

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA

Hologramas gerados por computador utilizados como sensores ópticos

Eduardo Georges Khamis

Orientador: Prof. Dr. Mikiya Muramatsu

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de
Física para a obtenção do título de Mestre em Ciências

Banca examinadora:

Prof. Dr. Mikiya Muramatsu (IFUSP)

Prof. Dr. Said Rabbani (IFUSP)

Profa. Dra. Roseli de Deus Lopes (EP/USP)

São Paulo

2005

*Dedico este trabalho à memória das minhas queridas avós
Nazira Abou Mkana Khamis (11/01/1925 - 06/05/2001)
e Magda Mori (05/02/1922 - 24/12/2003).*

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Mikiya Muramatsu pela oportunidade de realizar este trabalho, pela orientação, por sua confiança e amizade.

À minha família: meu pai Id Georges Khamis; minha mãe Ivone Anita Khamis; meus irmãos Paulo Cesar Khamis, Davi Georges Khamis, Daniel Kalil Khamis e Silvia Maria Khamis; meus avós Bela Mori e Georges Khamis; meus tios Paulo Mori, Mário Mori, Pedro Mori, Cesar Khamis, Lily Margarida Roth e Araci Judith; por todo amor, carinho e apoio que sempre me deram.

À Paula Martins de Souza por me proporcionar tanta alegria, pelo seu amor, carinho, amizade e compreensão.

À Adriana Barioni por sua inestimável amizade, pelo carinho e companherismo.

Aos colegas ou ex-colegas do Laboratório de Óptica, e do Departamento de Física Geral: Adriana Miranda, Borbely, Carlos, Diogo, Edson, Emerson, Felix, Ferrara, George, João, Johnny, Josmar, Kelly, Luis Roberto, Marcos, Raul, Ricardo e Rubens pelas amizades.

À Dra. Patricia Soares Pinto Cardona pela apresentação do seu trabalho e pela sua amizade.

A todos os funcionários da biblioteca do Instituto de Física. Em especial, ao Josué, Lea, Virgínia e Zeca pelas amizades e prestação de serviços impecável.

Aos Srs. Marcelino Alves e Rubens D. Forcemo por poder contar sempre com eles para qualquer coisa na Oficina Mecânica do Departamento de Física Geral.

*Aos analistas de sistemas do Departamento de Física Geral **Sérgio e Valdir** pela amizade e constante ajuda.*

*Ao Prof. Dr. **Jorge deLyra** pelo apoio na utilização dos recursos computacionais do Departamento de Física Matemática.*

*À todos os vigias do Instituto de Física que sempre me deram a devida assistência. Em especial, aos vigias da ALA I: **Cássio, João, Marcelo, Silvio e Wilson**, e seu chefe **Florisvaldo**.*

*Às secretárias do Departamento de Física Geral **Dirce Kimie Nari-matsu de Almeida e Ivone Vantini** pela constante ajuda em toda a burocracia.*

À atual diretoria do Instituto de Física pela devida preocupação com a acessibilidade de seus alunos.

*Finalmente, agradeço à **CNPq** pelo importante apoio financeiro.*

Resumo

Dois tipos diferentes de hologramas (Fresnel e Fourier) foram gerados por computador. O holograma de Fresnel foi escolhido para fazer parte de um arranjo experimental que teve como objetivo estimar a rugosidade de amostras metálicas. Para isso, um novo método de aplicação de um correlator óptico foi desenvolvido. Hologramas de Fourier geralmente fazem parte do correlator óptico de VanderLugt, o qual é muito utilizado no reconhecimento de padrões. A reconstrução numérica de hologramas de Fresnel gerados por computador, “distorcidos” por superfícies metálicas (também simuladas), serviram de base para que a reconstrução óptica de um holograma de Fresnel fosse utilizada, de forma inédita, no reconhecimento de padrões para estimar a rugosidade de amostras metálicas.

Palavras-chave: hologramas gerados por computador; elementos ópticos difrativos; reconhecimento de padrões; correlator óptico; rugosidade; sensores ópticos.

Abstract

Two different types of holograms (Fresnel and Fourier) have been computer-generated. The Fresnel hologram has been chosen as part of an experimental set, which meant to estimate the roughness of the metallic samples. A new method for the application of an optical correlator has been developed. Fourier holograms are, generally, part of the VanderLugt optical correlator, that is very used for pattern recognition. The numerical reconstruction of the computer-generated Fresnel holograms, "distorted" by metallic surfaces (simulated as well), worked as the base for the utilization, in an original way, of the optical reconstruction of a Fresnel hologram, at the pattern recognition to estimate the roughness of the metallic samples.

Key-words: computer-generated holograms; diffractive optical elements; pattern recognition; optical correlator; roughness; optical sensors.

Sumário

1	Introdução	1
2	Hologramas gerados por computador	4
2.1	Holografia e tipos de hologramas	4
2.2	Registro do holograma de <i>Fresnel</i>	6
2.3	Reconstrução numérica do holograma de <i>Fresnel</i>	10
2.4	Registro do Holograma de <i>Fourier</i>	11
2.5	Reconstrução numérica do Holograma de <i>Fourier</i>	12
3	Superfícies rugosas	14
3.1	Os parâmetros de rugosidade: R_a e R_q	15
3.2	Função de autocorrelação	16
3.3	Simulação	18
3.3.1	Um método simples	18
4	Reconhecimento de padrões	22
4.1	Casamento por correlação	22
4.2	Correlator óptico	24
4.3	Método de reconhecimento	27
4.4	Novo método de aplicação	28
5	Materiais e métodos	33
5.1	Procedimento experimental para a escolha do holograma	33
5.1.1	Reconstrução óptica do holograma de <i>Fresnel</i>	34
5.1.2	Reconstrução óptica do Holograma de <i>Fourier</i>	36

5.1.3	Escolha do holograma	37
5.2	Procedimento experimental para a estimativa da rugosidade	38
6	Resultados	42
6.1	Medidas com um perfilômetro mecânico	42
6.2	Dados experimentais	43
7	Discussão e Conclusão	49
7.1	Discussão	49
7.2	Conclusão	51
7.3	Perspectivas e planos futuros	52
A	Listagem de programas	56
A.1	Registro do Holograma de Fresnel	56
A.2	Simulação de uma superfície rugosa	57
A.3	Reconhecimento de padrões	58
A.4	Holograma distorcido por uma superfície metálica	60
B	Registro do Holograma de <i>Fourier</i>	61
C	Exemplos de reconstruções ópticas	62

Lista de Figuras

2.1	Esquema para o registro de um holograma.	4
2.2	Esquema para ilustrar as variáveis na simulação de um holograma.	6
2.3	Propagação da luz através da filtragem linear espacial.	10
2.4	Imagem utilizada, seu respectivo holograma e reconstrução.	11
2.5	Imagem utilizada, seu respectivo holograma e reconstrução.	13
3.1	Variáveis envolvidas no cálculo de R_q	16
3.2	Simulação de uma superfície metálica com $R_q = 0.05 \times 10^{-4}cm$	21
4.1	Arranjo para a obtenção da correlação de $f(x, y)$ e $w(x, y)$ no ponto (s, t) . (figura extraída de [GW00])	23
4.2	Sistema óptico do tipo 4-f.	24
4.3	Correlator óptico de <i>VanderLugt</i>	26
4.4	Imagens de entrada no programa.	27
4.5	Reconhecimento da letra A.	28
4.6	Distância percorrida considerando a superfície rugosa no lugar de um espelho perfeito.	29
4.7	Distância percorrida considerando o divisor de feixe e a superfície rugosa.	30
4.8	HGC de <i>Fresnel</i> distorcido por uma superfície metálica e sua reconstrução.	31
5.1	Hologramas de <i>Fresnel</i> gerados por computador.	34
5.2	Arranjo experimental para a reconstrução do objeto com o holograma de <i>Fresnel</i>	35
5.3	Reconstruções ópticas dos hologramas de <i>Fresnel</i> da Fig. 5.1.	35

5.4	Arranjo experimental para a reconstrução do objeto com o holograma de <i>Fourier</i>	36
5.5	Imagem utilizada, seu respectivo holograma e reconstrução.	37
5.6	Arranjo experimental para o estudo de superfícies metálicas.	39
5.7	Coordenadas dos 16 pontos da matriz utilizada para gerar o holograma.	40
5.8	HGC utilizado no procedimento experimental.	41
6.1	Imagem contendo oito hologramas de <i>Fresnel</i>	44
6.2	Imagem contendo reconstruções numéricas de oito hologramas de <i>Fresnel</i>	45
6.3	Imagens obtidas com as amostras metálicas.	46
6.4	Reconhecimento de padrões para o cobre polido.	47
6.5	Reconhecimento de padrões para o latão polido.	47
6.6	Reconhecimento de padrões para o HD.	48
C.1	Reconstruções de hologramas de <i>Fresnel</i>	62
C.2	Reconstrução de um holograma de <i>Fourier</i>	63

Lista de Tabelas

6.1	Média das medidas de R_a obtidas com um perfilômetro mecânico. . . .	43
6.2	Média das medidas de R_q obtidas com um perfilômetro mecânico. . . .	43
6.3	Medidas de R_q obtidas experimentalmente.	46

Lista de Símbolos e Abreviaturas

CCD \longleftrightarrow *Charge Coupled Device*

DOMO \longleftrightarrow *Diffractive Optics and Micro-Optics*

EOD(s) \longleftrightarrow Elemento(s) Óptico(s) Difractivo(s)

\mathcal{F} \longleftrightarrow Transformada de *Fourier*

\mathcal{F}^{-1} \longleftrightarrow Transformada de *Fourier* inversa

FAC \longleftrightarrow Função de Autocorrelação

HD \longleftrightarrow *Hard Disk*

HGC(s) \longleftrightarrow Holograma(s) Gerado(s) por Computador

λ'_x e λ'_y \longleftrightarrow Comprimentos de correlação

R_a \longleftrightarrow Rugosidade superficial média

R_q ou σ \longleftrightarrow Rugosidade quadrática média

Capítulo 1

Introdução

A rugosidade superficial de sólidos como metais, plásticos e semicondutores pode interferir em experimentos. Estudos feitos em ciência dos materiais com a ajuda de medidas espectroscópicas geralmente requerem que a superfície do material seja lisa o suficiente para evitar, por exemplo, o espalhamento da luz incidente por irregularidades na superfície.

Também podemos observar a importância da rugosidade superficial em *laser* de cristais ativado que requer um alto grau de qualidade da superfície para gerar um alto ganho de radiação (*laser*); na indústria de metais, os produtos são frequentemente sujeitos a diferentes processos de acabamento para fornecer superfícies de contato lisas (por exemplo para motor de carro, bombas hidráulicas, etc); as interfaces de semicondutores devem ser lisas o suficiente para que tenham um bom desempenho em suas funções elétrica ou *laser*.

Em espectroscopia óptica e na teoria de espalhamento o papel da rugosidade superficial é bem compreendido, e o fenômeno básico da interação da luz com superfícies rugosas tem sido o assunto de detalhados estudos.

A holografia é uma técnica que permite o integral registro da configuração espacial de um objeto. Um holograma é obtido com uso de lasers e outros equipamentos que realizam, ao final do processo, o registro em filme fotográfico da combinação de dois feixes de luz: um feixe de referência (FR) e o feixe refletido pelo objeto (FO). O padrão

resultante, denominado de holograma, registra não só intensidade mas também a fase do objeto, obtendo assim a imagem tridimensional do mesmo. Porém, hologramas podem ser gerados por computador de modo a baratear e facilitar sua obtenção. Estes hologramas gerados por computador (HGC) podem ser utilizados como parte de um arranjo experimental feito para o estudo da rugosidade superficial de alguns materiais [RSSP95] [SRJ92].

No capítulo 2 será explicado como simular o registro de dois tipos de hologramas. O principal objetivo deste trabalho é saber se um HGC pode ser utilizado como sensor óptico, utilizando reconhecimento de padrões para estimar a rugosidade de metais. Este procedimento foi sugerido mas ainda não foi desenvolvido. A sugestão baseia-se em utilizar amostras padronizadas de superfícies metálicas, porém, neste trabalho as amostras foram simuladas no computador. Este procedimento será descrito no capítulo 3. No capítulo 4 será explicado como o reconhecimento de padrões é feito, e será desenvolvido um novo método de aplicação do correlator óptico. O experimento será descrito no capítulo 5 onde um holograma (*Fourier* ou *Fresnel*) será escolhido para fazer parte deste experimento, e serão feitos ensaios, utilizando o novo método, para estimar a rugosidade de amostras metálicas. Os resultados serão apresentados no capítulo 6 enquanto que a discussão e conclusão do trabalho serão apresentadas no capítulo 7.

Hologramas de *Fourier* são comumente utilizados em reconhecimento de padrões [AI82], porém, neste trabalho, a utilização do holograma de *Fresnel* (sua reconstrução numérica) tornou-se mais vantajosa. Isto porque o algoritmo para gerá-lo por computador pôde ser modificado de modo a levar em consideração a reflexão do feixe de *laser* após sua incidência em uma superfície metálica. Esta modificação será explicada no capítulo 4.

A literatura está repleta de algoritmos para gerar hologramas. Em especial, há um algoritmo desenvolvido por Mark Lucente [Luc94] que é muito eficiente pois utiliza tabelas de valores pré-calculados, agilizando os cálculos. Com ele, os hologramas podem ser gerados e reconstruídos em tempo real. Coletâneas de algoritmos com métodos diferentes para gerar HGCs, ou elementos ópticos difrativos (EODs) como às vezes são

chamados, podem ser encontrados em publicações editadas por E. Wolf [Lee78][BW90] ou em um capítulo de livro escrito por W. Dallas [Dal80]. Outra boa referência é um tutorial, também escrito por W. Dallas[Dal04], disponível atualmente na *internet*.

Estes hologramas podem ser utilizados em diversas aplicações, seja em um experimento que tenha apenas por fim a holografia, ou algo mais aplicado como a estimativa de rugosidade. Porém, a beleza deles também está no fato de poderem ser criados a partir de um objeto que na realidade não existe. O impacto visual de um holograma é sempre grande, o que torna a sua obtenção gratificante.

Nas últimas décadas, a produção de elementos ópticos difrativos chegou a um refinamento tão grande, que tornou possível manipular a luz quase que arbitrariamente com estes elementos[Gru01]. A criação de EODs com grande qualidade e belos no ponto de vista artístico são incentivadas através de séries de conferências¹. Um trabalho de grande destaque, neste contexto, foi desenvolvido por L. G. Neto *et al.*[NCC⁺03].

Pela primeira vez, um HGC foi desenvolvido para ser utilizado com raios X [FSZ⁺02] com comprimento de onda $\lambda = 0,155nm$. Dificuldades de implementação atrasaram o seu surgimento. Uma delas foi a ausência de materiais sensíveis ao raio X com resolução holográfica; outra foi a utilização de radiação *synchrotron* para reconstruir o holograma gerado. Com esta inovação, o número de aplicações dos HGCs irá crescer ainda mais.

Algumas vezes, HGCs são chamados de hologramas digitais, porém, podem estar sendo mal interpretados. Com a crescente evolução da câmera CCD (*Charge Coupled Device*), esta começa a ser utilizada em substituição aos filmes holográficos. Assim, os hologramas podem ser registrados digitalmente por meio de um processo óptico. Um exemplo de holograma digital pode ser encontrado em um artigo de U. Schnars e W. Jüptner[SJ02].

Alguns *softwares*, no sistema operacional *Windows* foram utilizados neste trabalho: *Matlab* (para simulações), *Global Lab Image* (para a aquisição das imagens pela câmera CCD), *Microcal Origin* (para apresentar uma superfície metálica). No sistema operacional *Linux*, foram utilizados compiladores *C* e *C++* para simulações.

¹*Diffractive Optics and Micro-Optics* (DOMO)

Capítulo 2

Hologramas gerados por computador

2.1 Holografia e tipos de hologramas

Em 1948, Dennis Gabor [Gab48] deu início à holografia. Após sua proposta e demonstração do primeiro holograma (holograma de *Gabor*), diferentes tipos de hologramas foram desenvolvidos. As descrições deles são encontradas em diversas publicações, dentre elas: [Goo96][LKW95][Ber98].

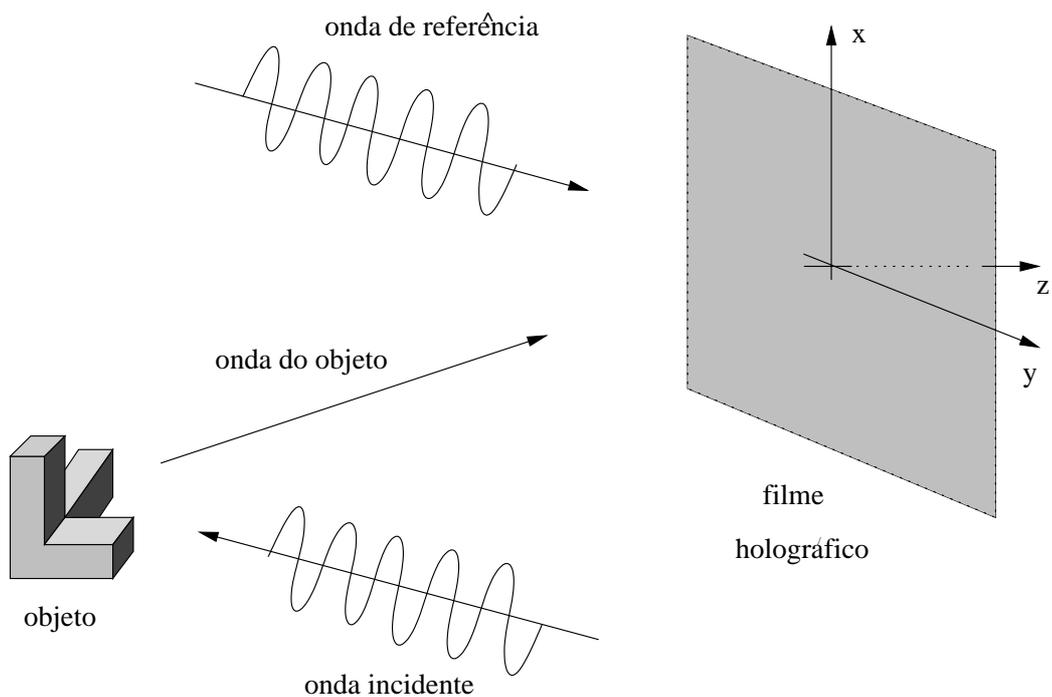


Figura 2.1: Esquema para o registro de um holograma.

