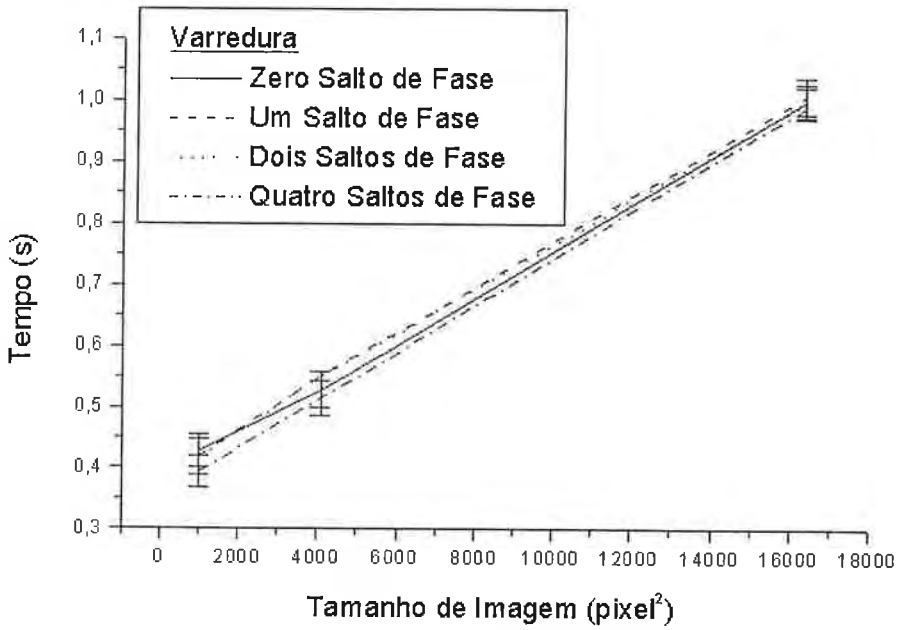

Figura 5.22: Gráfico de Desempenho somente da Técnica de Varredura.

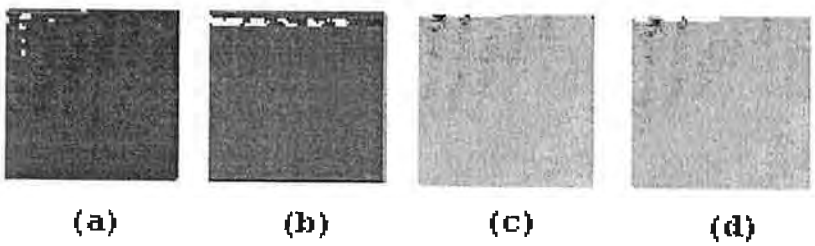

Figura 5.23: Mapas de Fase com ruído (canto superior esquerdo) após processamento de retirada de ambigüidade. (a) Mapa original. (b) Mapa após Técnica de Varredura. (c) Mapa após Técnica de Spik. (d) Mapa após Técnica de Ghiglia.

Capítulo 6

Conclusão

6.1 Considerações Gerais

Neste trabalho medimos a microtopografia da superfície usando a Técnica de Deslocamento de Fase. Para agilizar a medição foram construídos programas de microcomputador cujo resultado final é a microtopografia da área medida. Também descrevemos abaixo alguns resultados adicionais obtidos durante as pesquisas.

Realizamos um estudo detalhado do *PZT*, caracterizando-o para poder utilizá-lo com eficiência na obtenção de imagens para a construção dos Mapa de Fase. Devido à imprecisão do deslocamento do *PZT* a Técnica de 3 Passos tem incertezas maiores do que a da Técnica de 4 Passos. Portanto é melhor utilizar esta última.

Também determinamos as fontes de erros e as possíveis soluções que afetam a qualidade e a precisão das informações obtidas.

A técnica de Automato Celular demonstrou bom desempenho frente as necessidades, embora seja muito mais lenta do que a Técnica de Varredura. Os programas de microcomputador desenvolvidos demonstraram boa confiabilidade, quando os resultados obtidos por eles são comparados com as medidas de Franjas de Igual Espessura, originadas pela inclinação de um espelho plano.

A montagem tradicional com um interferômetro de Twyman-Green faz com que amostras com baixa refletividade não sejam facilmente visualizadas pois os interferogramas delas apresentam baixa visibilidade.

