

GILVAN BARBOSA SILVA

**ANÁLISE DE TENSÕES ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO DE
IMAGENS HOLOGRÁFICAS**

Texto de Dissertação apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Projeto e Fabricação

Orientador:
Prof. Dr. Edison Gonçalves

São Paulo

2005

CONSULTA
FD-4006
Ed.rev.

OK

GILVAN BARBOSA SILVA

**ANÁLISE DE TENSÕES ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO DE
IMAGENS HOLOGRÁFICAS**

Texto de Dissertação apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

São Paulo

2005

RESUMO

A associação da metrologia óptica, interferometria, holografia e processamento de imagens representa uma contribuição importante para o desenvolvimento do estudo do comportamento mecânico dos materiais, permitindo a avaliação mais precisa e rápida da possibilidade de falha de estruturas e componentes mecânicos.

As vantagens do método proposto sobre os ensaios convencionais são: as medições são realizadas em condições reais de solicitação; a precisão para medir pequenas tensões e deformações; o método é completamente não-destrutivo e não-invasivas, ou seja, que não compromete a integridade física do componente ensaiado.

São abordados os métodos de obtenção do estado de tensões de um corpo de provas, gravação e reprodução de um holograma, medição de deslocamentos por interferometria e análise das imagens por computador. Finalmente, apresentam-se os resultados de um ensaio experimental de flexão pelo método proposto, a análise dos resultados, conclusões obtidas e recomendações.

ABSTRACT

The association of optical metrology, interferometry, holography and image processing represents an important contribution for the development of the study of the mechanical behavior of materials, providing the evaluation more precise and faster of fault possibility of structures and mechanical components.

The advantages of the proposed method upon conventional tests are: the measurements are performed under real solicitation conditions; the precision on measuring small tensions and deformations; the method is completely non-destructive, and non-invasive, that is, it does not compromise the physical integrity of the tested component.

The methods of obtaining the state of tensions of a specimen, hologram recording and reconstructing, displacement measurement through interferometry, and computer image analysis are approached. Finally, the results of a flexion experimental test by the proposed method, the analysis of the results, obtained conclusions and recommendations are presented.

ÍNDICE

RESUMO	1
ABSTRACT	2
ÍNDICE	3
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS	6
LISTA DE SÍMBOLOS	6
CAPÍTULO I INTRODUÇÃO	7
1.1. ASPECTOS GERAIS.....	7
1.2. OBJETIVOS DO ESTUDO	8
1.3. ESCOPO DO TRABALHO	9
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS DA HOLOGRAFIA	12
2.1. INTRODUÇÃO.....	12
2.2. GRAVAÇÃO DE UM HOLOGRAMA	13
2.3. REPRODUÇÃO DE UM HOLOGRAMA.....	14
2.4. INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA.....	15
2.5. TÉCNICA DA DUPLA EXPOSIÇÃO	15
2.6. MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS FORA DO PLANO	19
2.7. ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES.....	20
2.8. AVALIAÇÃO VISUAL DOS INTERFEROGRAMAS	22
2.9. AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DOS INTERFEROGRAMAS	24
2.10. ESQUELETIZAÇÃO DE FRANJAS	25
CAPÍTULO III PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	27
3.1. CONCEITOS BÁSICOS.....	27
3.2. PROPRIEDADES MÉTRICAS DAS IMAGENS DIGITAIS	30
3.3. MORFOLOGIA MATEMÁTICA	31
3.3.1. Transformações Morfológicas	32
3.3.2. Dilatação	35
3.3.3. Erosão	36
3.3.4. Abertura e fechamento.....	37
3.4. OUTROS PROCESSAMENTOS TOPOLÓGICOS	38
3.4.1. Transformações homotópicas.....	38