A holografia é uma técnica que permite o registro de toda a configuração espacial de um objeto. Quando olhamos para algum objeto, percebemos que ele difere de uma fotografia comum devido à sua profundidade. Esta é uma noção de tridimensionalidade. Um holograma preserva essa característica porque é o registro da intensidade (amplitude) e profundidade (fase) desse objeto. Este holograma pode ser obtido, com o uso de *lasers* e mais outros componentes ópticos, como espelhos, divisores de feixe e filtros espaciais para direcionar a luz de modo que ocorra o registro em filme fotográfico da combinação (interferência) de dois feixes de luz (Figura 2.1). O holograma resultante é um padrão complexo que ao ser novamente iluminado pelo feixe referência reconstrói a imagem tridimensional do objeto, em amplitude e fase. Entretanto, os hologramas podem ser gerados por computador de modo a facilitar e baratear sua obtenção.

Dependendo do tipo de holograma, sua reconstrução pode ser feita com *laser* ou luz branca, que após incidir no holograma, a luz é difratada e a imagem formada. Assumir que as ondas de luz são perfeitamente coerentes, seria considerar que todas tem como origem uma única fonte puntual que emite uma série de ondas monocromáticas, infinitamente longa e contínua. Na realidade, essas ondas só alcançam um grau finito de coerência. O feixe de *laser* tem a propriedade de ser uma luz coerente, assim considerada por possuir coerência espacial e temporal simultaneamente. Coerência temporal significa que a luz tem um único comprimento de onda que mantém a diferença de fase constante no decorrer do tempo. Coerência espacial significa que a diferença de fase entre dois pontos no espaço é constante no tempo. Os fenômenos ópticos (interferência e difração) envolvidos nos processos de registro e reconstrução de um holograma não serão aqui discutidos. Podem ser facilmente encontrados na literatura [BW80].

Os dois diferentes tipos de hologramas utilizados neste trabalho foram escolhidos por terem algoritmos de fácil implementação computacional, em especial, o holograma de *Fresnel* por ter a propriedade de focalizar pontos em um plano como se fosse uma lente. De maneira geral, estes pontos focalizados podem estar em diferentes planos, ou seja, uma reconstrução tridimensional do objeto poderia ser feita.

2.2 Registro do holograma de *Fresnel*

Esta seção é baseada no método descrito por Lauterborn *et al.* [LKW95], e possui algumas modificações que visam facilitar e adequar o holograma ao experimento que será realizado e a um software que faz a reconstrução numérica deste holograma, o qual é formado com o objeto próximo ao meio de registro, ou seja, o registro é feito na região de difração de *Fresnel* do objeto.

Um esquema simples para ilustrar as variáveis relevantes na simulação do processo de registro de um holograma pode ser visto na Figura 2.2.

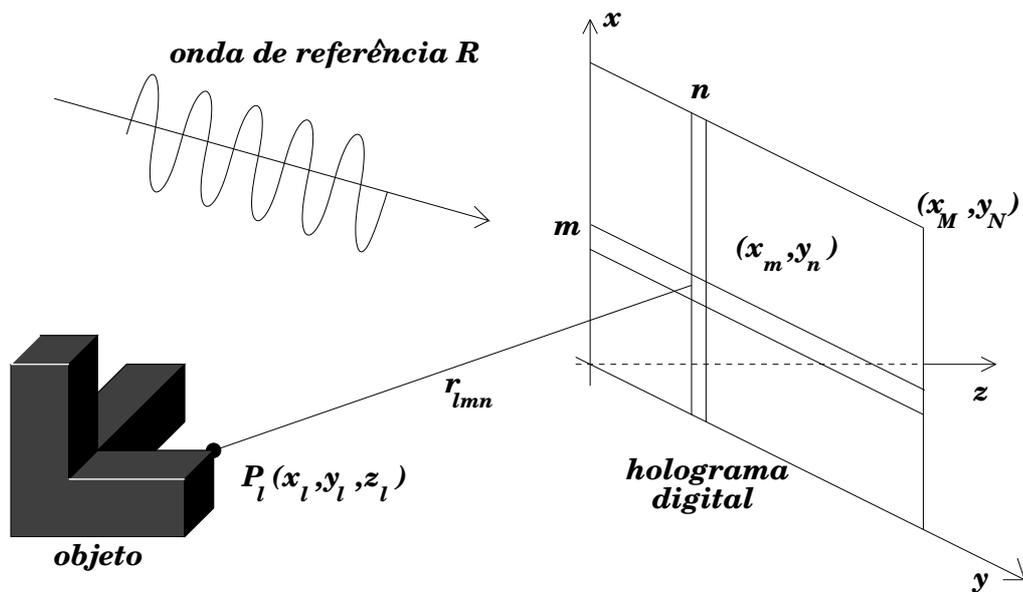


Figura 2.2: Esquema para ilustrar as variáveis na simulação de um holograma.

Um feixe de luz coerente e monocromática incide em um objeto e é espalhado por ele (Figura 2.2). A configuração espacial do objeto é representada por suas coordenadas (x_l, y_l, z_l) , onde cada ponto passa a ser representado por uma fonte puntual, e cada fonte emite uma onda esférica que aponta para o plano do holograma. Essa onda é dada pela relação

$$E_{lmn} = A_l \exp(i\phi_l) \frac{\exp(ikr_{lmn})}{r_{lmn}}, \quad (2.1)$$

onde k é o número de onda dado por $2\pi/\lambda$ (λ é o comprimento de onda), A_l e ϕ_l são suas amplitude e fase, respectivamente, e r_{lmn} é a distância de um ponto do objeto até

o plano $\{(x_m, y_n, z = 0); m = 1, \dots, M; n = 1, \dots, N\}$ do holograma

$$r_{lmn} = \sqrt{(x_l - x_m)^2 + (y_l - y_n)^2 + z_l^2}. \quad (2.2)$$

Foi ignorado o fator de fase dependente do tempo $\exp(-i\omega t)$, o que não altera o resultado final.

A amplitude total do feixe objeto em um ponto (x_m, y_n) é dada pela soma das ondas esféricas geradas por cada ponto do objeto

$$E_{Smn} = \sum_{l=1}^L E_{lmn}. \quad (2.3)$$

A amplitude e fase do feixe de luz espalhada são registrados adicionando-se uma onda plana de referência, que também é um feixe de luz coerente e monocromática. Essa onda é dada pela relação

$$E_{Rmn} = E_R \exp \left[ik \left(x_m \sin(\theta) + z \cos(\theta) \right) \right], \quad (2.4)$$

onde θ é o ângulo entre a normal do plano do holograma e o feixe de referência.

O feixe espalhado e o feixe de referência se interferem e são registrados em um filme, que é o holograma. A intensidade I_{mn} registrada no filme é dada por:

$$I_{mn} = I(x_m, y_n) \quad (2.5)$$

$$I_{mn} = |E_{Smn} + E_{Rmn}|^2 \quad (2.6)$$

$$I_{mn} = (E_{Smn} + E_{Rmn})(E_{Smn} + E_{Rmn})^* \quad (2.7)$$

$$I_{mn} = |E_{mn}|^2 \quad (2.8)$$

A Equação (2.8) não pode ser bem representada como uma função binária (0 ou 1), permitindo que o holograma seja formado apenas por pontos brancos (transparentes) e pretos (opacos). A forma mais simples de se fazer isso é utilizar as seguintes simplificações:

- Cada ponto do objeto emite uma onda de luz de mesma amplitude A_l :

$$A_l = \text{constante}, \quad \text{para todo } l. \quad (2.9)$$

- Cada onda do objeto é emitida com a mesma fase ϕ_l , inicializada¹ como zero:

$$\phi_l = 0, \quad \text{para todo } l. \quad (2.10)$$

- O objeto deve estar muito distante do holograma e seu tamanho deve ser pequeno comparado a sua distância ao holograma. Isto significa que a amplitude das ondas originadas em (x_l, y_l, z_l) pode ser considerada de mesma magnitude em cada ponto (x_m, y_n) . Então,

$$\frac{A_l \exp(i\phi_l)}{r_{lmn}} = \frac{A_l}{r_{lmn}} = \text{constante}, \quad \text{para todo } l, m, n. \quad (2.11)$$

Sem nenhuma restrição adicional, a seguinte escolha é feita

$$\frac{A_l \exp(i\phi_l)}{r_{lmn}} = 1, \quad \text{para todo } l, m, n. \quad (2.12)$$

Isto leva a expressão

$$E_{lmn} = \exp(ikr_{lmn}). \quad (2.13)$$

- Considera-se que a onda de referência E_{Rmn} incide normalmente ($\theta = 0^\circ$) ao plano do holograma ($z = 0$). Além disso, para se evitar um fator de fase, considera-se:

$$E_{Rmn} = E_R = \text{constante}, \quad \text{para todo } m, n; \quad E_R \text{ real.} \quad (2.14)$$

Calculadas as intensidades, faz-se a conversão dos valores para o holograma real. Numa simulação exata de um processo análogo de gravação, a distribuição da intensi-

¹É muito comum, em algoritmos, dar um valor inicial a uma variável. Isto porque um valor qualquer, que estaria na memória do computador, sem significado físico, poderia ser atribuído a esta variável.

dade pode ser transferida para um padrão de cinza de acordo com a característica do filme fotográfico. Imprimir tons de cinza em alta resolução é difícil, porém, imprimir em preto e branco é simples em uma impressora laser.

- Após a escolha de que a amplitude real E_R é grande comparada a amplitude do feixe objeto ($E_R \gg E_{Smn}$), e considerando as características de uma emulsão fotográfica, o cálculo das intensidades não é mais necessário para o registro do holograma, basta que as seguintes condições sejam obedecidas:

$$\begin{cases} \Re(E_{Smn}) > 0 & \rightarrow \text{imprimir ponto preto,} \\ \text{caso contrário} & \rightarrow \text{deixar em branco.} \end{cases} \quad (2.15)$$

Desta forma, apenas a parte real de E_{Smn} é necessária:

$$\Re(E_{Smn}) = \sum_{l=1}^L \cos(kr_{lmn}). \quad (2.16)$$

Terminam aqui as simplificações descritas por Lauterborn *et al.*[LKW95]. O próximo passo é criar um algoritmo para o registro do holograma, o qual é simples de se implementar computacionalmente através das condições 2.15 e da equação 2.16. Um método semelhante proposto por Stein *et al.* [SWJSL92], onde o cálculo das intensidades é necessário, resulta em um holograma em tons de cinza; o que foi evitado neste trabalho. Outro método semelhante, descrito por D. Nassar[Nas90], baseado na similaridade entre uma zona de *Fresnel* e o padrão de interferência de um holograma de um único ponto, também resulta em um holograma binário (com pontos transparentes e opacos), porém, o método descrito por Lauterborn *et al.*[LKW95] é mais completo (simplificações podem ser evitadas).

O código-fonte (na linguagem de programação C) parcial do registro do holograma de *Fresnel*, utilizando rotinas de alocação de memória do *Numerical Recipes* [PFTV93], está descrito no apêndice A.1.

2.3 Reconstrução numérica do holograma de *Fresnel*

A reconstrução numérica do holograma de *Fresnel* é feita considerando-se a propagação da luz como uma filtragem linear espacial [Goo96].

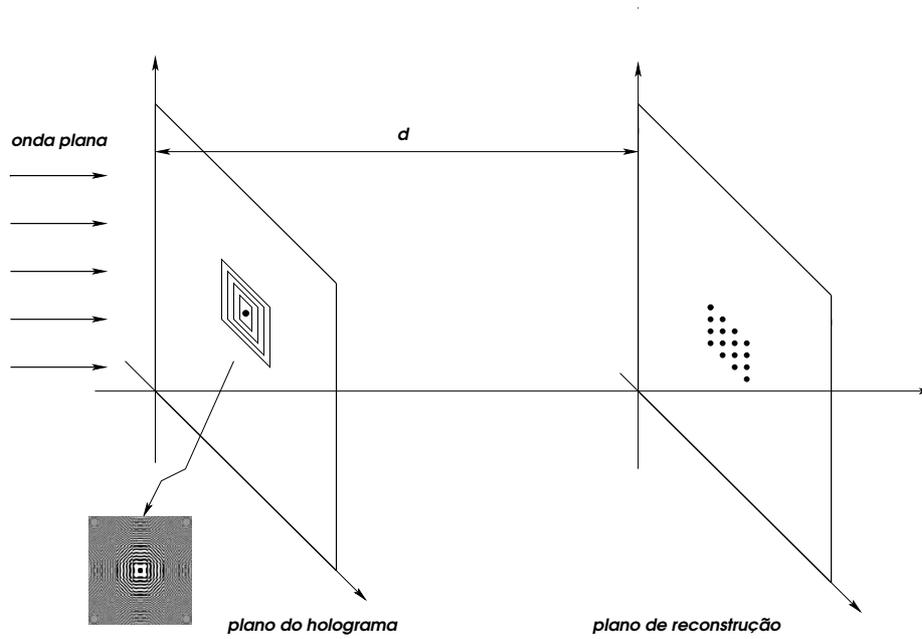


Figura 2.3: Propagação da luz através da filtragem linear espacial.

Uma onda plana, monocromática e coerente incide no plano do holograma de *Fresnel* e sua reconstrução óptica é observada em um plano paralelo a uma distância $z = d$ (Figura 2.3). A distribuição resultante da propagação inversa da luz, a esta distância, é dada a seguir [Net02][Car03]:

$$f(x, y, 0) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{\mathcal{F}\{f(x, y, d)\}}{\exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2} \right]} \right\} \quad (2.17)$$

onde λ é o comprimento de onda, u e v são as freqüências espaciais, \mathcal{F} representa o operador da transformada direta de *Fourier* e \mathcal{F}^{-1} representa o operador da transformada inversa de *Fourier*.

Portanto, através do processo de filtragem espacial linear é possível se obter a distribuição complexa $f(x, y, 0)$ (plano de reconstrução) a partir da distribuição $f(x, y, d)$ (plano do holograma).

O código-fonte (na linguagem de programação C++ para o sistema operacional *Linux*) que faz a reconstrução do holograma de *Fresnel*, e que foi desenvolvido por Matthias Koenig, pode ser encontrado atualmente na *internet* [Koe04].

A partir do HGC (Figura 2.4b) de 256 x 256 *pixels*, foi possível reconstruí-lo numericamente (Figura 2.4c). Nota-se nesta reconstrução, outras ordens de difração. A imagem utilizada (Figura 2.4a) é apenas uma representação do objeto pois cada ponto da imagem é representado por quatro *pixels* para facilitar sua visualização.

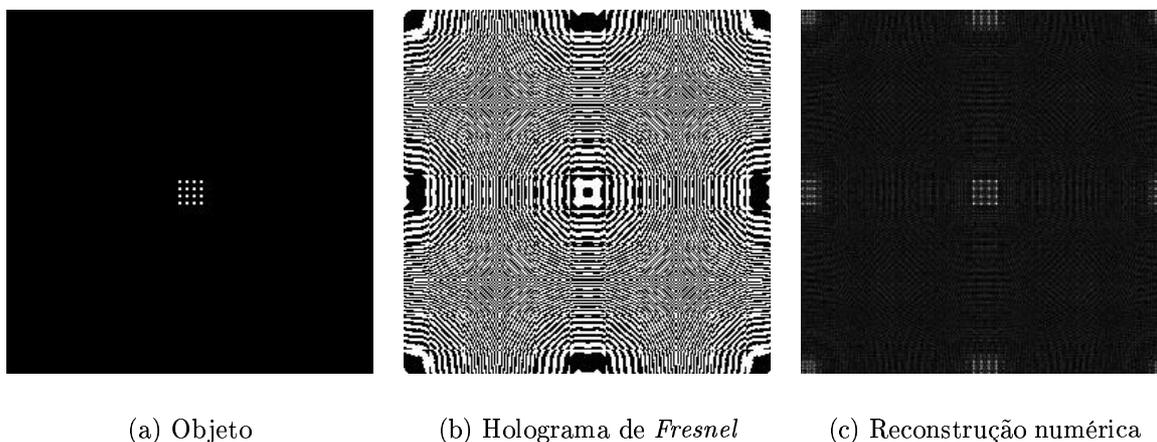


Figura 2.4: Imagem utilizada, seu respectivo holograma e reconstrução.

2.4 Registro do Holograma de *Fourier*

Segundo T. G. Walker [Wal99], um holograma de *Fourier* é a transformada de *Fourier* (com informações sobre a amplitude e fase) do objeto a ser reconstruído. Quando o holograma é colocado em frente a uma lente e iluminado por uma onda de luz plana, o padrão de difração de *Fraunhofer* que aparece no plano focal da lente é a transformada de *Fourier* da função de transmissão do holograma, e portanto reconstrói o objeto.

Para o cálculo do holograma de *Fourier*, utiliza-se a parte real da função de trans-

missão complexa do holograma:

$$A(\mathbf{r}') = \sum_j a(\mathbf{r}_j) e^{2\pi i \mathbf{r}' \cdot \mathbf{r}_j / f \lambda + i \phi_j} \quad (2.18)$$

onde \mathbf{r}' é a posição no holograma, \mathbf{r}_j são as coordenadas dos pontos do objeto com amplitudes reais $a(\mathbf{r}_j)$ e fases ϕ_j .

Esta equação não pode ser bem representada como uma função binária, permitindo que o holograma seja formado apenas por pontos brancos (transparentes) e pretos. A forma mais simples de se fazer isso é utilizar a parte real da Eq. (2.18) e somar uma constante. Uma vez que a transformada de *Fourier* de uma função real par é simétrica, isto é equivalente a simetrizar o objeto. Somar uma constante à transformada implica em adicionar um ponto central intenso na reconstrução. Dessa maneira, este holograma pode reconstruir o padrão de intensidade de um objeto arbitrário ao preço de adicionar um segundo padrão simétrico e um ponto central muito intenso.

A equação modificada é mostrada a seguir:

$$A(\mathbf{r}') = \sum_j a_j \cos(2\pi \mathbf{r}' \cdot \mathbf{r}_j / f \lambda + \phi_j) \quad (2.19)$$

onde \mathbf{r}_j é a posição do j -ésimo *pixel* no objeto, \mathbf{r}' é a posição no holograma, f é a distância focal da lente (composta) a ser usada para a reconstrução, λ é o comprimento de onda do *laser*, e ϕ_j é uma fase aleatória. As fases ϕ_j são arbitrárias, uma vez que somente a intensidade e não a fase da reconstrução é observada.

O código-fonte para gerar hologramas de *Fourier* pode ser encontrado no próprio artigo de T. G. Walker [Wal99], porém, está listado integralmente no apêndice B.