Os resultados obtidos com medições dos espelhos planos são compatíveis com a análise das Franjas de Igual Espessura e obtivemos bons resultados nas análises das redes de Ronchi. Também notamos a limitação da montagem na leitura da altura das linhas da rede de Ronchi. Contudo situações aonde o objeto possui detalhes laterais grandes, podemos medir corretamente a altura, como o caso do espelho inclinado, aonde obtivemos bons resultados. Quanto a leitura de dimensões laterais podemos dizer que são plenamente satisfatórias, conforme demonstraram as medidas de inclinação dos espelhos e de distância entre as linhas da rede de Ronchi. É importante salientar que a resolução da freqüência espacial da câmera *CCD* utilizada é um fator que diminui a resolução do aparato experimental.

6.2 Perspectivas Futuras

Devido ao fato do sistema operacional Windows 95 ser do tipo multitarefa tivemos algumas paradas do processamento dos programas de cálculo o que acarreta em um aumento sensível no tempo total do processamento da imagem. O ideal seria utilizar um sistema operacional que possibilitasse um processamento totalmente dedicado. Uma possibilidade é o sistema operacional LINUX, mas infelizmente no momento não existe uma versão das bibliotecas de funções de processamento de imagens da Data Translation para tal sistema operacional.

Novas técnicas de retirada de ambigüidade surgem e cada vez mais melhoraram a performance do processo. Talvez seja válido uma revisão das técnicas disponíveis e verificar se elas podem ser aplicadas a este tipo de trabalho. Outro ponto são as evoluções das técnicas existentes, como a técnica de Spik, que provém da técnica de Ghiglia.

Outra melhoria no sistema seria trocar a controladora do *PZT* por uma fonte de tensão

INSTITUTO DE FÍSICA
Serviço de Biblioteca e Informação
Tombo: 3473
ex. 1

com controle de incremento de tensão melhor do que a da controladora. Tal fonte deve permitir deslocamentos da ordem de $\lambda/100$.

A técnica de Deslocamento de Fase coexiste com outras técnicas ópticas aplicadas a diversos casos na Metrologia Óptica, por exemplo o Perfilômetro Holográfico [20] que utiliza holografia de duas cores em um cristal fotorrefrativo do tipo Titanato de Bário dopado com Rádio. Os cristais fotorrefrativos estão sendo estudados no Laboratório de Óptica (IFUSP) para aplicações em Metrologia, mais especificamente o cristal de *BSO* [21].

Apêndice A

Cálculos da Técnica de Três Passos

A intensidade de um interferograma é descrita por:

$$I(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}\cos\Phi(i,j).$$

Queremos obter a fase $\Phi(i,j)$, porém temos outros dois parâmetros desconhecidos, $I_1(i,j)$ e $I_2(i,j)$. Portanto temos um sistema com três parâmetros desconhecidos, logo precisaremos de três equações, ou seja, três intensidades.

Para obter a fase $\Phi(i,j)$ podemos introduzir uma fase θ_n de valor conhecido tal que as intensidades do interferograma mudem, sem alterar as intensidades $I_1(i,j)$ e $I_2(i,j)$. Então vamos relacionar tais intensidades como:

$$\begin{cases} I_1'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}\cos(\Phi(i,j) + \theta_1) \\ I_2'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}\cos(\Phi(i,j) + \theta_2) \\ I_3'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}\cos(\Phi(i,j) + \theta_3) \end{cases}$$

Abrindo os cossenos:

$$\begin{cases} I_1'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1) - \sin\Phi(i,j).\sin(\theta_1)] \\ I_2'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_2) - \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_2)] \\ I_3'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_3) - \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_3)] \end{cases}$$

Dada a arbitrariedade das fases θ_n podemos impor a condição:

$$\Delta\theta = \theta_n - \theta_{n-1} = \frac{\pi}{2}$$

então :

$$\begin{cases} \theta_2 = \theta_1 + \frac{\pi}{2} \\ \theta_3 = \theta_2 + \frac{\pi}{2} = \theta_1 + \pi \end{cases}$$

logo:

$$\begin{cases} I_1'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1) - \\ \sin\Phi(i,j).\sin(\theta_1)] \\ I_2'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1 + \frac{\pi}{2}) - \\ \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_1 + \frac{\pi}{2})] \\ I_3'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1 + \pi) - \\ \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_1 + \pi)] \end{cases}$$

usando as relações dos cossenos e senos:

$$\begin{cases} \sin(\alpha + \frac{\pi}{2}) = \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha + \pi) = -\sin(\alpha) \\ \cos(\alpha + \frac{\pi}{2}) = -\sin(\alpha) \\ \cos(\alpha + \pi) = -\cos(\alpha) \end{cases}$$