	4
3.4.2. Esqueletização	38
3.4.3. Afinamento e espessamento	39
3.5. FERRAMENTAS MATEMÁTICAS	41
3.5.1. Convolução e correlação	41
3.5.2. Limiarização	43
3.6. TRANSFORMAÇÃO DE IMAGENS	46
3.6.1. Introdução à Transformada de Fourier	46
3.6.2. A transformada discreta de Fourier	47
3.7. REALCE DE IMAGENS	48
3.7.1. Realce de Imagens por modificação de histogramas	48
3.7.2. Suavização de imagens	49
3.7.3. Aguçamento de imagens	49
CAPÍTULO IV SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS	50
4.1. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA	50
4.2. AQUISIÇÃO DOS DADOS	51
4.3. RELACIONAMENTO E GERENCIAMENTO DOS RESULTADOS	53
4.4. FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE IMAGENS	53
4.4.1. Tipos de Imagens	53
4.4.2. Tratamento	54
4.4.3. Identificação	61
4.5. MEDIÇÃO	64
4.6. AUTOMAÇÃO	66
CAPÍTULO V CASO EXEMPLO	67
5.1. INTRODUÇÃO	67
5.2. SISTEMA DE IMAGENS HOLOGRÁFIAS	70
5.3. DESCRIÇÃO DO ARRANJO E CAMINHO ÓPTICO	72
5.4. REGISTRO DOS HOLOGRAMAS	73
5.5. RECONSTRUÇÃO DOS HOLOGRAMAS	74
5.6. ESQUELETIZAÇÃO DAS FRANJAS	75
5.7. MÉTODO DA CORRELAÇÃO	80
CAPÍTULO VI CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	84
6.1. CONCLUSÕES	84
6.2. RECOMENDAÇÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama esquemático mostrando a geometria básica para gravar um holograma	13
Figura 2.2 - Diagrama esquemático mostrando a geometria básica para reproduzir um holograma	14
Figura 2.3 - Formação das franjas em interferometria holográfica	16
Figura 2.4 - Medição holográfica de movimento unidimensional.	19
Figura 2.5 - Simulações computacionais de padrões de interferência.....	21
Figura 2.6 - Foto de holograma a ser analisado visualmente.	22
Figura 2.7 - Análise visual, com marcação dos centros das franjas.	23
Figura 5.1 - Barra engastada, carregamento aplicado, deslocamentos e sistema de eixos.	68
Figura 5.2 - Vista do arranjo e caminho óptico, método da dupla exposição.....	70
Figura 5.3 - Micrômetro utilizado para aplicar deslocamento à barra.	71
Figura 5.4 - Caminho óptico percorrido pelo laser na reconstrução do holograma.	74
Figura 5.5 - Imagem do holograma original.	75
Figura 5.6 - Imagem do holograma após a aplicação dos filtros.....	76
Figura 5.7 - Imagem do holograma após segmentação e realce.....	76
Figura 5.8 - Imagem do holograma após a esqueletização.	77
Figura 5.9 - Imagem final do holograma após a obtenção dos centros das franjas.	77
Figura 5.10 - Gráfico dos deslocamentos obtidos por interpolação das fases.....	79
Figura 5.11 - Gráfico mostrando a distribuição dos deslocamentos sobre a barra.....	80
Figura 5.12 - Amostragem das franjas.....	81
Figura 5.13 - Exemplo de localização dos centros das franjas.	82
Figura 5.14 - Programa de localização dos centros das franjas e o resultado da busca global dos centros das franjas	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Deslocamentos, tensões e deformações obtidos.....	78
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

- λ : comprimento de onda
- θ : ângulo ou fase
- $||$: módulo
- \subset : contém
- \supset : contido
- \cap : interseção
- \cup : união
- \emptyset : conjunto vazio
- $^{\circ}$: conjunto complementar
- \setminus : diferença
- \forall : qualquer
- \in : pertence
- \oplus : dilatação
- \ominus : erosão
- \circ : abertura
- \bullet : fechamento
- \otimes : exclusão
- \oslash : afinamento
- \odot : espessamento
- \int : integral
- Σ : somatório
- $f(x)$: função
- $\mathfrak{F}\{f(x)\}$: Transformada de Fourier de $f(x)$

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. ASPECTOS GERAIS

Atualmente, o processamento e a análise de imagens já desempenham papel importante em diversas áreas da Engenharia. No entanto, no estudo do comportamento mecânico dos materiais, mais precisamente nos ensaios mecânicos, estes recursos computacionais ainda não são utilizados como uma ferramenta que facilita o levantamento e a análise de dados referentes ao comportamento mecânico dos materiais, que são imprescindíveis para que componentes mecânicos e estruturas atendam os requisitos de projeto.