2.5 Reconstrução numérica do Holograma de *Fourier*

A partir do HGC (Fig. 2.5b) de 300 x 300 *pixels*, foi possível reconstruí-lo numericamente, aplicando a transformada de *Fourier* neste holograma. Note que o HGC é

composto de um padrão que é repetido quatro vezes. A transformada de *Fourier* aplicada neste padrão, reconstrói numericamente o objeto (Fig. 2.5c). A imagem utilizada, representada pela Figura 2.5a, contém 75×75 *pixels*.

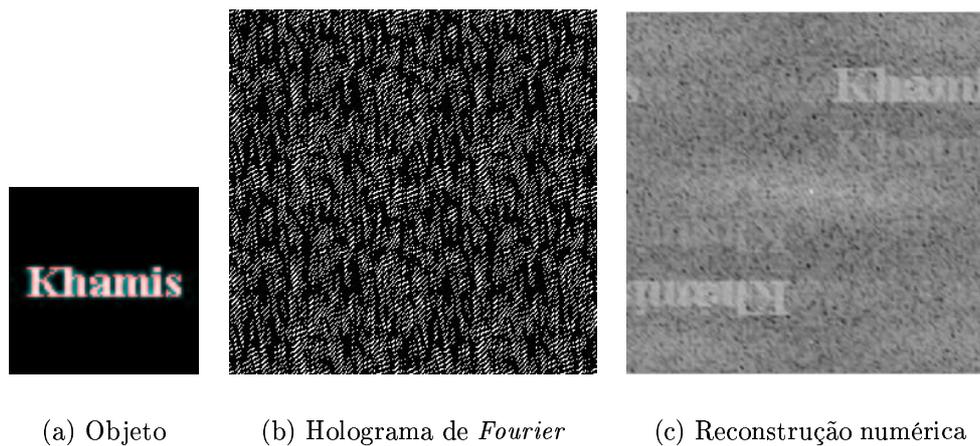


Figura 2.5: Imagem utilizada, seu respectivo holograma e reconstrução.

Nota-se, na reconstrução numérica do holograma (Fig. 2.5c), o ponto central intenso (ordem de difração zero) e as outras duas ordens de difração (+1 e -1); que já eram esperados.

Como ilustração, algumas reconstruções ópticas de HGCs (de *Fresnel* e de *Fourier*) podem ser vistas no apêndice C.

Capítulo 3

Superfícies rugosas

Para o propósito de simular uma superfície metálica rugosa, foi assumido que a superfície deve obedecer a estatística gaussiana. Infelizmente, muitos modelos teóricos assumem esta estatística (provavelmente seguindo Beckmann e Spizzichino [BS63]), a qual pode não estar correta. Superfícies reais que devem ter sido sujeitas a diferentes processos de finalização podem ter distribuição gaussiana de alturas mas completamente não-gaussiana de inclinações, como declarado por L. H. Tanner [Tan79] em seu estudo de 1979.

Embora um rugosímetro a *laser* [Jr.02] tenha sido desenvolvido, não foi sensível o suficiente, devido à técnica empregada (correlação angular de *speckle*¹), para efetuar medidas de rugosidade (R_a) que este trabalho propõe. O novo método de aplicação, que será aqui desenvolvido, do reconhecimento de padrões para estimar a rugosidade de metais poderá ser uma extensão deste rugosímetro a *laser*.

Aqui serão definidos apenas alguns parâmetros relevantes na simulação de uma superfície metálica rugosa e um método, desenvolvido por N. Patir [Pat78], será descrito.

¹O *speckle*, também chamado de “granulado óptico”, é um padrão alternado de pontos claros e escuros (tons variados), causados pela interferência de um feixe de luz coerente consigo mesmo, após ser difundido por uma superfície rugosa.

3.1 Os parâmetros de rugosidade: R_a e R_q

A indústria pode muitas vezes requerer que superfícies sejam suficientemente lisas para, por exemplo, evitar o atrito entre os componentes metálicos de um motor, ou evitar em algum experimento o espalhamento da luz incidente por irregularidades na superfície. Para isso, precisa-se conhecer parâmetros de rugosidade da superfície. Os parâmetros mais utilizados são R_a (rugosidade superficial média) e R_q (rugosidade quadrática média).

A rugosidade superficial média é o desvio médio do perfil em relação à reta média:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx, \quad (3.1)$$

onde L é o comprimento medido da amostra e $z(x)$ é a ordenada do traço do perfil correspondente a uma abscissa x , ou seja, a altura de um ponto da superfície em relação à reta média. A reta média é a reta de mínimos quadrados do perfil, porém, como as superfícies serão simuladas, esta reta média será a própria abscissa x .

Na forma discreta:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i|, \quad (3.2)$$

onde N é o número de pontos do perfil e z_i é o valor de $z(x)$ no i -ésimo ponto.

A rugosidade quadrática média é o desvio quadrático médio do perfil em relação à reta média:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L |z^2(x)| dx}. \quad (3.3)$$

Na forma discreta:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2}. \quad (3.4)$$

R_q costuma ser igualmente designado pela letra σ . A Figura 3.1 ilustra as variáveis envolvidas no seu cálculo.

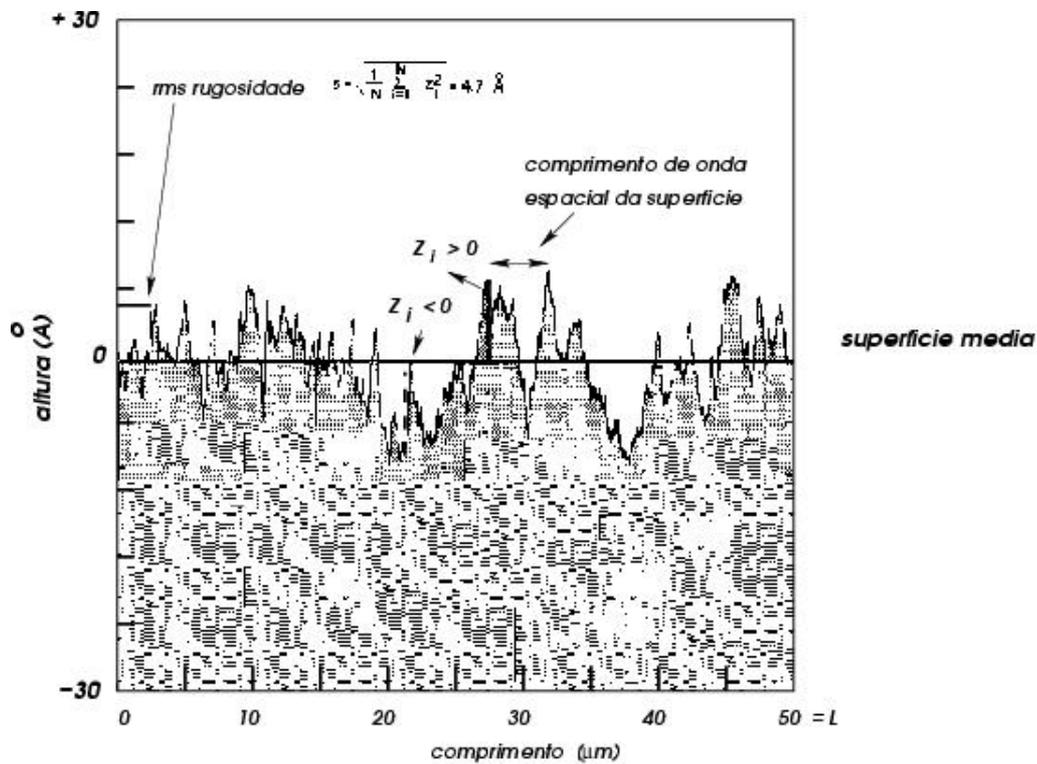


Figura 3.1: Variáveis envolvidas no cálculo de R_q .

Em superfícies metálicas com estatística gaussiana, pode-se utilizar a relação [Sal97]:

$$R_q = 1.25R_a. \quad (3.5)$$

Esta relação é bem observada em rugosidades elevadas [Jr.02], embora possa não ser uma relação muito confiável (isto será discutido posteriormente). Para rugosidades (R_a) menores que $0,1 \mu m$, neste trabalho, esta relação não pôde ser verificada.

3.2 Função de autocorrelação

Segundo N. Patir [Pat78], pode-se considerar que as alturas $z(x, y)$ de uma superfície gaussiana são variáveis aleatórias, medidas a partir do plano médio da superfície; e que a superfície é homogênea, ou seja, suas propriedades estatísticas não variam ao longo da superfície após uma translação. Assim, define-se a função de autocorrelação (FAC)

como sendo [Pat78]:

$$R(\lambda_x, \lambda_y) = E \left\{ z(x, y) z(x + \lambda_x, y + \lambda_y) \right\}, \quad (3.6)$$

onde o operador E calcula a média, e λ_x e λ_y são *delay lengths* (ou *lag lengths*, que são números correspondentes a distância entre pares de pontos cujos comprimentos de correlação estão sendo calculados). Os comprimentos de correlação, representados por λ'_x e λ'_y , são definidos aqui como os valores dos *delay lengths* nos quais a FAC torna-se zero.

Escolhendo-se $\lambda_x = \lambda_y = 0$, tem-se que $R(0, 0) = \sigma^2$, onde σ (ou R_q) é a rugosidade quadrática média. Relaciona-se a FAC de uma superfície com a FAC de um perfil ao longo de uma direção θ por

$$R(\lambda_x, \lambda_y) = R_\theta(\lambda_\theta), \quad (3.7)$$

onde

$$\lambda_x = \lambda_\theta \cos \theta, \quad (3.8)$$

$$\lambda_y = \lambda_\theta \sin \theta. \quad (3.9)$$

Conseqüentemente, as FACs dos perfis x e y são:

$$R_x(\lambda_x) = R(\lambda_x, 0), \quad (3.10)$$

$$R_y(\lambda_y) = R(0, \lambda_y). \quad (3.11)$$

Variáveis (R_q , por exemplo) que somente descrevem propriedades estatísticas em posições individuais, não podem refletir a conexão entre estas variáveis em diferentes posições. A FAC representa esta conexão, caracterizando de maneira mais eficiente a superfície.

Até agora só foram discutidas propriedades estatísticas no domínio espacial. No domínio da frequência, fazendo-se a transformada de *Fourier* da FAC, tem-se por definição a função densidade espectral (*power spectral density*), que é muito utilizada em

estudos de espalhamento da luz por superfícies rugosas, porém, neste trabalho, apenas a FAC foi utilizada.

3.3 Simulação

Um método numérico para gerar superfícies rugosas tridimensionais foi apresentado por N. Patir[Pat78]. Com as propriedades estatísticas definidas e com o uso de transformações lineares em matrizes aleatórias, este procedimento é capaz de gerar superfícies rugosas gaussianas e não-gaussianas com qualquer função de autocorrelação considerada.

Devido a sua simplicidade e facilidade de se criar um algoritmo, foi adotado neste trabalho o método simplificado para a simulação de superfícies rugosas, dado por N. Patir[Pat78]. Este método não necessita da resolução de equações não-lineares.

Sabe-se que, geralmente em engenharia, a estatística de superfícies metálicas é gaussiana. Há exceções (Beckmann e Spizzichino[BS63]) que não serão tratadas. Por ser uma primeira tentativa, espera-se que esta aproximação seja razoável.

Existem outros métodos para gerar superfícies rugosas[Wu00][HT92] e que fazem uso de transformadas rápidas de *Fourier*, porém, as superfícies simuladas podem não representar bem a FAC escolhida na simulação. Não haveria problema aqui em utilizar estes métodos já que o intento é o de explorar a possibilidade do uso dessas superfícies em reconhecimento de padrões, e não há a preocupação de se obter superfícies rugosas perfeitamente representadas. Estes métodos não foram escolhidos por terem implementações computacionais mais complicadas que o método de N. Patir[Pat78].

3.3.1 Um método simples

Até aqui, nada foi estabelecido quanto ao tipo de função de autocorrelação. Como uma função de autocorrelação é necessária na elaboração de um método para simular uma superfície rugosa, é preferível a escolha de uma função bem simples de modo

a simplificar o procedimento, assim, não serão necessárias as resoluções de equações não-lineares.

Uma forma simplificada de função de autocorrelação é dada a seguir:

$$R(\lambda_x, \lambda_y) = \begin{cases} \sigma^2 \left(1 - \frac{|\lambda_x|}{\lambda'_x}\right) \left(1 - \frac{|\lambda_y|}{\lambda'_y}\right) & \text{se } |\lambda_x| < \lambda'_x \text{ e } |\lambda_y| < \lambda'_y, \\ 0 & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (3.12)$$

onde λ'_x e λ'_y são definidos como comprimentos de correlação do perfis x e y , respectivamente, e σ é a rugosidade quadrática média. O comprimento de correlação de um perfil pode ser definido como o comprimento no qual a função de autocorrelação torna-se zero.

A FAC dessa superfície resulta em FACs com perfis lineares nas direções x e y :

$$R_x(\lambda_x) = \sigma^2 \left(1 - \frac{|\lambda_x|}{\lambda'_x}\right) \quad |\lambda_x| \leq \lambda'_x, \quad (3.13)$$

$$R_y(\lambda_y) = \sigma^2 \left(1 - \frac{|\lambda_y|}{\lambda'_y}\right) \quad |\lambda_y| \leq \lambda'_y. \quad (3.14)$$

Em outras direções, os perfis tem uma FAC parabólica, a qual assemelha-se a uma função com decaimento exponencial.

A forma discreta da função de autocorrelação é dada por:

$$R_{pq} = \sigma^2 \left(1 - \frac{p}{n}\right) \left(1 - \frac{q}{m}\right) \quad \text{se } p < n \text{ e } q < m, \quad (3.15)$$

onde

$$R_{pq} = 0 \quad \text{se } p \geq n \text{ ou } q \geq m, \quad (3.16)$$

$$\lambda'_x = n\Delta x, \quad (3.17)$$

$$\lambda'_y = m\Delta y. \quad (3.18)$$

Quanto maiores forem n e m mais a estrutura fina da rugosidade é revelada, desde que isto signifique que Δx e Δy sejam escolhidos como uma pequena fração do com-

primento de correlação.

Além dessa superfície ser facilmente gerada, outra vantagem desse tipo de função de autocorrelação é que a superfície é caracterizada por apenas três parâmetros: σ , λ'_x e λ'_y . Estes parâmetros são comumente utilizados no estudo da estatística de superfícies.

A razão γ entre os comprimentos de correlação

$$\gamma = \frac{\lambda'_x}{\lambda'_y} \quad (3.19)$$

indica o grau de isotropia da superfície, onde $\gamma = 1$ indica uma superfície isotrópica.

Para simular uma superfície gaussiana tendo uma função de autocorrelação da forma discreta (3.15), calcula-se por transformação linear:

$$z_{ij} = \frac{\sigma}{\sqrt{nm}} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m \eta_{i+k,j+l} \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, N \text{ e } j = 1, 2, \dots, M, \quad (3.20)$$

onde a matriz $\eta_{i+k,j+l}$, de dimensão $(N+n) \times (M+m)$, é formada por uma distribuição gaussiana de números aleatórios mutuamente e identicamente independentes com desvio zero e variância unitária.

Na simulação de uma superfície, utiliza-se o código-fonte parcial (na linguagem de programação C) descrito no apêndice A.2, com as funções *gasdev*, *ran1* e rotinas para alocação de memória retiradas do *Numerical Recipes*[PFTV93].

A superfície mostrada na Figura 3.2 foi simulada com os parâmetros $N = M = 40$, $n = 7$, $m = 4$ e $R_q = 0.05\mu m$.

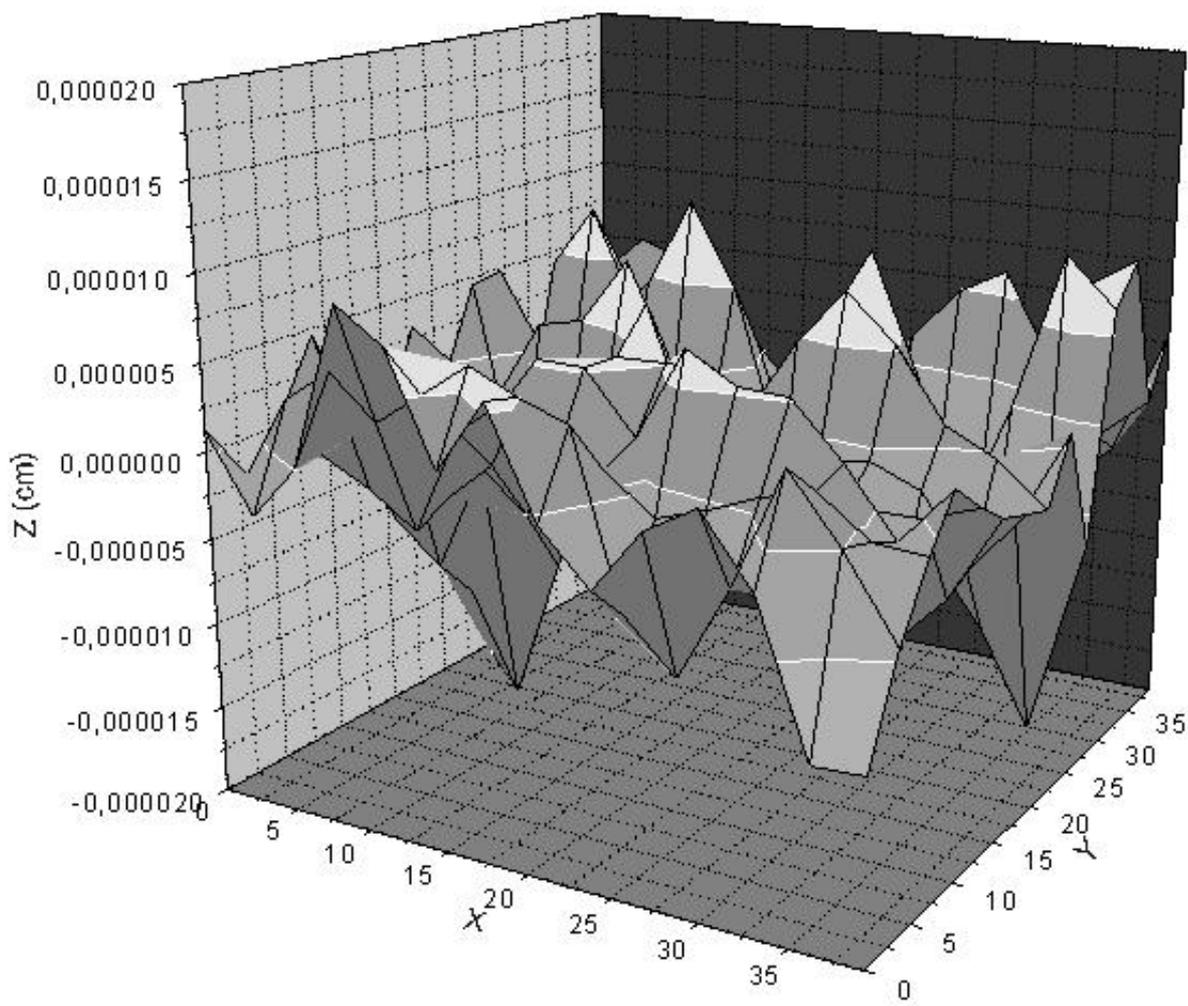


Figura 3.2: Simulação de uma superfície metálica com $R_q = 0.05 \times 10^{-4} \text{cm}$.