obtemos:

$$\begin{cases} I_1'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1) - \\ \sin\Phi(i,j).\sin(\theta_1)] \\ I_2'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[-\cos\Phi(i,j).\sin(\theta_1) - \\ \sin\Phi(i,j)\cos(\theta_1)] \\ I_3'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[-\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1) + \\ \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_1)] \end{cases}$$

uma solução possível para estas equações seria que $\theta_1 = \pi/4$, logo:

$$\begin{cases} I_1'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\frac{\sqrt{2}}{2} - \\ \sin\Phi(i,j).\frac{\sqrt{2}}{2}] \\ I_2'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[-\cos\Phi(i,j).\frac{\sqrt{2}}{2} - \\ \sin\Phi(i,j)\frac{\sqrt{2}}{2}] \\ I_3'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[-\cos\Phi(i,j).\frac{\sqrt{2}}{2} + \\ \sin\Phi(i,j)\frac{\sqrt{2}}{2}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_1'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + \sqrt{2}\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j) - \sin\Phi(i,j)] \\ I_2'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + \sqrt{2}\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[-\cos\Phi(i,j) - \sin\Phi(i,j)] \\ I_3'(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + \sqrt{2}\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[-\cos\Phi(i,j) + \sin\Phi(i,j)] \end{cases}$$

Somando as equações duas a duas e usando a igualdade $I_0(i,j) = \sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}$ obtemos:

$$I_3'(i,j) - I_2'(i,j) = 2\sqrt{2}I_0(i,j)\sin\Phi(i,j)$$
$$I_1'(i,j) - I_2'(i,j) = 2\sqrt{2}I_0(i,j)\cos\Phi(i,j)$$

Agora dividindo a primeira equação pela segunda equação obtemos :

$$\frac{I_3'(i,j) - I_2'(i,j)}{I_1'(i,j) - I_2'(i,j)} = \tan\Phi(i,j),$$

isto é,

$$\Phi(i,j) = \arctan\left[\frac{I_3'(i,j) - I_2'(i,j)}{I_1'(i,j) - I_2'(i,j)}\right]$$

Portanto a partir dos valores definidos das fases θ_n, por exemplo, $\pi/4$, $3\pi/4$ e $5\pi/4$, obtemos as respectivas intensidades e daí a fase ϕ.

Apêndice B

Cálculos da Técnica de Quatro Passos

Historicamente, esta técnica surgiu antes que a técnica de Três Passos. Como visto no Apêndice A, seriam necessários apenas três equações, mas acreditamos que talvez devido ao fato de ser difícil de se obter um incremento de $\pi/4$, necessário no primeiro passo da Técnica de 3 Passos, na época do desenvolvimento talvez tenha surgido esta técnica.

A intensidade de um interferograma é descrita por:

$$I(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}\cos\Phi(i,j).$$

O objetivo é obter a fase $\Phi(i,j)$ e para isto podemos introduzir uma fase θ_n de valor conhecido tal que as intensidades do interferograma mudem. Então vamos relacionar tais intensidades como:

$$\begin{cases} I_{1'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}\cos(\Phi(i,j) + \theta_1) \\ I_{2'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}\cos(\Phi(i,j) + \theta_2) \\ I_{3'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}\cos(\Phi(i,j) + \theta_3) \\ I_{4'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}\cos(\Phi(i,j) + \theta_4) \end{cases}$$

Abrindo os cossenos:

$$\begin{cases} I_{1'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1) - \sin\Phi(i,j).\sin(\theta_1)] \\ I_{2'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_2) - \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_2)] \\ I_{3'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_3) - \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_3)] \\ I_{4'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_4) - \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_4)] \end{cases}$$