As propriedades mecânicas e a geometria de peças e estruturas, assim como de corpos de prova, caracterizam o comportamento mecânico, sendo que o uso computacional de imagens permite uma agilização dessa caracterização.

A associação do processamento de imagens com a holografia e a interferometria holográfica deverá representar uma contribuição importante para o desenvolvimento do estudo do comportamento mecânico dos materiais. Aspectos como o acompanhamento das deformações longitudinais e transversais em tempo real, com registro de imagem, permitirão uma avaliação mais acurada e rápida da possibilidade de falha de estruturas e componentes mecânicos.

A metrologia óptica surge como solução para os problemas de medição sem contato, especialmente, a utilização da interferência de luz coerente, conhecida

como interferometria, tem sido aplicada amplamente com o advento do laser, sendo a precisão é um dos seus pontos fortes.

Os ensaios têm a finalidade de avaliar os efeitos das tensões e deformações. Para medir estes efeitos, isoladamente das características da superfície do corpo de provas, a interferometria deve ser realizada sobre a diferença entre os estados inicial e final da superfície. Isto é obtida através da holografia, que permite gravar as duas imagens tridimensionais do corpo de provas sobre um mesmo fotolito. O resultado é um holograma que reproduz o efeito da interferometria sobre os dois estados do corpo, medindo apenas as variações entre ambos.

Obtida a imagem holográfica, uma análise deve ser realizada para se medir as tensões e deformações. Analisar a imagem de forma visual apresenta dificuldades, devido à complexidade da imagem, resultante do processo de interferometria. Uma solução para este problema é a utilização do processamento de imagens digitais, permitindo uma análise rápida e precisa.

A associação da metrologia óptica, interferometria, holografia e processamento de imagens representa uma contribuição importante para o desenvolvimento do estudo do comportamento mecânico dos materiais, permitindo a avaliação mais precisa e rápida da possibilidade de falha de estruturas e componentes mecânicos.

1.2. OBJETIVOS DO ESTUDO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de processamento de imagens holográficas que facilite a análise de tensões e do comportamento mecânico. Para tanto, associa a metrologia óptica, interferometria,

holografia e processamento de imagens a fim de fazer uma contribuição para o estudo do comportamento mecânico dos materiais, e que seja:

- Praticável sobre componentes de máquinas e estruturas em condições de solicitação próximas às reais;
- Preciso para determinar pequenas tensões e deformações sobre toda a extensão do componente;
- Não-destrutivo e não-invasivo, ou seja, que não comprometa a integridade física do componente ensaiado.

1.3. ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho tem por finalidade aplicar métodos de tratamento e análise de imagens para avaliação dos objetos representados por estas imagens, quando estes são sujeitos a solicitações mecânicas. Utiliza ferramentas já há muito conhecida pela matemática e computação, visando aplicar estas ferramentas à engenharia, em especial, ao comportamento mecânico dos materiais. Neste ramo específico já há muitas aplicações de imagens sob o ponto de vista da engenharia para propósitos bastante específicos, conhecidos como sistemas especialistas.

O presente trabalho propõe, entretanto, o projeto de um sistema bastante simples e acessível que representa a aplicação dos conceitos desenvolvidos principalmente pelas seguintes disciplinas: Comportamento Mecânico dos Materiais, Metrologia Óptica e Processamento Digital de Imagens. A partir de considerações pertinentes a estas disciplinas, chegou-se a concepção do sistema que é objeto deste trabalho.