Capítulo 4

Reconhecimento de padrões

Foi sugerido por R. Silvennoinen et al. [RSSP95] o uso de reconhecimento de padrões para a estimativa da rugosidade de uma superfície metálica. A dificuldade de verificar a validade do método foi a falta de superfícies padrão a serem utilizadas em comparações com as superfícies medidas. Para contornar este problema, as superfícies padrão foram simuladas, utilizando um método desenvolvido por N. Patir[Pat78] descrito no capítulo 3. As superfícies simuladas tem valores de R_a definidos entre 0 e $0,1\mu m$.

4.1 Casamento por correlação

Um método que pode ser utilizado no reconhecimento de padrões é chamado de casamento por correlação; descrito por R. Gonzales e R. Woods [GW00].

Neste método, a correlação de imagens é considerada como a base para encontrar casamentos de uma subimagem $w(x, y)$ (origem em seu centro) de tamanho $J \times K$ dentro de uma imagem $f(x, y)$ (origem no topo à esquerda) de tamanho $M \times N$, onde é assumido que $J \leq M$ e $K \leq N$ (veja a Figura 4.1).

Este casamento por correlação é realizado através do coeficiente de correlação C ,

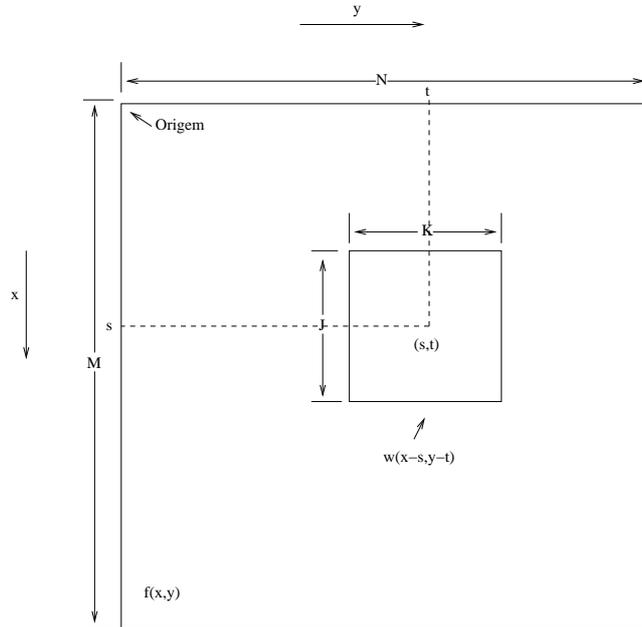


Figura 4.1: Arranjo para a obtenção da correlação de $f(x, y)$ e $w(x, y)$ no ponto (s, t) . (figura extraída de [GW00])

definido como [GW00]:

$$C(s, t) = \frac{\sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)][w(x-s, y-t) - \bar{w}]}{\left\{ \sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [w(x-s, y-t) - \bar{w}]^2 \right\}^{1/2}} \quad (4.1)$$

em que $s = 0, 1, 2, \dots, M-1$ e $t = 0, 1, 2, \dots, N-1$, \bar{w} é o valor médio dos *pixels* em $w(x, y)$ (computado apenas uma vez), $\bar{f}(x, y)$ é o valor médio de $f(x, y)$ na região coincidente com a posição corrente de w , e as somas são realizadas sobre as coordenadas comuns, tanto a f como a w .

O coeficiente de correlação $C(s, t)$ tem sua escala no intervalo -1 a 1 , e seu valor máximo indica a posição (s, t) em que $w(x, y)$ melhor se casa com $f(x, y)$.

Como as imagens que serão utilizadas neste trabalho no reconhecimento de padrões tem um grande número de *pixels* (2048×2048), é mais eficiente a utilização do correlator óptico (sua simulação), já que no domínio da frequência, transformadas rápidas de *Fourier* podem ser utilizadas. Outro fator que viabiliza a utilização do correlator óptico, é a possibilidade de implementação de diferentes tipos de filtros.

4.2 Correlator óptico

Em 1963, A. VanderLugt [Van64] propôs e demonstrou uma técnica interferométrica de síntese de filtros para o plano de frequências. Estes filtros controlam a amplitude e a fase de uma função de transferência, onde cada um, é constituído de padrões de absorção. Anteriormente, a realização de filtros era feita através da inserção de duas máscaras, uma para controlar a amplitude (película fotográfica) e outra para controlar a fase (película de espessura variável).

Sistemas ópticos do tipo 4-f (Figura 4.2) são muito comuns em reconhecimento de padrões.

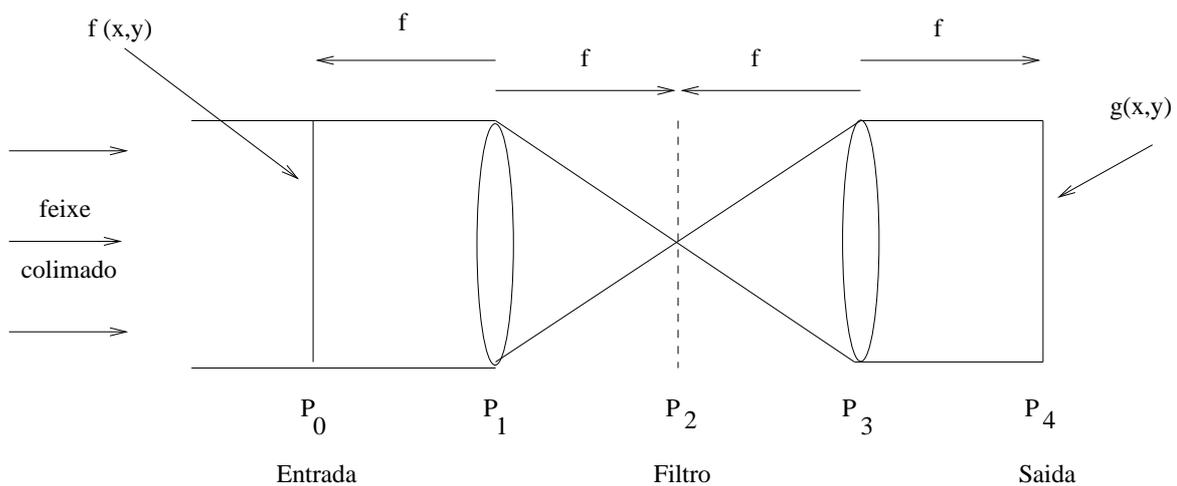


Figura 4.2: Sistema óptico do tipo 4-f.

A operação da maioria dos correladores ópticos é baseada no teorema da convolução (o produto de duas funções, ou imagens, no domínio da frequência é equivalente a convolução no domínio espacial). O teorema pode facilmente ser reformulado em termos de uma correlação cruzada (o produto, no domínio da frequência, de uma função e o complexo conjugado de uma segunda função, é equivalente a correlação cruzada no domínio espacial)[Goo96].

Considere uma imagem $f(x,y)$ como uma imagem de referência. Sua transformada

de *Fourier* bidimensional é descrita a seguir:

$$\mathcal{F}\{f(x, y)\} = F(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (4.2)$$

onde u e v são as freqüências espaciais.

Uma propriedade muito útil de uma lente convergente é sua capacidade de efetuar transformadas bidimensionais de *Fourier* [Bet02].

De acordo com a ilustração do correlator óptico (Figura 4.2), duas transformadas bidimensionais de *Fourier* ocorrem a partir da imagem $f(x, y)$. O filtro exerce o papel de uma barreira, bloqueando algumas freqüências, dependendo de como este filtro foi projetado.

Se no plano do filtro (P_2) nada for colocado, a saída é dada pela função $g(x, y) = f(-x, -y)$ já que $\mathcal{F}\mathcal{F}\{f(x, y)\} = f(-x, -y)$. A intensidade medida no plano P_4 é dada por $|g(x, y)|^2$, ou seja, $|f(-x, -y)|^2$.

Se no plano P_2 um filtro $H(u, v)$ qualquer for colocado, a distribuição é modificada de $F(u, v)$ para $F(u, v)H(u, v)$, e a saída é dada pela convolução $g(x, y) = f(x, y) \odot h(x, y)$ onde

$$h(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(u, v) e^{-j2\pi(ux+vy)} du dv.$$

Note que mudando $H(u, v)$ podemos aplicar diferentes tipos de filtros, os quais resultam em convolução (símbolo \odot) com $f(x, y)$.

Se no plano do filtro (P_2) uma função complexa $H^*(u, v)$ é colocada, a saída é dada pela correlação cruzada $c(\tau_x, \tau_y)$, a seguir [Kum92]:

$$\begin{aligned} c(\tau_x, \tau_y) &= \iint F(u, v) H^*(u, v) e^{j2\pi(u\tau_x+v\tau_y)} du dv \\ &= \iint h^*(x, y) f(x + \tau_x, y + \tau_y) dx dy \\ &= h(x, y) * f(x, y) \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde o símbolo $*$ denota uma correlação cruzada bidimensional.

Note que $F(u, v) = |F(u, v)|e^{i\phi(u,v)}$. Se $H(u, v) = |F(u, v)|e^{-i\phi(u,v)}$ (filtro casado), então $F(u, v)H(u, v) = |F(u, v)|^2$ (intensidade). Os picos de intensidade representam os pontos onde há reconhecimento de padrão.

O correlator óptico de *VanderLugt* está esquematizado na Figura 4.3.

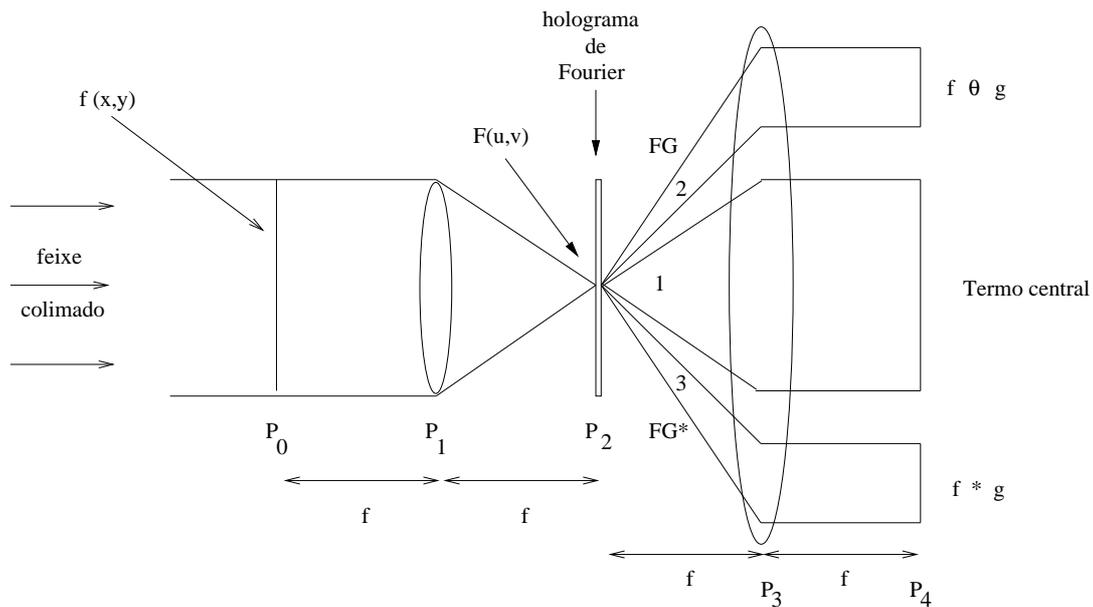


Figura 4.3: Correlator óptico de *VanderLugt*.

Este correlator utiliza como filtro um holograma de *Fourier*. Outros tipos de filtros que levam ao mesmo fim também são utilizados, como os produzidos por interferômetros modificados de *Mach-Zehnder* (sua utilização foi originalmente proposta por A. Vanderlugt[Van64]) e *Rayleigh*. Da mesma forma que no sistema 4-f, antes do plano P_2 temos $F(u, v)$. Se neste plano um holograma de *Fourier* for colocado, após P_2 três termos surgirão[Goo96]:

1. Termo central (não é utilizado),
2. $F(u, v)G(u, v)$,
3. $F(u, v)G^*(u, v)$.

No plano P_4 , após a transformada óptica de *Fourier*, a saída é composta dos três termos seguintes:

1. Termo central (não é utilizado),

2. $f(x, y) \odot g(x, y)$ (pode ser útil mas aqui não é utilizado),
3. $f(x, y) * g(x, y)$ (útil no reconhecimento de padrões).

Se o holograma de *Fourier* for projetado de tal forma que na saída os três termos estejam razoavelmente separados, então, as intensidades poderão ser detectadas. Os picos de intensidade (funções delta) da correlação cruzada detectada $|f(x, y) * g(x, y)|^2$ representam as posições onde ocorre reconhecimento de padrão.

O código-fonte (em *Matlab*) que faz o reconhecimento de padrões está listado no apêndice A.3. Este programa permite que outros filtros sejam aplicados de modo a obter maior sensibilidade no reconhecimento.

O correlator óptico de *VanderLugt* pode ser aplicado, por exemplo, no reconhecimento de impressões digitais [Bet02], embora dificuldades práticas (grande comprimento do correlator) tenham limitado sua implementação nesta aplicação.

4.3 Método de reconhecimento

No caso do reconhecimento de caracteres, utiliza-se o programa, em *Matlab*, listado no apêndice A.3. As imagens da Figura 4.4 são os dados de entrada neste programa.



(a) Lista de caracteres

(b) caracter a ser reconhecido

Figura 4.4: Imagens de entrada no programa.

Portanto, duas imagens são necessárias: a lista de caracteres (Fig. 4.4a), que corresponde a $f(x, y)$ no plano P_0 (Fig. 4.2); o caracter a ser reconhecido (Fig. 4.4b), que é utilizado na criação de um filtro no plano P_2 (Fig. 4.2). A saída do programa (Figura 4.5) indica o reconhecimento do caracter no local onde o pico é mais alto (coordenadas $x = 96$ e $y = 93$).

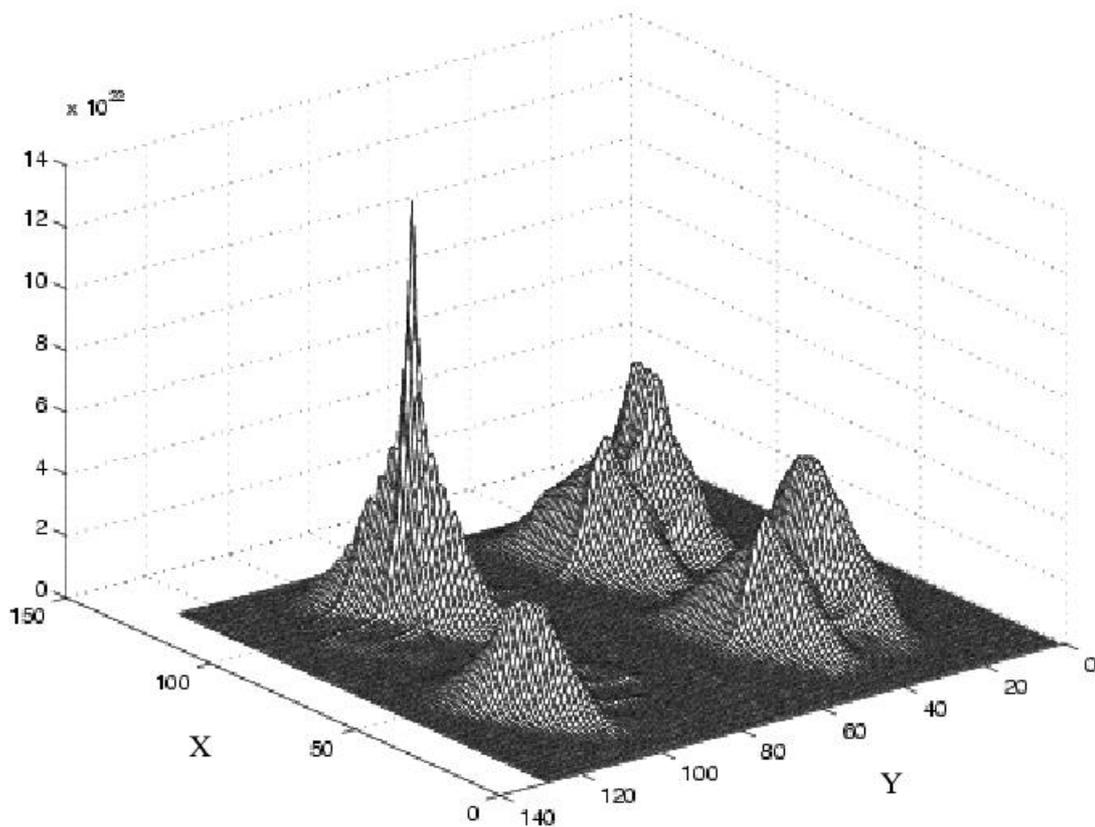


Figura 4.5: Reconhecimento da letra A.

O mesmo procedimento pode ser utilizado no reconhecimento de outras imagens.

4.4 Novo método de aplicação

A idéia é simples e fácil de se entender se considerarmos a superfície metálica como sendo um espelho perfeito. Se um feixe de *laser* expandido e colimado incidir em um holograma de *Fresnel* (HGC do capítulo 2), já se sabe que irá focalizar a uma certa distância $z_l = d$ (Figura 2.3).

Se um espelho for colocado paralelamente ao plano do holograma em uma distância

menor que d , então o feixe será refletido e focalizado quando alcançar a distância focal do holograma. Porém, se uma superfície metálica rugosa substituir o espelho (Figura 4.6), a distância z_l de um ponto do holograma até ao plano de reconstrução será acrescida de $2z_{ij}$ (ida e volta) onde z_{ij} é a altura de um ponto dessa superfície.