Dada a arbitrariedade das fases θ_n podemos impor a condição:

$$\Delta\theta = \theta_n - \theta_{n-1} = \frac{\pi}{2}$$

então :

$$\begin{cases} \theta_2 = \theta_1 + \frac{\pi}{2} \\ \theta_3 = \theta_2 + \frac{\pi}{2} = \theta_1 + \pi \\ \theta_4 = \theta_3 + \frac{\pi}{2} = \theta_2 + \pi = \theta_1 + \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

logo:

$$\begin{cases} I_{1'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1) - \\ \sin\Phi(i,j).\sin(\theta_1)] \\ I_{2'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1 + \frac{\pi}{2}) - \\ \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_1 + \frac{\pi}{2})] \\ I_{3'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1 + \pi) - \\ \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_1 + \pi)] \\ I_{4'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1 + \frac{3\pi}{2}) - \\ \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_1 + \frac{3\pi}{2})] \end{cases}$$

usando as relações dos cossenos e senos:

$$\begin{cases} \sin(\alpha + \frac{\pi}{2}) = \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha + \pi) = -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha + \frac{3\pi}{2}) = -\cos(\alpha) \\ \cos(\alpha + \frac{\pi}{2}) = -\sin(\alpha) \\ \cos(\alpha + \pi) = -\cos(\alpha) \\ \cos(\alpha + \frac{3\pi}{2}) = \sin(\alpha) \end{cases}$$

obtemos:

$$\begin{cases} I_{1'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1) - \\ \sin\Phi(i,j).\sin(\theta_1)] \\ I_{2'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[-\cos\Phi(i,j).\sin(\theta_1) - \\ \sin\Phi(i,j)\cos(\theta_1)] \\ I_{3'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[-\cos\Phi(i,j).\cos(\theta_1) + \\ \sin\Phi(i,j)\sin(\theta_1)] \\ I_{4'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j).\sin(\theta_1) + \\ \sin\Phi(i,j)\cos(\theta_1)]\} \end{cases}$$

uma solução possível para estas equações seria que $\theta_1 = 0$, logo:

$$\begin{cases} I_{1'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j)] \\ I_{2'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[-\sin\Phi(i,j)] \\ I_{3'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[-\cos\Phi(i,j)] \\ I_{4'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\sin\Phi(i,j)] \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{1'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j)] \\ I_{2'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) - 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\sin\Phi(i,j)] \\ I_{3'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) - 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\cos\Phi(i,j)] \\ I_{4'}(i,j) = I_1(i,j) + I_2(i,j) + 2\sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}[\sin\Phi(i,j)] \end{cases}$$

Somando as equações duas a duas e usando a igualdade $I_0(i,j) = \sqrt{I_1(i,j).I_2(i,j)}$ obtemos:

$$I_{4'}(i,j) - I_{2'}(i,j) = 4I_0(i,j)\sin\Phi(i,j)$$
$$I_{1'}(i,j) - I_{3'}(i,j) = 4I_0(i,j)\cos\Phi(i,j)$$

Agora dividindo a primeira equação pela segunda equação obtemos :

$$\frac{I_{4'}(i,j) - I_{2'}(i,j)}{I_{1'}(i,j) - I_{3'}(i,j)} = \tan\Phi(i,j),$$

isto é,

$$\Phi(i,j) = \arctan\left[\frac{I_{4'}(i,j) - I_{2'}(i,j)}{I_{1'}(i,j) - I_{3'}(i,j)}\right]$$

Portanto a partir dos valores definidos das fases θ_n, por exemplo, 0, $\pi/2$, π e $3\pi/2$, obtemos as respectivas intensidades e daí a fase ϕ.

Apêndice C

Siglas de Técnicas Ópticas

As siglas apresentadas abaixo referem-se aos nomes das técnicas existentes na área de Óptica para medição de diversos parâmetros, provavelmente em outras áreas podem existir técnicas com as mesmas siglas.

Sigla	Extensão
ASPM	*Additive Substractive Phase-Modulated Speckle Interferometry.*
DDFI	*Differential Dual-Frequency Interferometer.*
DDSPI	*Differential Digital Speckle Pattern Interferometry.*
DSM	*Double Spectral Modulation.*
DSPI	*Digital Speckle Pattern Interferometry*, igual a *ESPI.*
ESC	*Electronic Speckle Contouring.*
ESPI	*Electronic Speckle Pattern Interferometry*, igual a *DSPI.*
FTP	*Fourier-Transform Profilometry.*
FTSP	*Fourier-Transform Speckle Profilometry.*
FTT	*Fourier Transform Technique.*
MWLPSI	*Multiple-Wave-Lenght Phase-Shifting Interferometer.*
OPD	*Optical Path Difference.*
OTF	*Optical Transfer Function.*
PMI	*Phase Measurement Interferometry.*
PMP	*Phase-Measuring Profilometry.*
PSI	*Phase-Shifting Interferometry.*
PSM-EC	*Phase Shifting Method using Extraction of Characteristic.*
SLM	*Spatial Light Modulator.*
SPA	*Surface Photo-Absorption.*
PSDDSPI	*Phase-Shifting Differential Digital Speckle Pattern Interferometry.*
SNI	*Sub-Nyquist Interferometry.*
SPI	*Surface Photo-Interference.*
SPM	*Spatial Phase-Measurement (1-frame + fringes).*
SRWLI	*Spectrally Resolved White Light Interferometry.*
TPM	*Temporal Phase-Measurement (N-frame).*
TWLPSI	*Two-Wavelenght Phase-Shifting Interferometer.*
WLI	*White Light Interferometer.*