Inicialmente, são apresentadas as características e propriedades frutos de pesquisa bibliográfica dos assuntos pertinentes. São introduzidos os conceitos fundamentais da holografia, especialmente, a gravação e reprodução de hologramas, e como a holografia pode ser aplicada na medição de deslocamentos. As suas vantagens em relação aos métodos convencionais também são enfatizadas, as características do sistema e o processamento de imagens são descritos. Em seguida, são estudados o processo de formação das imagens de interferometria, o aspecto das franjas e sua análise por computador.

A parte experimental do trabalho apresenta a realização de um ensaio de flexão por holografia, mostrando o projeto e a implantação de um sistema composto por:

- Dispositivo de fixação e aplicação de esforços sobre um corpo de provas;
- Arranjo para gravação e reprodução de imagens holográficas;
- Equipamento de captura, gravação e processamento de imagens digitais;
- Rotina de análise automatizada das imagens por computador;

Finalmente, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, seguidos das conclusões e recomendações.

A rotina de análise automatizada é um macro-comando criado sobre um programa de computador principal que incorpora as ferramentas mais comuns no processamento e análise de imagens, como por exemplo, filtros, morfologia matemática e operações lógicas e algébricas, que podem ser programados sob a forma de macros, rotinas em linguagem própria ou outras linguagens de programação. Daí sua flexibilidade e agilidade, na medida em que torna

desnecessária toda implementação daquelas ferramentas através de programação, por exemplo, em C ou Pascal, o que foge completamente ao escopo do atual trabalho. Ao mesmo tempo em que dá total liberdade à implementação e consolidação de uma grande variedade de métodos de Tratamento de Sinais Digitais e Mediação de Grandezas Mecânicas de um modo bastante eficiente.

No capítulo II é feita uma apresentação da Holografia como técnica de medição de deslocamentos. O capítulo III introduz o Processamento de Imagens como ferramenta no auxílio do tratamento dos resultados da Holografia tradicional. O funcionamento do Sistema de Processamento de Imagens Holográficas é apresentado no capítulo IV. E analisamos um caso exemplo, no capítulo V, de flexão de uma barra engastada. Finalmente, o capítulo VI traz as conclusões e recomendações pertinentes ao presente trabalho.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DA HOLOGRAFIA

2.1. INTRODUÇÃO

Embora a holografia tenha sido desenvolvida previamente ao laser, a exigência da holografia por uma luz com alto grau de coerência espacial e temporal tem ligado o desenvolvimento da holografia diretamente ao do laser. A holografia é um método para gravar informações de um objeto tridimensional de modo que uma imagem tridimensional possa ser reconstruída subsequente. Este fenômeno é conhecido como reconstrução da frente de onda [1].

A seguir, apresenta-se o método de gravação de um holograma simples, ou seja, a gravação de uma única imagem tridimensional. Depois, mostra-se como é realizada a reprodução de um holograma previamente gravado pelo método anterior. Posteriormente, apresenta-se a interferometria holográfica como forma de medição de deslocamentos. Finalmente, introduz-se o método da dupla exposição, que combina duas gravações de imagens holográficas de um mesmo objeto, com o objetivo de promover a interferometria entre as duas imagens e medir os deslocamentos entre as duas situações do objeto, representadas por estas imagens.

2.2. GRAVAÇÃO DE UM HOLOGRAMA

Um filme fotolítico é exposto simultaneamente às ondas de luz dispersas pelo objeto e às ondas de luz de uma fonte de referência. O raio de luz de referência, mostrado na Figura 2.1 como um raio de luz plano paralelo, pode ser de qualquer forma reproduzível e é derivado da mesma fonte de laser da luz que ilumina o objeto. Devido ao alto grau de coerência mútua, os dois conjuntos de ondas produzem um padrão de interferência sobre o filme, que é gravado em uma emulsão fotográfica e forma um holograma [1].