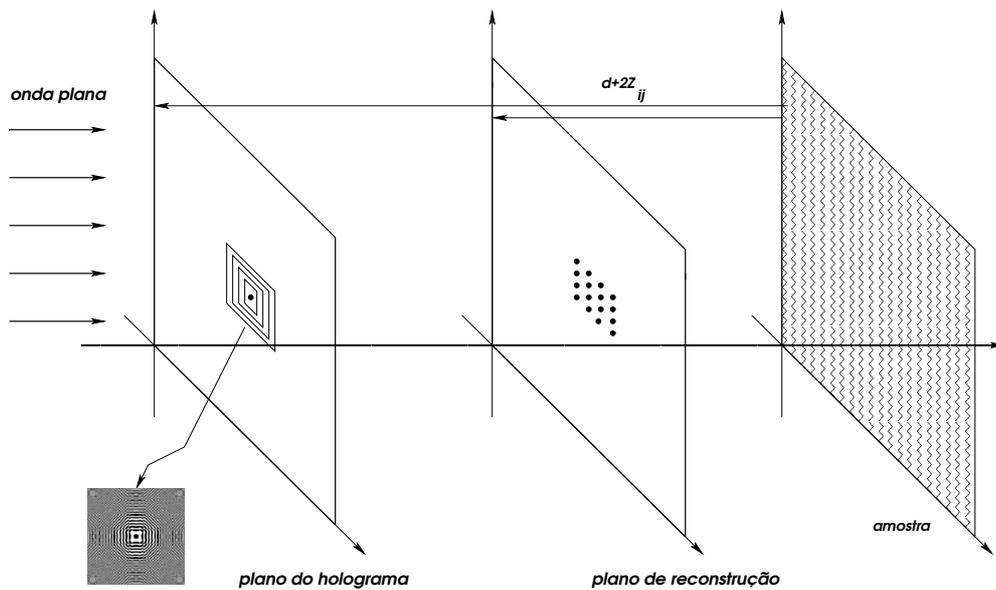


Figura 4.6: Distância percorrida considerando a superfície rugosa no lugar de um espelho perfeito.

Para que uma câmera possa ser colocada para registrar os pontos focalizados pelo holograma, sem bloquear o caminho do feixe de *laser*, é preciso desviar o caminho da luz com um divisor de feixe (Figura 4.7). Este divisor apenas causa a perda de energia do feixe, o que acarreta uma imagem reconstruída menos nítida. Da mesma forma que na Figura 2.3, a distância focal continuará sendo a mesma.

Portanto, considerar a superfície rugosa no lugar de um espelho perfeito, implica em adicionar uma certa distância à z_l na simulação do holograma de *Fresnel*, a qual pode ser considerada como $2z_{ij}$ (ida e volta).

Com isso, para se gerar um holograma distorcido por uma superfície rugosa, modifica-se o código-fonte (apêndice A.1) utilizado do capítulo 2. Basta adicionar $2z_{ij}$ na variável *distancia*. Este código modificado está descrito no apêndice A.4.

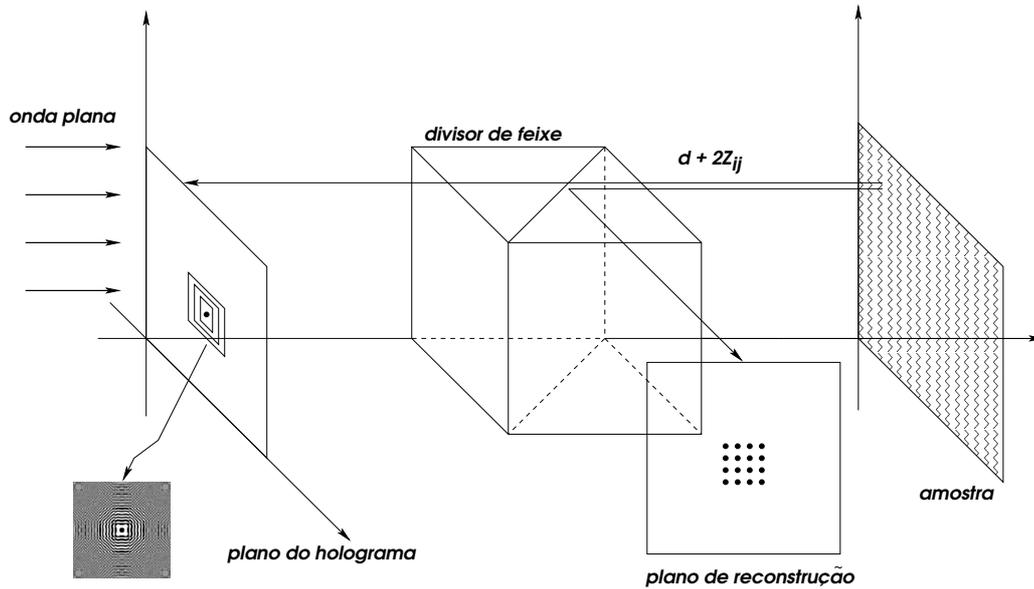


Figura 4.7: Distância percorrida considerando o divisor de feixe e a superfície rugosa.

Antes da simulação do HGC de *Fresnel* distorcido por uma superfície metálica, foi necessária a simulação de uma superfície metálica com o programa descrito no apêndice A.2 com os seguintes dados de entrada:

- $R_q = 0,05\mu m$ (rugosidade quadrática média),
- $N = 512$ ($N \times N$ é o número de *pixels* da superfície),
- $n = m = 28$.

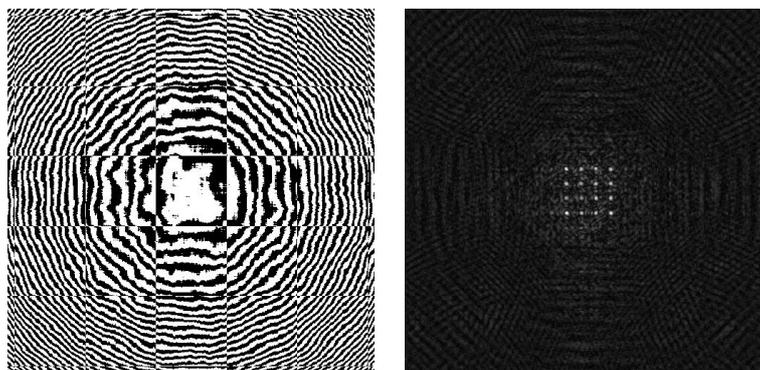
Com a superfície simulada, z_{ij} foi calculado.

Com isso, um holograma de *Fresnel* distorcido por uma superfície metálica foi gerado por computador, utilizando no programa descrito no apêndice A.4 as seguintes variáveis:

- z_{ij} calculado anteriormente,
- $N = 512$ ($N \times N$ é o número de *pixels* do holograma),
- $Lambda = 6,328 \times 10^{-5}cm$ (comprimento de onda do *laser*),
- $distancia = 11,794cm$ (distância focal do holograma),

- $PS = 6,064 \times 10^{-4} cm$ (tamanho do *pixel*).

A partir do holograma de *Fresnel* gerado por computador (Figura 4.8a), de 512 x 512 *pixels*, distorcido por uma superfície metálica com $R_q = 0,05 \mu m$, foi possível reconstruí-lo numericamente (Figura 4.8b). Nota-se nesta reconstrução, a degradação dos pontos focalizados. Quanto maior a rugosidade, maior a degradação da reconstrução numérica, até que os pontos focalizados não existam mais. Isto acontece com rugosidades (R_a) maiores que $0,1 \mu m$, e com isso, o reconhecimento de padrões não será mais possível.



(a) Holograma de *Fresnel* distorcido

(b) Reconstrução numérica

Figura 4.8: HGC de *Fresnel* distorcido por uma superfície metálica e sua reconstrução.

Se, experimentalmente, uma amostra metálica com rugosidade desconhecida for utilizada em um arranjo experimental igual ao da Figura 4.7, podemos utilizar um HGC de *Fresnel* sem distorção para registrar os pontos focalizados opticamente. Esta imagem registrada pode ser comparada com reconstruções simuladas de HGCs de *Fresnel* distorcidos por superfícies metálicas (também simuladas), ou seja, o reconhecimento de padrões pode ser utilizado.

Portanto, se uma reconstrução óptica de um holograma de *Fresnel* for “idêntica” à alguma reconstrução numérica, podemos dizer que a rugosidade da amostra utilizada experimentalmente é a mesma da amostra simulada no computador.

Para o experimento que será realizado no capítulo 5, um banco de dados com reconstruções numéricas deverá ser criado. Como exemplo, pode-se montar uma imagem de 2048×2048 *pixels* com oito subimagens de 512×512 *pixels*. Cada subimagem contém a reconstrução numérica de um HGC distorcido por uma superfície metálica rugosa, com rugosidades (R_q) que variam de $0,01\mu m$ a $0,08\mu m$. Faz-se então, o reconhecimento da subimagem que contém a reconstrução óptica, obtida experimentalmente, frente a imagem que contém as reconstruções numéricas, com técnicas de reconhecimento de padrões.

Capítulo 5

Materiais e métodos

Um método novo para a estimativa da rugosidade de metais foi desenvolvido e baseia-se no reconhecimento de padrões, ou seja, faz-se o reconhecimento de um padrão (capítulo 4) obtido experimentalmente com outro obtido teoricamente através de simulações (capítulo 3). O padrão (imagem capturada por uma câmera CCD) é obtido através da reconstrução óptica de um holograma de 16 pontos distorcido por uma superfície pouco rugosa. O método estima-se válido para rugosidades (R_a) que variam de 0 a $0,1\mu m$.

O procedimento experimental está dividido em duas partes. Na primeira, verificou-se qual holograma (*Fresnel* ou *Fourier*) será utilizado neste trabalho e foi feito um estudo das suas reconstruções ópticas. Na segunda parte, foi feito um experimento para estimar a rugosidade de uma superfície metálica.

5.1 Procedimento experimental para a escolha do holograma

A escolha do holograma tem como base a qualidade das reconstruções ópticas obtidas e o método a ser empregado no reconhecimento de padrões.

5.1.1 Reconstrução óptica do holograma de *Fresnel*

Dois hologramas foram gerados (Figura 5.1) com resolução 1024x1024 *pixels*, impressos numa impressora *laser* de 600 dpi (ocupando quase que totalmente uma folha de papel A4) e reduzidos opticamente por uma fotocopiadora em uma transparência, ocupando uma área de 1,5cm x 1,5cm. A impressão de um deles (Figura 5.1a) também foi fotografada a uma distância pequena de modo a obter uma redução com as mesmas proporções de área no negativo revelado. Um holograma (Figura 5.1a) teve como objeto uma série de pontos equidistantes em forma de matriz e o outro (Figura 5.1b) em forma de uma letra grega (Λ).

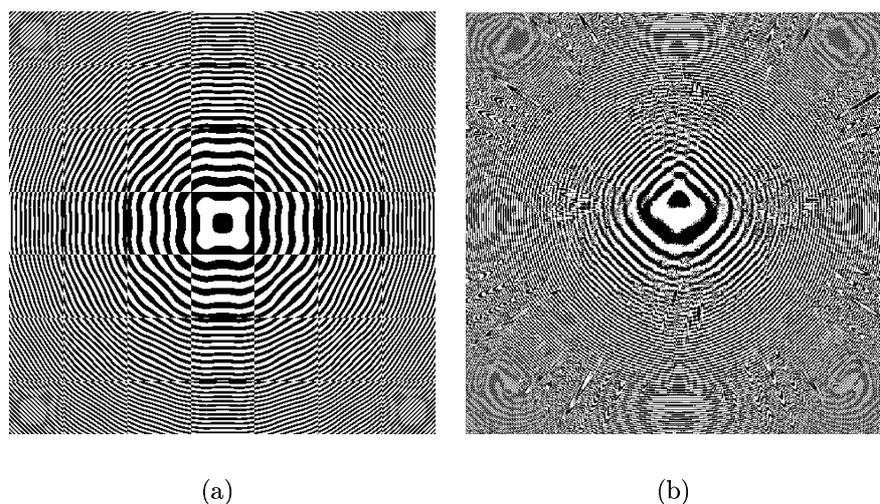


Figura 5.1: Hologramas de *Fresnel* gerados por computador.

A câmera CCD, utilizada em todos os procedimentos experimentais deste trabalho, fornece imagens de 8 bits em tons de cinza e cada *pixel* fornece intensidade variando de 0 a 255. Uma análise desta câmera feita por K. Blane et al.[BMdS98] constatou uma ótima linearidade, que a distância entre os *pixels* na direção x é de 12,30(16) μm e na direção y é de 12,30(14) μm , e que a sua resolução espacial é de 70 μm .

Na reconstrução óptica do holograma de *Fresnel*, utiliza-se o arranjo experimental da Figura 5.2.

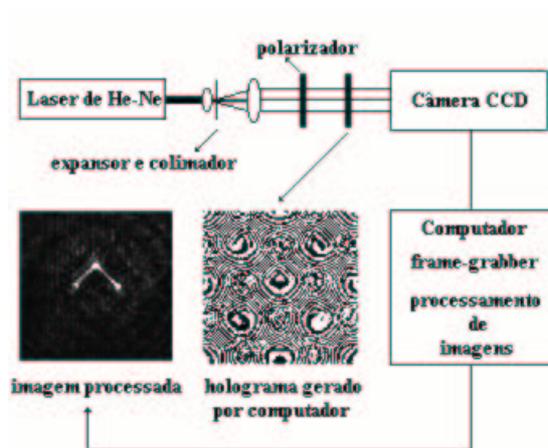


Figura 5.2: Arranjo experimental para a reconstrução do objeto com o holograma de *Fresnel*.

Neste arranjo, um feixe de *laser* de He-Ne ($632,8\text{nm}$ de comprimento de onda e 10mW de potência) é expandido e colimado por um sistema de lentes e incide no holograma. Uma câmera CCD captura a imagem obtida e um computador acoplado a essa câmera faz o processamento dessa imagem.

Três imagens foram obtidas. Na primeira e terceira imagens (Figuras 5.3a e 5.3c) utilizou-se a transparência impressa com o holograma, e na segunda (Figura 5.3b) o filme fotográfico.

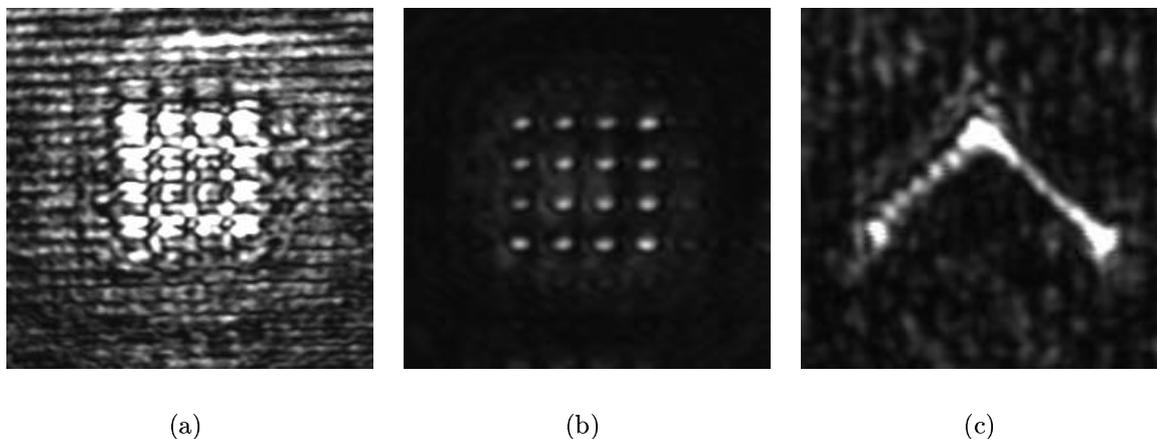


Figura 5.3: Reconstruções ópticas dos hologramas de *Fresnel* da Fig. 5.1.

Existe grande diferença de definição da reconstrução da transparência para o filme fotográfico. Isto porque a transparência possui maior espessura e mais irregularidades na superfície do que o filme fotográfico. Além disso, a resolução da impressora é menor que a resolução do filme. Portanto, é melhor a utilização do negativo para o registro do holograma.

5.1.2 Reconstrução óptica do Holograma de *Fourier*

Um holograma de *Fourier* (Fig. 2.5b) foi gerado (resolução de 300 x 300 *pixels*) e teve como objeto (Fig. 2.5a) o sobrenome *Khamis* em um arquivo de 75 x 75 *pixels*. Neste caso, o número de pontos utilizado foi grande comparado com o número de pontos utilizados nos hologramas de *Fresnel*. Mesmo assim, o processamento desse holograma foi muito mais rápido (cerca de 30 segundos em um computador de 200MHz). A impressão na transparência também foi rápida, já que o holograma gerado pôde ser reduzido diretamente na impressora *laser* de 600 dpi sem perder resolução, ou seja, nenhum ponto simulado deixou de ser impresso. Ele foi reduzido em uma área de 1,3cm x 1,3cm.

Na reconstrução óptica do holograma de *Fourier* utiliza-se o arranjo experimental da Figura 5.4.

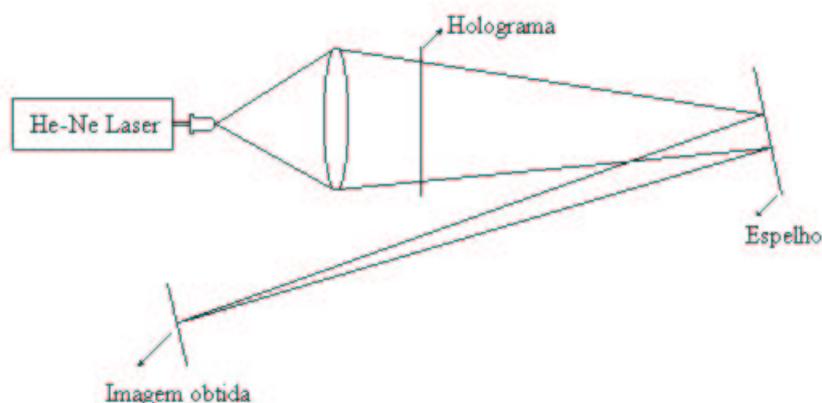


Figura 5.4: Arranjo experimental para a reconstrução do objeto com o holograma de *Fourier*.

Neste arranjo, um feixe de *laser* de He-Ne ($632,8nm$ de comprimento de onda e $10mW$ de potência) é expandido por uma objetiva de microscópio ($20X$), incide em uma lente de distância focal $15,2cm$, incide no holograma e reflete em um espelho para facilitar a visualização da imagem pois esta se forma a cerca de 4 metros de distância da lente. Uma câmera CCD captura a imagem obtida e um computador acoplado a essa câmera faz o processamento dessa imagem.