Bibliografia

[1] K. Creath, "Phase-Measurement Interferometry Techniques"(Progress in Optics - E. Wolf), 350 - 393, Elsevier Science Publishers B.V., New York, Vol. XXVI, 1988.

[2] F. Chen, G. M. Brown e M. Song, "Overview of Three-Dimensional Shape Measurement Using Optical Methods", Opt. Eng., **39**(1), 10 - 22, January 2000.

[3] M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry", J. Opt. Soc. Am., **72**(1), 156 - 160, January 1982.

[4] M. Takeda and K. Mutoh, "Fourier-transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shape", App.Opt., **22**(24), 3977 - 3982, 1983.

[5] J A. Ribeiro, M. Muramatsu e A. Mizukami, "Estudo Comparativo de Métodos de Medida de Rugosidade Usando Speckle", Anais de Óptica, XIX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada - ENFMC, Sociedade Brasileira de Física, Águas de Lindóia - SP, 631, 1996.

[6] T. R. Judge and P. J. Bryanston-Cross, "A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis", Opt. Lasers Eng., **21**, 199 - 239, 1994.

[7] K. Creath and J. Schmit, "N-point Spatial Phase-Measurement Techniques for Non-Destructive Testing", Opt. Lasers Eng., **24**, 365 - 379, 1996.

[8] J. M. Huntley and H. Saldner, "Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis", Appl. Opt., **32**(17), 3047 - 3052, 10 June 1993.

[9] K. Itoh, "Analysis of the phase unwrapping algorithm", Appl. Opt., **21**(14), 2470, 15 July 1982.

[10] Y.-Y. Cheng e J. C. Wyant, "Multiple-wavelength phase-shifting interferometry", Appl. Opt., **24**(6), 804 - 807, 15 March 1985.

[11] D. C. Ghiglia, G. A. Mastin and L. A. Romero, "Cellular-Automata Method for Phase Unwrapping", J. Opt. Soc. Am. A, **4**(1), 267 - 280, 01 January 1987.

[12] J. Strand and T. Taxt, "Performance Evaluation of Two-Dimensional Phase Unwrapping Algorithms", Appl. Opt., **38**(20), 4333 - 4344, 10 July 1999.

[13] A. Spik and D. W. Robinson, "Investigation of The Cellular Automata Method for Phase Unwrapping and its Implementation on an Array Processor", Opt. Lasers Eng., **14**, 25 - 37, 1991.

[14] D. Malacara, "Optical Shop Testing", Ed. Wiley, New York, 1992.

[15] E. A. Oliveira, P. A. M. dos Santos, L. Cescato, G. F. Mendes e Jaime Frejlich, "Alinhamento Interferométrico de Sistemas Ópticos", Revista de Física Aplicada e Instrumentação, Sociedade Brasileira de Física, **1**(1), 111 - 116, 1985.

[16] Data Translation, "Global Lab - Development Environment and Image Processing Library", 1995.

[17] K. Blane, M. Muramatsu e F. C. da Silva, "Verificação da Linearidade de Resposta da Câmera *CCD*", Anais de Óptica, XXI Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada - ENFMC, Caxambu-MG, Brasil, 352-356, 2 a 6 de junho de 1998.

[18] E. Hecht, "Optics", second edition, Addison-Wesley Publishing Company, Wokingham, 1987.

[19] F. C. da Silva , "Aplicação do Speckle Dinâmico para o Estudo do Processo de Secagem de Pinturas", dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto de Física, setembro/2000.

[20] J. E. Millerd and N. J. Brock, "Holographic Profilometry with a Rhodium-Doped Barium Titanate Crystal and a Diode Laser", Appl. Opt., **36**(11), 2427 - 2431, 10 April 1997.

[21] M. R. R. Gesualdi , "Técnicas de Interferometria Holográfica Usando Cristais Fotorrefrativos da Família das Silenitas do Tipo $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO)", dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto de Física, outubro/2000.