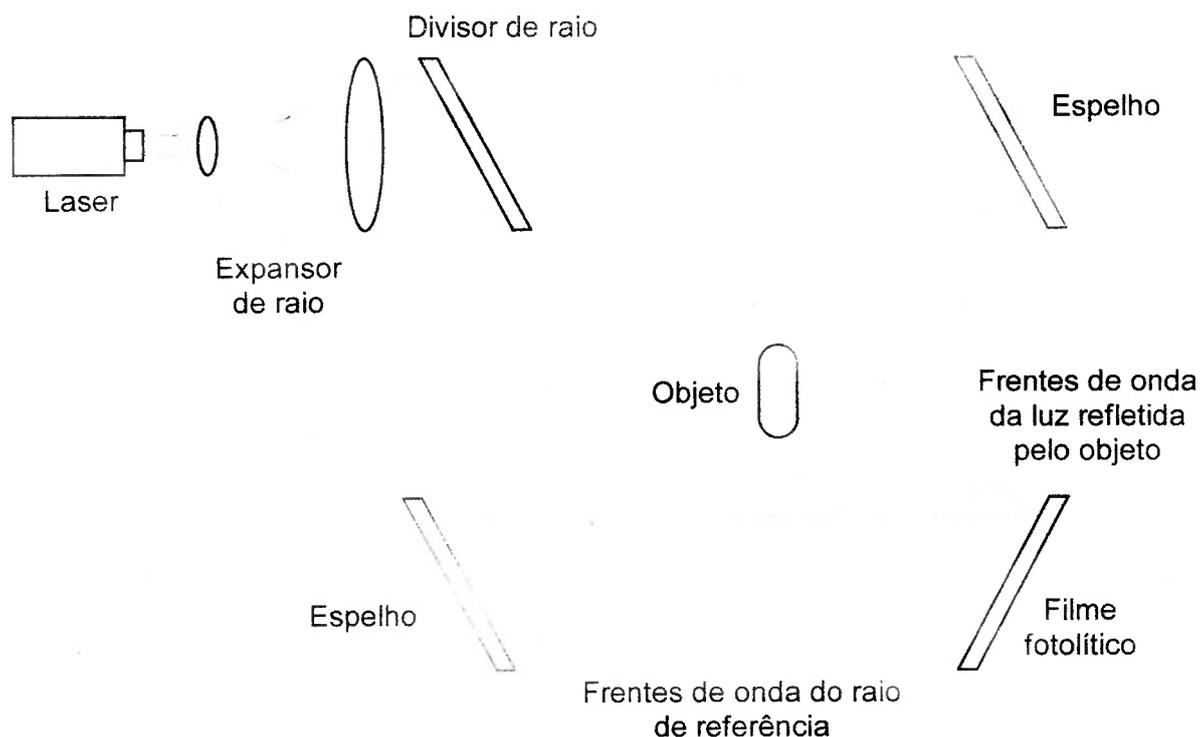


Figura 2.1 - Diagrama esquemático mostrando a geometria básica para gravar um holograma

2.3. REPRODUÇÃO DE UM HOLOGRAMA

O filme fotolítico é agora processado e iluminado apenas com o raio de luz de referência como mostrado na Figura 2.2. A maior parte da luz proveniente do raio de luz passa diretamente através do holograma; uma parte daquele é, entretanto, difratado pelo padrão de interferência da emulsão. Assim, a interferência construtiva destas ondas difratadas reconstrói as frentes de onda originais do objeto, de forma que, para um observador, as frentes de onda aparentam vir do próprio objeto. Estas frentes de onda constituem o termo imagem virtual. Entretanto, assim como uma rede de difração produz ordens de difração em ambos os lados da posição direta, o holograma gera uma segunda imagem, que é usualmente inferior em qualidade quando comparada a imagem virtual, a qual é chamada de imagem real [1].