A partir do holograma gerado por computador (Fig. 5.5b), foi possível reconstruí-lo opticamente (Fig. 5.5c), utilizando o arranjo experimental da Figura 5.4.

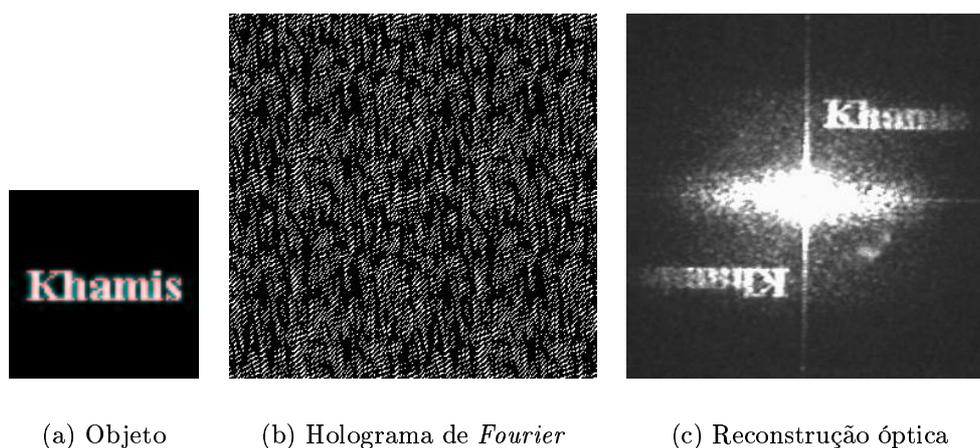


Figura 5.5: Imagem utilizada, seu respectivo holograma e reconstrução.

5.1.3 Escolha do holograma

Inicialmente o problema era o de evitar a perda da resolução do holograma de *Fresnel* devido as limitações da impressora utilizada. Com o holograma de *Fourier*, a resolução da impressora deixou de ser problema. Além disso, o tempo de processamento para gerar o holograma de *Fourier* foi muito menor que o de *Fresnel*. Porém, foi possível reduzir o holograma de *Fresnel* na área desejada, sem perda de resolução, tirando-se uma fotografia do holograma impresso em papel A4, levando-se em conta que o filme fotográfico era preto e branco e tinha uma boa resolução[FM98].

Embora hologramas de *Fourier* sejam comumente utilizados em reconhecimento de

padrões [AI82], neste trabalho, a utilização do holograma de *Fresnel* (sua reconstrução numérica) tornou-se mais vantajosa. Isto porque o algoritmo para gerá-lo por computador pôde ser modificado de modo a levar-se em consideração a reflexão do feixe de *laser* após sua incidência em uma superfície metálica. Esta modificação foi explicada no capítulo 4. Por estas razões, o holograma de *Fresnel* será utilizado no experimento para estimar a rugosidade de superfícies metálicas.

5.2 Procedimento experimental para a estimativa da rugosidade

O material utilizado no experimento é dado a seguir:

- *Laser* de He-Ne ($\lambda = 632,8nm$, $10mW$ de potência);
- Lentes para expandir e colimar o feixe de *laser*;
- Polarizador;
- Holograma gerado por computador;
- Divisor de feixe cúbico;
- Amostra metálica com rugosidade (R_a) ente 0 e $0,1\mu m$;
- Câmera CCD;
- Software de aquisição de imagens: *Global Lab Image*;
- Software para efetuar o reconhecimento de padrões: *Matlab*.

Um feixe de *laser* de He-Ne (Figura 5.6), com $10mW$ de potência, é expandido e colimado por um sistema de lentes, atenuado por um polarizador, e incide em um HGC. Em seguida passa por divisor de feixe cúbico onde uma parte do feixe é perdida (metade) e a outra é refletida por uma superfície metálica. O feixe refletido volta ao divisor de feixe onde novamente uma parte é perdida e, finalmente, a outra é capturada por uma câmera CCD, posicionada na distância focal do HGC. O polarizador foi adicionado

à montagem porque a câmera CCD utilizada não suporta luz muito intensa. Com o auxílio do software de aquisição de imagens *Global Lab Image*, a reconstrução óptica do holograma, distorcida pela superfície metálica, é processada e armazenada para posterior utilização no reconhecimento de padrões. Este reconhecimento é feito com o auxílio do software *Matlab*.

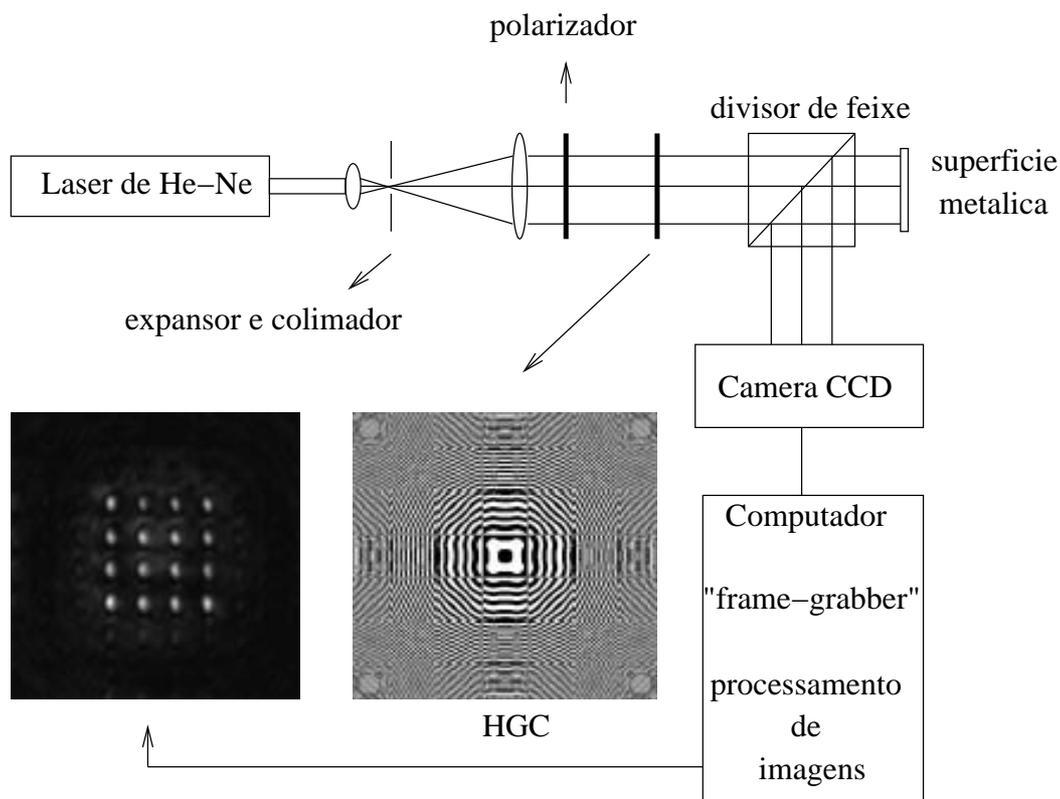


Figura 5.6: Arranjo experimental para o estudo de superfícies metálicas.

O holograma utilizado nesta montagem foi gerado por computador e teve como objeto uma matriz de 16 pontos (suas coordenadas estão na Figura 5.7).

Além das coordenadas dos 16 pontos do objeto, representadas por ox e oy no programa para gerar o holograma (apêndice A.1), foram utilizados, neste programa, os seguintes valores de variáveis:

- $Lambda = 6,328 \times 10^{-5}cm$ (comprimento de onda do *laser*),
- $distancia = 11,79438cm$ (distância focal do holograma),

- $n_{pontos} = 16$ (número de pontos do objeto),
- $N = 4096$ (número de *pixels* nas direções x e y),
- $PS = 1,516 \times 10^{-4}$ (tamanho do *pixel*).

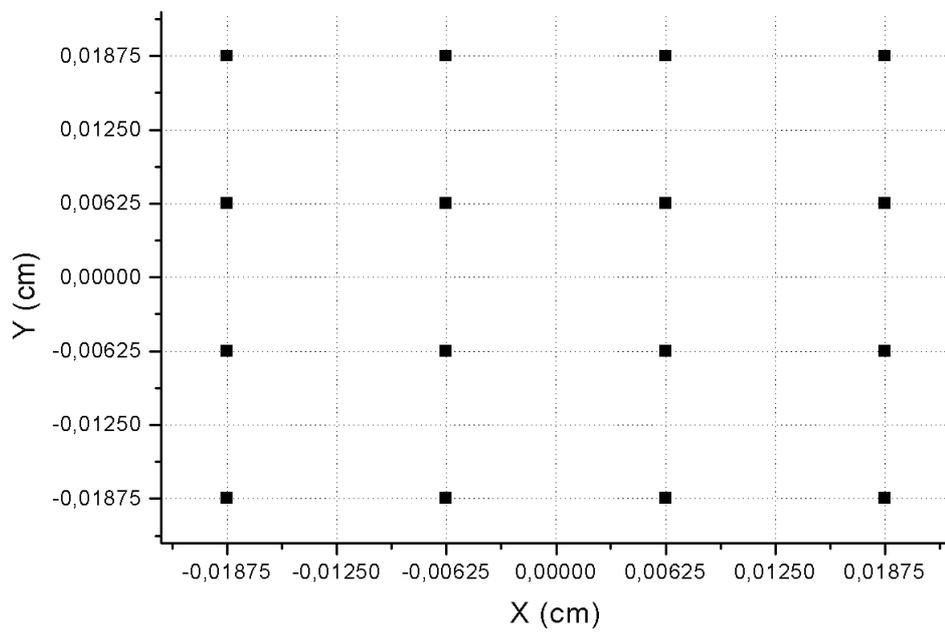


Figura 5.7: Coordenadas dos 16 pontos da matriz utilizada para gerar o holograma.

Este HGC (Figura 5.8), de 4096×4096 *pixels*, foi impresso em papel A4 ocupando o maior espaço possível, e fotografado com filme preto e branco a uma distância aproximada de $1,5m$, iluminado apenas pela luz solar. O holograma ocupou uma área de aproximadamente $1,5cm \times 1,5cm$ no filme fotográfico revelado.

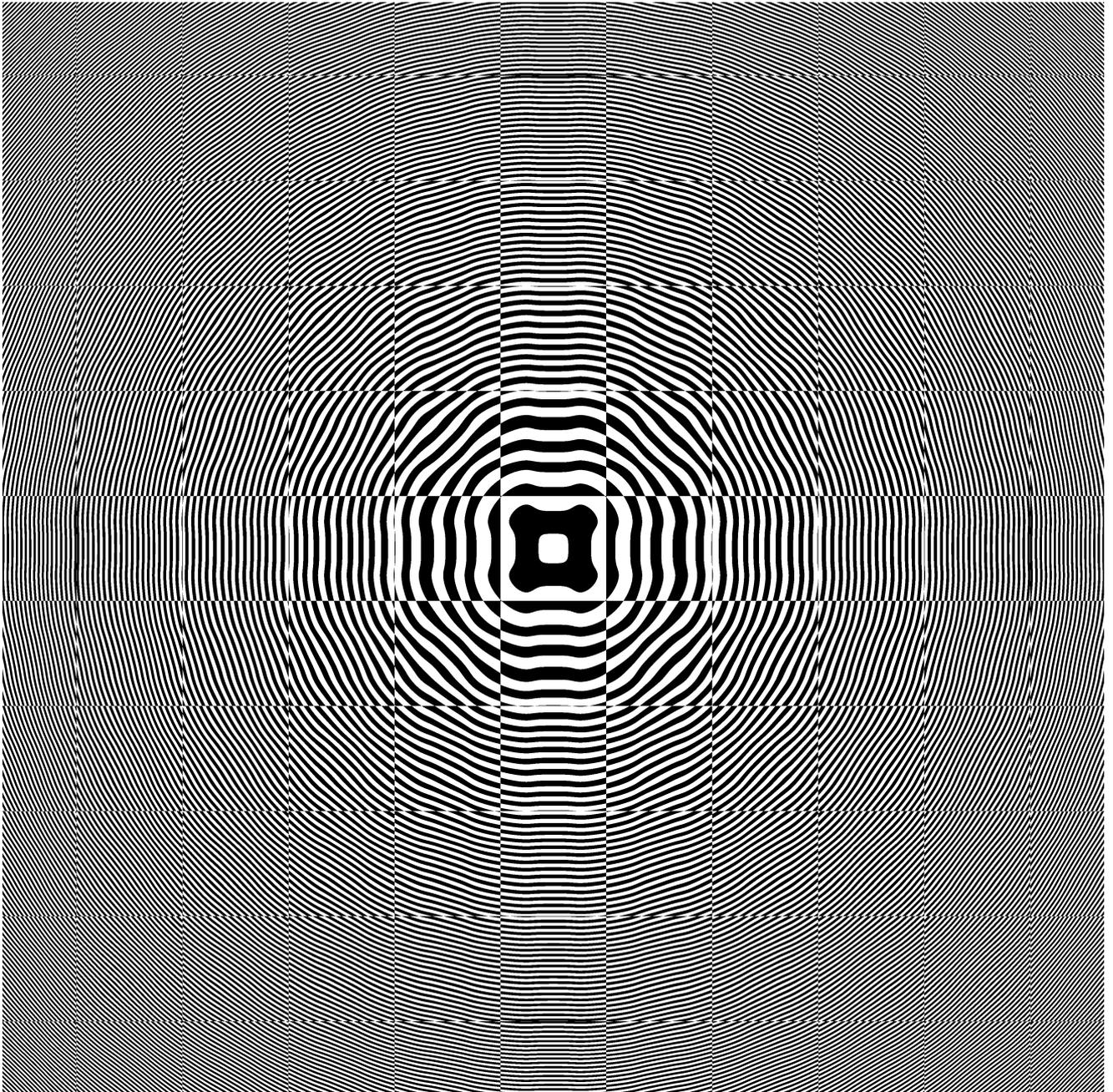


Figura 5.8: HGC utilizado no procedimento experimental.

Capítulo 6

Resultados

6.1 Medidas com um perfilômetro mecânico

Medidas feitas com um perfilômetro mecânico servem de base para que uma comparação possa ser feita com a estimativa de rugosidades, obtidas pelo novo método desenvolvido. Note que comparar um método óptico com outro mecânico muitas vezes pode não ser válido, principalmente quando envolvem fenômenos físicos diferentes. Neste caso, é suficiente para descartar amostras com rugosidades (R_a) maiores que $0,1\mu m$.

As Tabelas 6.1 e 6.2 mostram as médias das medidas de rugosidade (R_a e R_q respectivamente), utilizando um perfilômetro mecânico da *Mitutoyo*, de três amostras: cobre polido, latão polido e disco rígido de computador (HD). Para cada amostra, cinco medidas¹ de R_a e R_q foram feitas, uma no centro da amostra e mais quatro nas bordas.

Pode-se notar o caráter estatístico da rugosidade de superfícies metálicas. Os seus valores, às vezes, são fortemente dependentes do processo de preparação dessas superfícies. Por exemplo, os dados do cobre polido, da Tabela 6.1 e 6.2, mostram que a borda 3 apresenta alguma anomalia, resultando em valores discrepantes. Essa anomalia pode ser causada por uma maior corrosão local ou mesmo sujeira ou partículas de

¹Dados cedidos por Raul Dias Paiva Jr.

pó agregadas à superfície.

Medidas de R_a						
Amostra	R_a (μm)					Médias (μm)
	centro	borda 1	borda 2	borda 3	borda 4	
cobre polido	0.05	0.08	0.09	0.14	0.05	0.08 ± 0.04
latão polido	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05 ± 0.01
HD	0.05					

Tabela 6.1: Média das medidas de R_a obtidas com um perfilômetro mecânico.

Medidas de R_q						
Amostra	R_q (μm)					Médias (μm)
	centro	borda 1	borda 2	borda 3	borda 4	
cobre polido	0.05	0.05	0.05	0.22	0.05	0.08 ± 0.08
latão polido	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05 ± 0.00
HD	0.05					

Tabela 6.2: Média das medidas de R_q obtidas com um perfilômetro mecânico.

6.2 Dados experimentais

Os dados aqui apresentados, são uma coletânea de simulações de HGCs de *Fresnel* distorcidos por superfícies metálicas, suas reconstruções numéricas, e imagens obtidas do arranjo experimental da Figura 5.6 (reconstruções ópticas de um HGC de *Fresnel*). Será utilizado o reconhecimento de padrões para a análise deste dados.

A Figura 6.1 contém oito hologramas de *Fresnel* distorcidos por oito superfícies rugosas, com rugosidades quadráticas médias entre 0.01 e $0.08\mu m$.

A Figura 6.2 contém as reconstruções numéricas dos hologramas de *Fresnel* da Figura 6.1. Nota-se nesta figura a degradação progressiva dos pontos focalizados com o aumento da rugosidade.

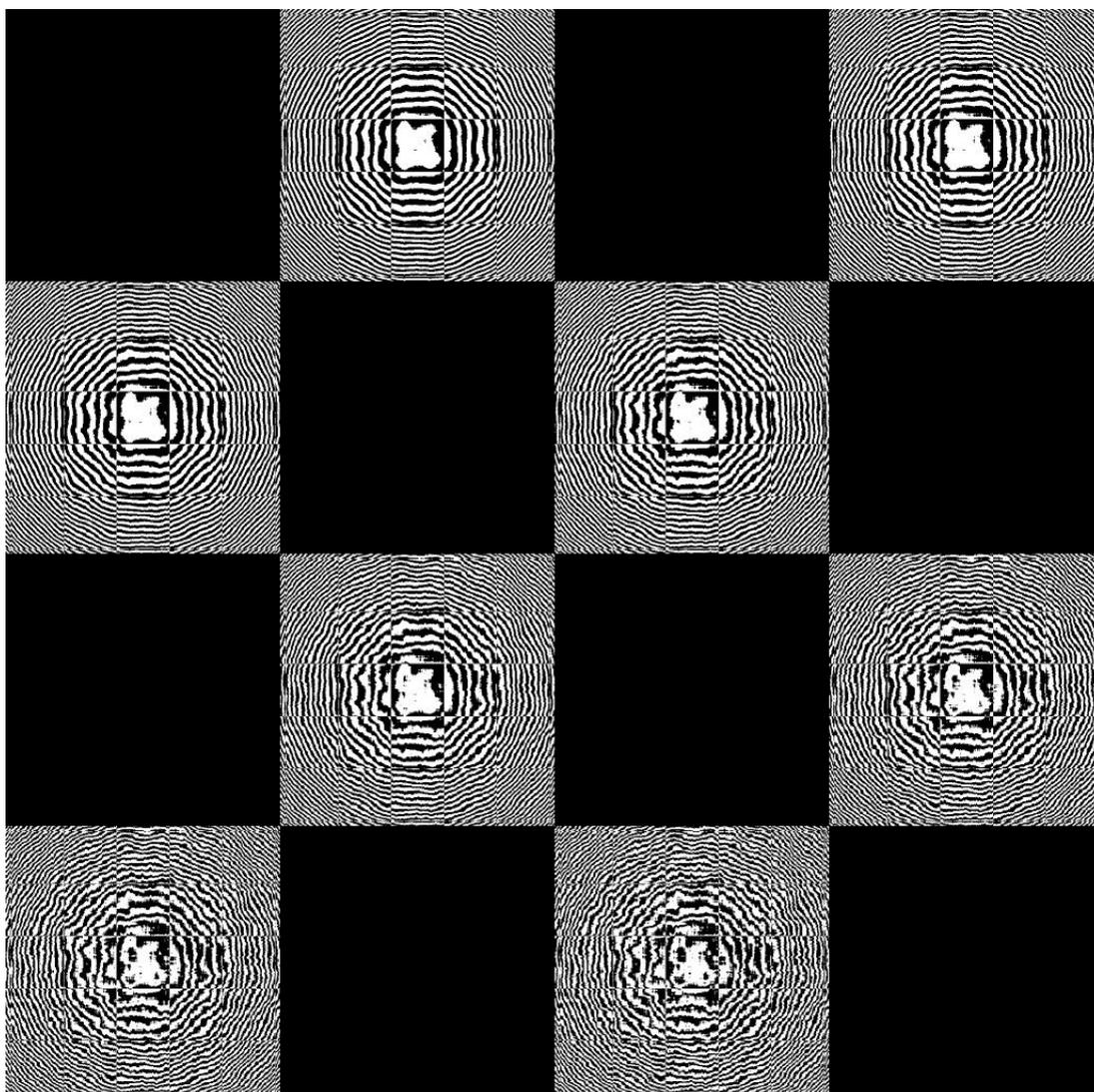


Figura 6.1: Imagem contendo oito hologramas de *Fresnel*.

Três amostras (cobre, latão e HD) foram utilizadas no arranjo da Figura 5.6 resultando em três imagens armazenadas (Figura 6.3). Com cada uma dessas imagens, estima-se a rugosidade através do reconhecimento de padrões frente à imagem da Figura 6.2. Isto é feito com o programa, em *Matlab*, descrito no apêndice A.3. Devido ao tamanho dos arquivos (2048 x 2048 *pixels*), este procedimento só foi possível recentemente com a utilização de computadores com processadores mais velozes e com mais memória.

Os picos de intensidade das amostras, com padrões já reconhecidos, podem ser visualizados nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6.

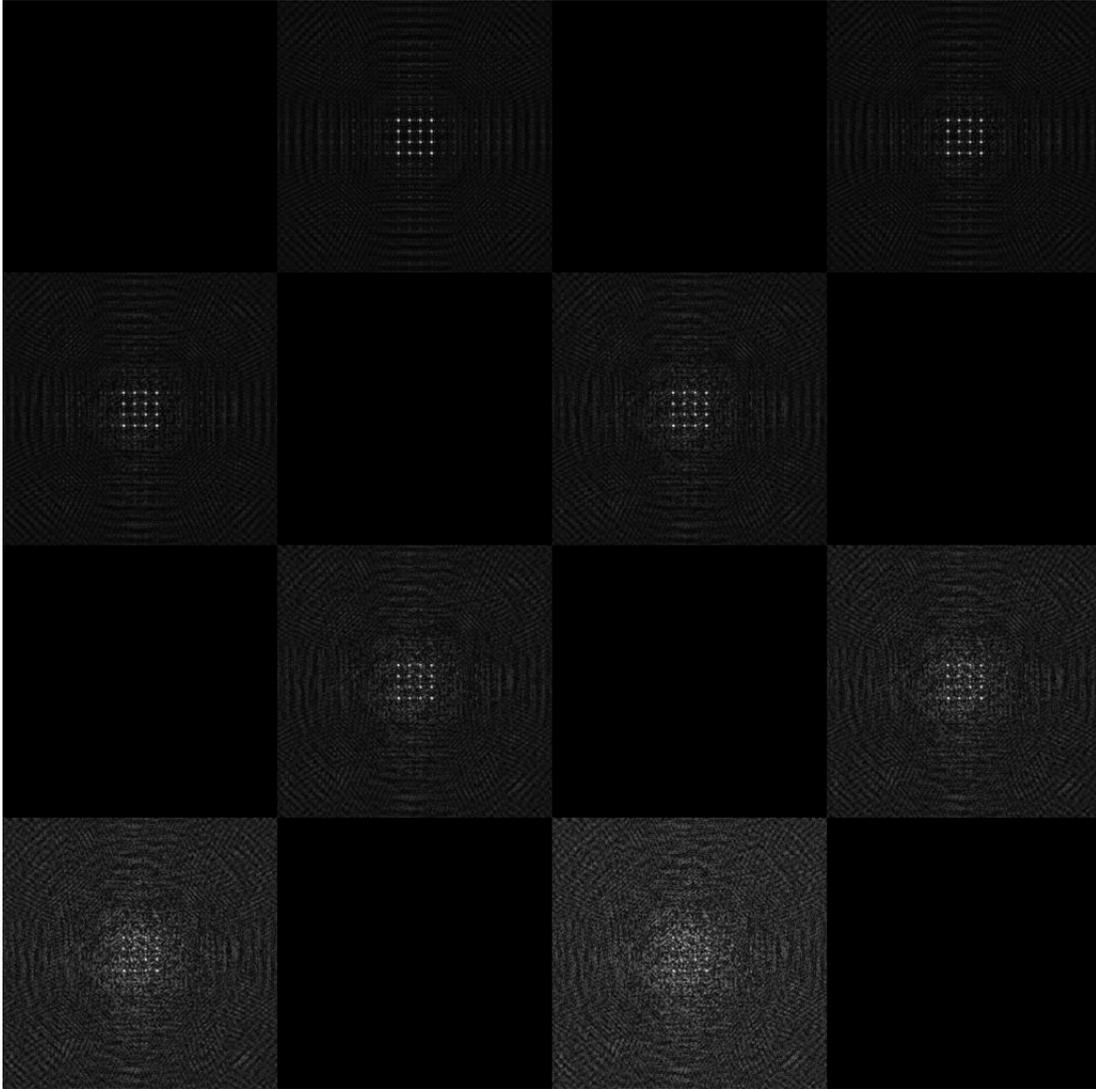


Figura 6.2: Imagem contendo reconstruções numéricas de oito hologramas de *Fresnel*.

O maior pico de intensidade ($6,9954 \times 10^{17}$), para o cobre polido (Fig. 6.4), está nas coordenadas $x = 224$ e $y = 808$, o que sugere $R_q = 0,08\mu m$.

O maior pico de intensidade ($6,738 \times 10^{17}$), para o latão polido (Fig. 6.5), está nas coordenadas $x = 260$ e $y = 1794$, o que sugere $R_q = 0,07\mu m$.

O maior pico de intensidade ($1,4059 \times 10^{18}$), para o HD (Fig. 6.6), está nas coordenadas $x = 1810$ e $y = 1279$, o que sugere $R_q = 0,01\mu m$.

A seguinte tabela (Tabela 6.3) exhibe os valores de rugosidade (R_q) que foram obtidos experimentalmente através do novo método de aplicação do correlator óptico

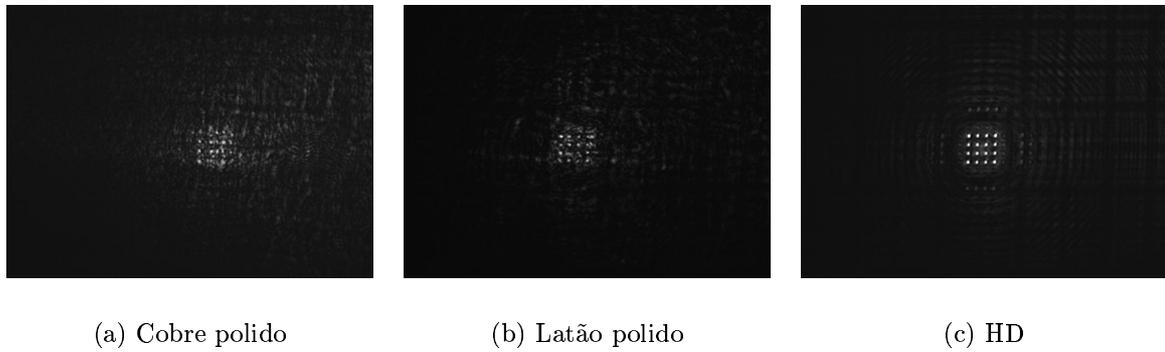


Figura 6.3: Imagens obtidas com as amostras metálicas.

Amostra	R_q (μm)
Cobre polido	0.08
Latão polido	0.07
HD	0.01

Tabela 6.3: Medidas de R_q obtidas experimentalmente.

(simulado).

É interessante notar que os picos de intensidade vão aumentando de valor à medida em que se aproximam do pico mais alto, e decrescem de valor após passarem por este pico.

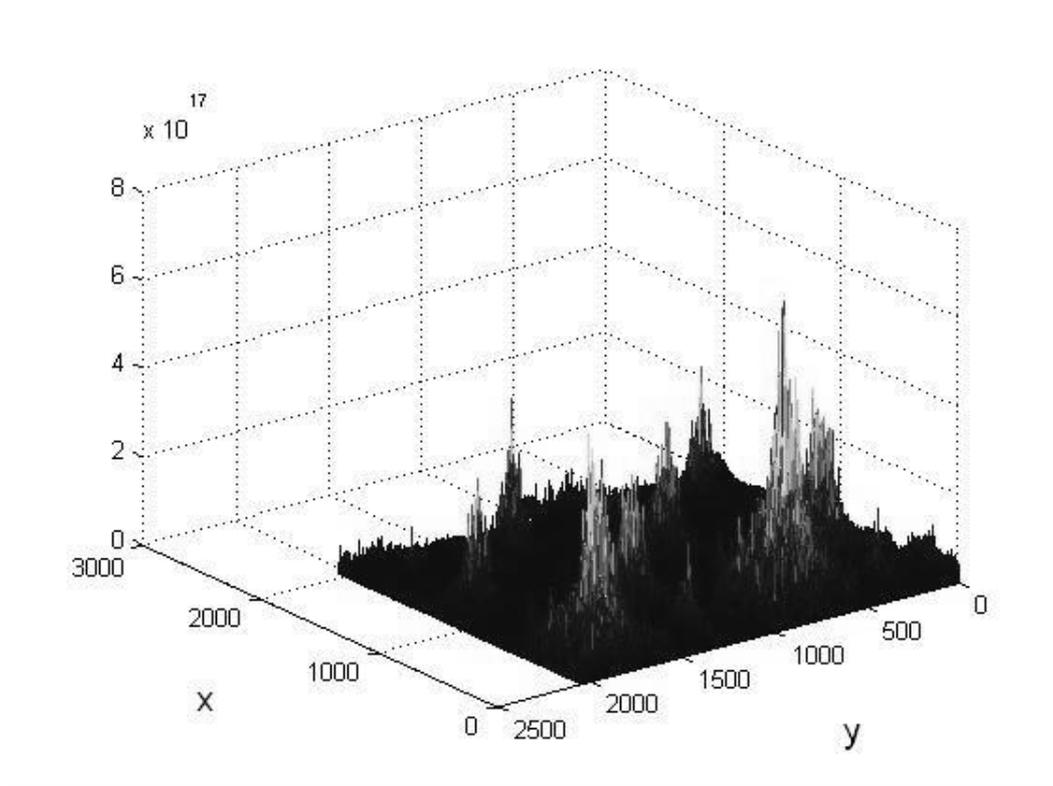


Figura 6.4: Reconhecimento de padrões para o cobre polido.

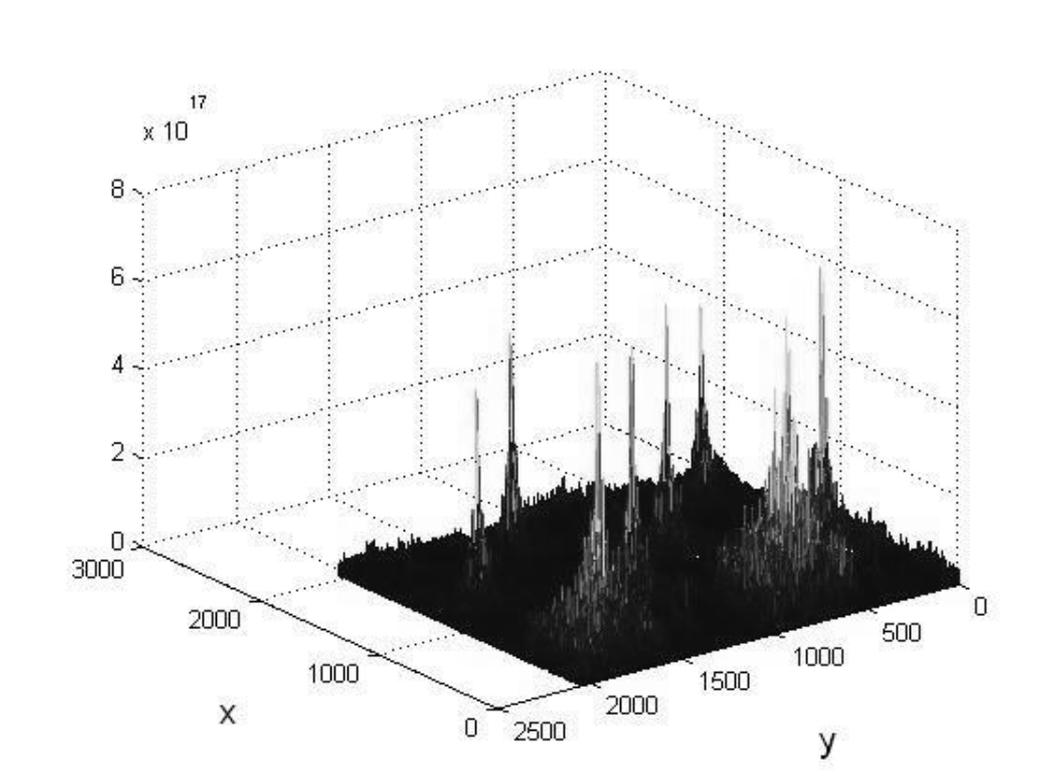


Figura 6.5: Reconhecimento de padrões para o latão polido.

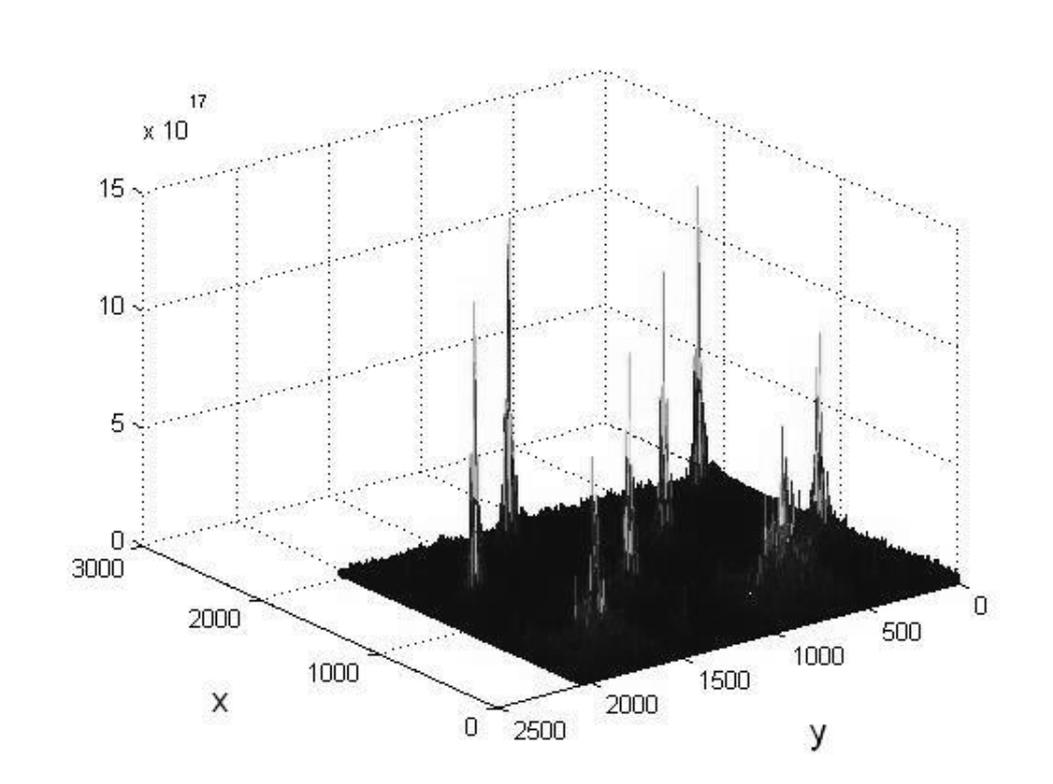


Figura 6.6: Reconhecimento de padrões para o HD.

Capítulo 7

Discussão e Conclusão

7.1 Discussão

É difícil comparar um método óptico com um método mecânico. No método óptico, a luz é refletida pela superfície e fornece informações das três dimensões dessa superfície, enquanto que no método mecânico, apenas um perfil da superfície é medido, o que torna necessário medidas de vários perfis para que uma média possa ser obtida, de modo a ter uma medida mais confiável.

Embora as medições de R_q tenham fornecido valores parecidos para o cobre e para o latão, o valor para o HD foi discrepante. Uma possível causa é a falha do método mecânico devido a precisão do perfilômetro mecânico utilizado, o qual não foi capaz de obter medidas de R_a e R_q diferentes ao longo da superfície.

Fenômenos físicos diferentes estão envolvidos nos processos de medida. É muito mais conveniente e confiável comparar medidas que envolvam os mesmos fenômenos físicos.

Os principais fatores de erro foram:

- Perfilômetro mecânico limitado em medidas de R_a menores que $0.05\mu m$.
- Diferença de qualidade entre os hologramas simulados e o holograma fotografado (o número de *pixels* do fotografado foi muito maior).