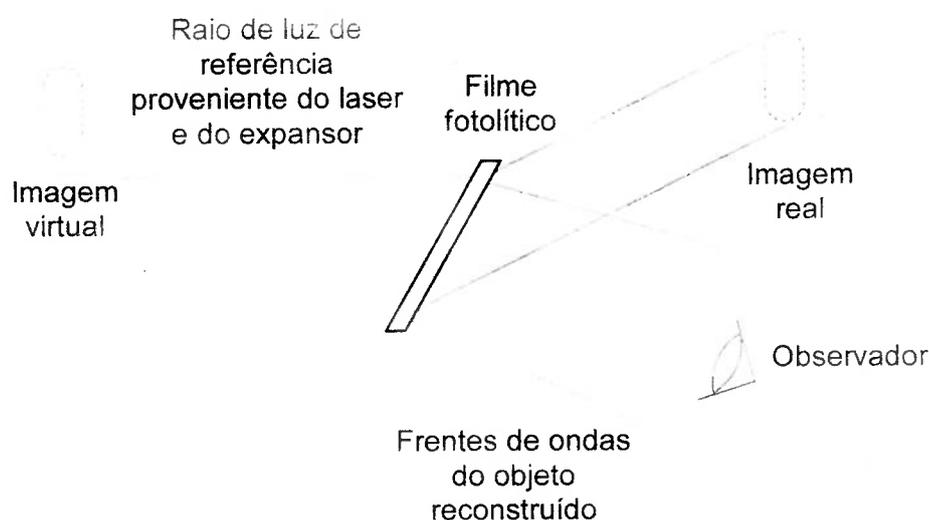


Figura 2.2 - Diagrama esquemático mostrando a geometria básica para reproduzir um holograma

2.4. INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA

A idéia básica na interferometria holográfica é que uma imagem formada em holografia é tão precisa que pode ser comparada interferometricamente ao objeto ou outra imagem holográfica do objeto. Se o objeto é perturbado por tensão, vibração ou calor, por até mesmo uma quantidade muito pequena, então o padrão das franjas de interferência será observada na imagem. Contando-se as franjas, pode-se determinar a quantidade de deslocamento do objeto. A resolução da medição está na ordem do comprimento de onda da luz: menos do que um milionésimo de metro.

2.5. TÉCNICA DA DUPLA EXPOSIÇÃO

Consiste em se gravar dois hologramas sobre o mesmo fotolito, um holograma do objeto em sua forma original, e outro do objeto em sua forma perturbada. Um observador verá então as duas imagens virtuais holográficas superpostas, de forma a produzir franjas de interferência.

Como ilustração desta idéia, a Figura 2.3 mostra como as franjas são formadas em um caso simples, [2].

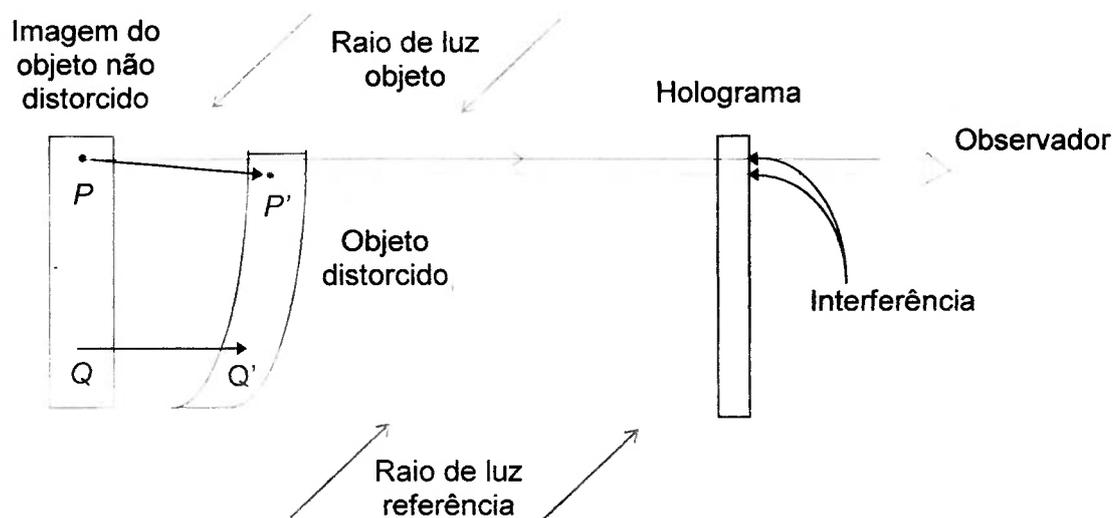


Figura 2.3 - Formação das franjas em interferometria holográfica

A formação das franjas pelos dois raios de luz do objeto pode ser prevista para o método da dupla exposição. Uma exposição para o estado original do objeto é gravada e reconstruída. Sua amplitude complexa é dada por [2]:

$$U_o = K_1 A(x,y) e^{i\phi(x,y)} \quad (2.1)$$

onde:

U_o é a amplitude complexa do raio objeto original;

K_1 é a constante de proporcionalidade;

$A(x,y)$ é intensidade do raio objeto original;

$\phi(x,y)$ é fase do raio objeto original.

A amplitude complexa para o objeto em seu estado deslocado tem a mesma forma, exceto para a mudança de fase resultante do deslocamento e uma constante multiplicativa diferente. Novamente, imagens de distribuição de amplitude não mudam apreciavelmente por causa dos pequenos deslocamentos envolvidos. A nova onda objeto conforme é recebida no filme de holograma é:

$$U_{OR} = K_2 A(x, y) e^{i[\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)]} \quad (2.2)$$

onde:

U_{OR} é a amplitude complexa do raio objeto deslocado;

K_2 é a constante de proporcionalidade;

$A(x, y)$ é intensidade do raio objeto original;

$\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)$ é fase do raio objeto deslocado.

O observador no plano de observação receberá a soma destes dois raios de luz. Para conveniência, assume-se que as amplitudes da onda de reconstrução e da onda objeto foram balanceadas com a eficiência de transmissão e difração do holograma de modo que as duas constantes K_1 e K_2 são iguais. No laboratório, esta medição é prática, que resulta no máximo de visibilidade da franja. Um divisor de raio de luz variável ou filtro de atenuação é ajustado para proporcionar às franjas maior visibilidade, e esta hipótese é satisfeita.

A soma das amplitudes complexas é dado por [2]:

$$U_S = U_O + U_{OR} = KA(x, y)e^{i\phi(x, y)}[1 + e^{i\Delta\phi(x, y)}] \quad (2.3)$$

onde:

U_S é a soma das amplitudes complexas.

E a irradiação é calculada normalmente, com o resultado:

$$I_S = U_S U_S^* = K^2 A^2(x, y)[2 + e^{i\Delta\phi(x, y)} + e^{-i\Delta\phi(x, y)}] \quad (2.4)$$

$$I_S = 2K^2 A^2(x, y)[1 + \cos[\Delta\phi(x, y)]] \quad (2.5)$$

onde:

I_S é irradiação.

A função da amplitude, para o objeto iluminado, é modulado por uma série de franjas. As bandas escuras definem o lugar dos pontos para os quais

$$1 + \cos[\Delta\phi(x, y)] = 0 \quad \Delta\phi = n\pi, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (2.6)$$

2.6. MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS FORA DO PLANO

Como uma introdução ao uso quantitativo da interferometria holográfica, é considerado um caso especial, mas de grande utilidade. Seja um objeto que é deslocado em uma única direção e uma configuração de arranjo óptico de modo que o deslocamento é ao longo da linha que parte do objeto para o holograma. O raio de luz que ilumina o objeto está também próximo da mesma direção. A Figura 2.4 ilustra este arranjo, [2].