- Tantas as aproximações na simulação do holograma quanto as aproximações na simulação da superfície geram erros, porém, a resolução da imagem simulada é de fundamental importância no reconhecimento de padrões. Uma imagem simulada com baixa resolução implica em um reconhecimento de padrões que não é ideal. Um padrão ideal seria exatamente igual ao de uma imagem a ser reconhecida.
- falta de banco de dados devido à demora dos cálculos. Dependendo dos dados de entrada, a simulação pode tornar-se impraticável.
- erros no alinhamento do arranjo experimental costumam ocorrer e com isso prejudicam a comparação das imagens obtidas experimentalmente com simuladas no computador;
- Aproximações na simulação da superfície: os hologramas distorcidos mostraram-se altamente sensíveis a mudanças na superfície simulada. O método de simulações de superfícies deve ser revisto e aprimorado de modo a representar mais fielmente superfícies reais.

A rugosidade quadrática média foi determinada e está de acordo as medidas de um perfilômetro mecânico se levarmos em consideração os desvios das medidas e a precisão do perfilômetro.

Não foi possível estabelecer a validade da Equação 3.5 pois nas próprias medidas com o perfilômetro mecânico esta relação não foi validada. Na simulação da superfície metálica apenas o R_q foi requerido em termos de rugosidade. Mesmo com uma comparação entre os valores de R_q medidos opticamente com os valores de R_a medidos mecanicamente, não se pode validar a relação, já que apenas o latão parece obedecer esta relação. Também existe a possibilidade das amostras não obedecerem estatística gaussiana, o qual é um critério de validade da relação.

O método torna-se útil para uma medida qualitativa da superfície e, para validar método, são necessários outros ensaios. Como primeira tentativa, o novo método de aplicação de HGCs em reconhecimento de padrões se mostrou confiável e de possível repetitividade.

A utilização de outros filtros no correlator óptico podem melhorar o reconhecimento de padrões e com isso aumentar a precisão do sensor.

7.2 Conclusão

O método desenvolvido mostrou-se útil na estimativa da rugosidade de superfícies metálicas com baixa rugosidade, ou seja, com R_a menores que $0,1\mu m$. Mostrou-se poderoso na inspeção visual dessas superfícies podendo revelar rapidamente se a superfície tem ou não baixa rugosidade.

Valores de rugosidade de três amostras foram quantificados e revelaram-se próximos aos valores medidos por um perfilômetro mecânico. Diversos fatores de erros foram apontados, porém, foram aparentemente superados em vista dos resultados obtidos.

O correlator óptico de *VanderLugt* costuma utilizar hologramas de *Fourier* como filtros. Este correlator foi simulado no computador para ser aplicado no reconhecimento de padrões. A reconstrução numérica de diversos HGCs de *Fresnel* distorcidos por superfícies metálicas, simuladas com rugosidades (R_q) entre 0 e $0,08\mu m$, serviram como imagens a serem correlacionadas com reconstruções ópticas de um HGC de *Fresnel* sem distorção, porém, com uma reconstrução “perturbada” por uma amostra metálica.

A utilização de outros filtros podem melhorar o reconhecimento de padrões e com isso aumentar a precisão do sensor. Simulações de HGCs de *Fresnel* distorcidos por superfícies metálicas com um número maior de valores de rugosidades intermediárias (neste trabalho, variaram de 0.01 a $0,08\mu m$ em intervalos de $0,01\mu m$) também prometem aumentar a precisão do sensor.

O principal objetivo do trabalho, que era o de saber se o holograma poderia ser utilizado como um sensor óptico, de modo a fornecer informações úteis sobre uma superfície estudada, foi alcançado.

7.3 Perspectivas e planos futuros

As perspectivas deste trabalho são relacionadas a seguir:

- comparação dos resultados com outros métodos;
- utilização de métodos mais realistas na simulação das superfícies metálicas;
- obtenção de um maior número de amostras para verificar repetitividade e confiabilidade;
- implementação de novos filtros no correlator óptico para melhorar o reconhecimento de padrões;
- implementação do novo método no rugosímetro a *laser* desenvolvido por Raul Jr. [Jr.02].

Alguns planos futuros para o uso de HGCs são relacionados a seguir:

- teste de lentes;
- estudo de outros tipos de HGCs (hologramas impressos em cartão de crédito, por exemplo);
- utilização de um HGC de *Fourier* em um correlator óptico de *VanderLugt*;
- os pontos focalizados de um HGC de *Fresnel* poderiam ser simulados de modo a focalizarem sobre uma superfície curva. Por exemplo, sobre uma esfera. Desta forma, a rugosidade de superfícies curvas também poderá ser estimada.

Referências Bibliográficas

- [AI82] Silverio P. Almeida and Guy Indebetouw. *Applications of Optical Fourier Transforms*, chapter Pattern Recognition via Complex Spatial Filtering, pages 41–87. Academic Press, Inc., 1982.
- [Ber98] Eloisa Bertini. Um sistema para visualização holográfica. Master's thesis, Instituto de Computação - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, Março 1998.
- [Bet02] Anderson Duarte Betiol. Verificação da autenticidade de impressões digitais em tempo real utilizando-se o correlator Óptico compacto. Master's thesis, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos - Brasil, 2002.
- [BMdS98] K. Blane, M. Muramatsu, and F. C. da Silva. Verificação da linearidade de resposta da câmera ccd. In *Anais de Óptica do XXI ENFMC*, pages 352–356, Caxambu-MG, Brasil, Junho 1998.
- [BS63] P. Beckmann and A. Spizzichino. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*. Pergamon Press, Oxford, 1963.
- [BW80] Max Born and Emil Wolf. *Principles of Optics, 6th Edition*. Pergamon Press, New York, 1980.
- [BW90] O. Bryngdahl and F. Wyrowski. *Progress in Optics XXVIII*, chapter Digital Holography - Computer-Generated Holograms, pages 1–86. North-Holland, 1990.
- [Car03] P. S. P. Cardona. *Elementos Ópticos Difractivos Operando em Regime de Modulação Complexa Completa*. PhD thesis, Instituto de Física - Universidade de São Paulo, São Paulo - Brasil, 2003.
- [Dal80] William J. Dallas. *The Computer in Optical Research*, volume 41 of *Springer Series Topics in Applied Physics*, chapter Computer-Generated Holograms, pages 291–366. Springer Verlag, Berlin, 1980.
- [Dal04] William J. Dallas. Opti627. World Wide Web, <http://www.radiology.arizona.edu/dallas/CGH.htm>, 2004.
- [FM98] Eduardo Ferrara and Mikiya Muramatsu. Curva característica de um filme fotográfico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 20(1):24–26, Março 1998.

- [FSZ⁺02] A. A. Firsov, A. A. Svintsov, S. I. Zaitsev, A. Erko, and V. V. Aristov. The first synthetic x-ray hologram: results. *Optics Communications*, 202:55–59, February 2002.
- [Gab48] D. Gabor. A new microscopic principle. *Nature*, 161:777, 1948.
- [Goo96] J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill, New York, 1996.
- [Gru01] Matthias Gruber. Diffractive optical elements as raster-image generators. *Applied Optics*, 40(32):5830–5839, November 2001.
- [GW00] Rafael C. Gonzales and Richard E. Woods. *Processamento de imagens digitais*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 2000.
- [HT92] Y. Z. Hu and K. Tonder. Simulation of 3-d random rough surfaces by 2-d digital filter and fourier analysis. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 32(1/2):83–90, 1992.
- [Jr.02] Raul Dias Paiva Jr. Desenvolvimento de um rugosímetro a laser. Master's thesis, Instituto de Física - Universidade de São Paulo, São Paulo - Brasil, 2002.
- [Koe04] Matthias Koenig. Synthetic holography toolkit - shot. World Wide Web, <http://www.matthias-koenig.net/SHoT>, 2004.
- [Kum92] B. V. K. Vijaya Kumar. Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators. *Applied Optics*, 31(23):4773–4801, August 1992.
- [Lee78] Wai-Hon Lee. *Progress in Optics XVI*, chapter Computer-Generated Holograms: Techniques and Applications, pages 121–232. North-Holland, 1978.
- [LKW95] W. Lauterborn, T. Kurz, and M. Wiesenfeldt. *Coherent Optics: Fundamentals and Applications*. Springer, 1995.
- [Luc94] M. Lucente. *Diffraction Specific Fringe Computation for Electro Holography*. PhD thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science - Massachusetts Institute of Technology, World Wide Web, <http://www.lucente.biz/pubs/PhDthesis/contents.htm>, September 1994.
- [Nas90] Dale Nassar. Computer-generated holographic images. *Circuit Cellar Ink*, 14:22–37, April-May 1990.
- [NCC⁺03] L. G. Neto, P. S. P. Cardona, G. A. Cirino, R. D. Mansano, and P. Verdonck. Design, fabrication, and characterization of a full complex-amplitude modulation diffractive optical element. *J. Microlith., Microfab., Microsyst.*, 2(2):96–104, April 2003.

- [Net02] L. G. Neto. *Tese de Livre Docência: Implementação de Hologramas Gerados por Computador Híbridos e em Regime de Modulação Complexa Completa*. PhD thesis, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos - Brasil, 2002.
- [Pat78] Nadir Patir. A numerical procedure for random generation of rough surfaces. *Wear*, 47:263–277, 1978.
- [PFTV93] W.H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling. *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, New York, 1993.
- [RSSP95] Jari T. Räsänen, Markku Savolainen, Raimo Silvennoinen, and Kai-Erik Peiponen. Optical sensing of surface roughness and waviness by a computer-generated hologram. *Optical Engineering*, 34(9):2574–2580, September 1995.
- [Sal97] Adriana Saldanha. Rugosidade: conceituação e medição. Seminário apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo na disciplina PMC-873 Introdução so Desgaste, 1997.
- [SJ02] Ulf Schnars and Werner P. O. Jüptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms. *Measurement Science and Technology*, 13:R85–R101, 2002.
- [SRJ92] R. Silvennoinen, J. Räsänen, and T. Jääskeläinen. A novel optical interconnection method. *Optics Communication*, 93:289–293, 1992.
- [SWJSL92] Alan D. Stein, Zhiyue Wang, and Jr. John S. Leigh. Computer-generated holograms: A simplified ray-tracing approach. *Computers in Physics*, 6(4):55–59, Jul/Aug 1992.
- [Tan79] L. H. Tanner. A comparison between talysurf 10 and optical measurements of roughness and surface slope. *Wear*, 57:81–91, 1979.
- [Van64] A. VanderLugt. Signal detection by complex spatial filtering. *IEEE Trans. Inf. Theor.*, 10:139–145, 1964.
- [Wal99] Thad G. Walker. Holography without photography. *Am. J. Physics*, 67(9):783–785, September 1999.
- [Wu00] Jiunn-Jong Wu. Simulation of rough surfaces with fft. *Tribology International*, 33:47–58, 2000.

Apêndice A

Listagem de programas

A.1 Registro do Holograma de Fresnel

```
void holograma()
{
    s = 0.0;
    N2 = N / 2;
    K = 2 * M_PI / Lambda;
    pz2 = distancia * distancia;
    for(i = 0; i < N; i++)
    {
        i2 = (i - N2) * PS;
        for(j = 0; j < N; j++)
        {
            j2 = (j - N2) * PS;
            for(p = 0; p < npontos; p++)
            {
                px = ox[p] - i2;
                py = oy[p] - j2;
                fase = K * sqrt(px*px + py*py + pz2);
                s += cos(fase);
            }
        }
    }
}
```

```
    }
    if (s > 0.0)
        pix[i][j] = 0;
    else
        pix[i][j] = 255;
    s = 0.0;
}
}
```

A.2 Simulação de uma superfície rugosa

```
void superficie()
{
    int N=40 , n=7 , m=4 , i, j, k, l;
    long idum=-1237;
    float sigma= , **eta, **z, aux;

    eta = matrix(0, N + n - 1, 0, N + m - 1);
    z = matrix(0, N - 1, 0, N - 1);

    aux = sigma / sqrt(n * m);

    for (i = 0; i < (N + n); i++)
        for (j = 0; j < (N + m); j++)
            eta[i][j] = gasdev(&idum);

    for (i = 0; i < N; i++)
        for (j = 0; j < N; j++)
            z[i][j] = 0.0;
```

```
for (i = 0; i < N; i++)
{
    for (j = 0; j < N; j++)
    {
        for (k = 0; k < n; k++)
            for (l = 0; l < m; l++)
                z[i][j] = z[i][j] + eta[i+k][j+l];
        z[i][j] = aux * z[i][j];
    }
}
}
```

A.3 Reconhecimento de padrões

```
N = 256; % arquivo NxN pixels

abcd = imread('abcd.bmp'); % arquivo bmp 8bit-grayscale
fftabcd = fftshift(fft2(fftshift(abcd)));
abcd = [];

a = imread('a.bmp'); % caracter a ser reconhecido
ffta = fftshift(fft2(fftshift(a)));
a = [];

filtro = fftabcd .* conj(ffta); % filtro casado
%filtro = fftabcd ./ ffta; % filtro inverso
%filtro = filtro ./ abs(ffta);

fftabcd = []; ffta = [];

saida = fftshift(fft2(fftshift(filtro)));
```

```
filtro = [];  
  
intensidade = saida .* conj(saida);  
saida = [];  
  
figure(1); mesh([1:N],[1:N],intensidade);  
axis ij; set(gca,'XDir','reverse','YDir','normal');  
  
pico = 0;  
coordX = 0;  
coordY = 0;  
for I = 1:N,  
    for J = 1:N,  
        if ( intensidade(I,J) > pico )  
            pico = intensidade(I,J);  
            coordX = I;  
            coordY = J;  
        end  
    end  
end  
  
coordX  
coordY  
pico  
  
coordX = []; coordY = []; pico = []; intensidade = [];  
  
clear
```

A.4 Holograma distorcido por uma superfície metálica

```
void holosurf()
{
    s = 0.0;
    N2 = N / 2;
    K = 2 * M_PI / Lambda;
    for(i = 0; i < N; i++)
    {
        i2 = (i - N2) * PS;
        for(j = 0; j < N; j++)
        {
            j2 = (j - N2) * PS;
            pz = distancia + 2 * z[i][j];
            for(p = 0; p < npontos; p++)
            {
                px = ox[p] - i2;
                py = oy[p] - j2;
                fase = K * sqrt(px*px + py*py + pz*pz);
                s += cos(fase);
            }
            if (s > 0.0)
                pix[i][j] = 0;
            else
                pix[i][j] = 255;
            s = 0.0;
        }
    }
}
```

Apêndice B

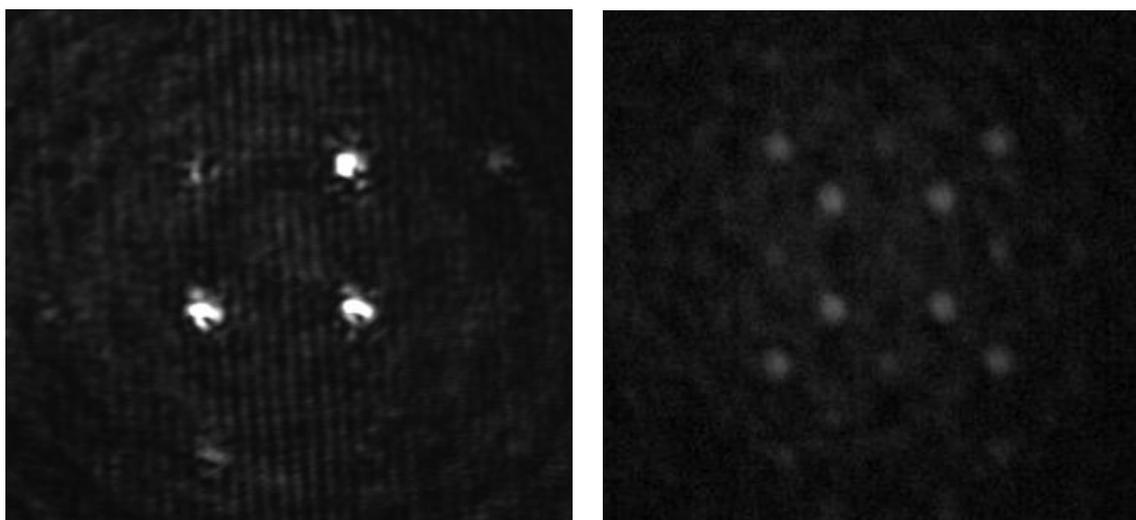
Registro do Holograma de *Fourier*

```
//holo.c--simple program for computer-generated holography
//Thad G. Walker University of Wisconsin-Madison
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include "nrutil.h" //Numerical Recipes routines for memory allocation
#define twopi 6.283185307
#define R 75 //Resolving power of hologram
#define N 300 //hologram width in pixels
#define thres 0.6 //threshold for binary approximation

void main(){
    char pixel,obj;
    int X,Y,row,col,junk;
    float **pix,kdf=twopi/2.0,ranphi,max=0.0,min=0.0,res=R;
    FILE *out,*in;
    out=fopen("holo.pgm","w"); // output file, N X N size graphics file
    in=fopen("uwphysics.pgm","r"); //input file, R X R size graphics file
    fprintf(out,"P5 %d %d 255\n",N,N); //header
    fscanf(in,"%1s %1s %d %d",&junk,&junk,&junk,&junk); //header
    srand(17); //seed random number generator
    pix=matrix(0,N-1,0,N-1); //allocate memory for graphical output
    for(X=0;X<N;X++){for(Y=0;Y<N;Y++){pix[X][Y]=0.0;}} //initialization
    //construct real hologram from input image
    for(row=0;row<R;row++){for(col=0;col<R;col++){
        fscanf(in,"%1c",&obj); //read 1 byte at a time
        if(obj!=0){ //all non-zero bytes given same intensity
            ranphi=((float) rand())/((float) RAND_MAX)*twopi; //select random phase
            for(X=0;X<N;X++){for(Y=0;Y<N;Y++){
                pix[X][Y]+=cos(kdf*(X*(1.-row/res)+Y*col/res)+ranphi); //add to hologram
            }}
        }
    }}
    //find max min
    for(X=0;X<N;X++){for(Y=0;Y<N;Y++){
        if(pix[X][Y]>max)max=pix[X][Y];
        if(pix[X][Y]<min)min=pix[X][Y];
    }}
    //print output file
    for(X=0;X<N;X++){for(Y=0;Y<N;Y++){
        if((pix[X][Y]-min)/(max-min)>thres){pixel=255;
        }else{pixel=0;}
        fprintf(out,"%c",pixel);
    }}
}
```

Apêndice C

Exemplos de reconstruções ópticas



(a) Três pontos

(b) Oito pontos

Figura C.1: Reconstruções de hologramas de *Fresnel*.



Figura C.2: Reconstrução de um holograma de *Fourier*.