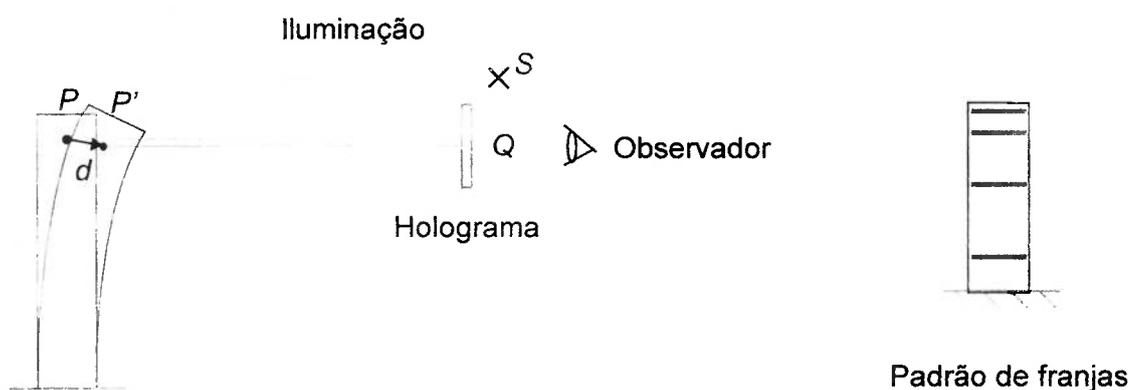


Figura 2.4 - Medição holográfica de movimento unidimensional.

Para a primeira posição do ponto P do objeto, o caminho transversal é SPQ . Para a segunda posição do ponto é $SP'Q$. A subtração fornece a diferença de comprimento de caminho óptico que é $2d$. O observador verá um padrão de franjas na imagem como se os dois raios de luz interferissem ao longo do caminho comum. A ordem das franjas mudará para um incremento entre pontos que produzem a mudança de fase de 2π ou um comprimento de onda da luz. Se a franja clara pode ser estabelecida em um ponto, então as franjas podem ser assinaladas em n ordens

partindo deste ponto. A relação entre a ordem da franja e o deslocamento para este caso é dado por:

$$d = \frac{n\lambda}{2} \quad (2.7)$$

onde n é um inteiro.

2.7. ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES

A interferometria holográfica provou ser uma poderosa ferramenta para a medição de deslocamentos e testes não destrutivos [3]. Os deslocamentos de uma superfície são medidos com uma incerteza equivalente ao comprimento de onda da luz do laser utilizado. Considerando um corpo submetido a um carregamento externo, o conhecimento dos deslocamentos dos diversos pontos da superfície do corpo permite o cálculo dos campos de deformações e tensões nesse corpo. As principais vantagens deste método são [3]:

- As medições são realizadas sem contato e não são invasivas;
- As medidas são obtidas continuamente sobre toda a superfície do corpo;
- O formato da superfície do corpo avaliado pode ser complexo;
- O método de medição dos deslocamentos independe das propriedades do material;

A avaliação dos deslocamentos é feita através de interpretação dos interferogramas, sendo que as medições são realizadas pela contagem das franjas.

A Figura 2.5 apresenta os padrões de interferência devidos aos deslocamentos que ocorrem em alguns corpos submetidos a diferentes carregamentos externos [3].

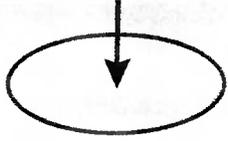
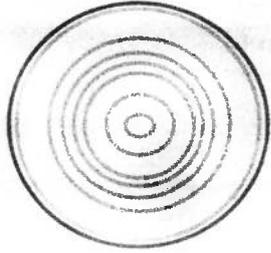
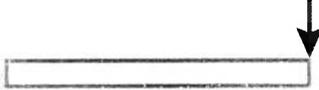
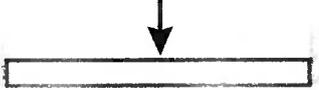
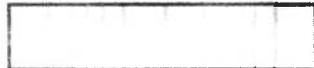
Tipo de solicitação	Padrão das franjas
 <p data-bbox="596 779 743 808">Carga central</p>	
 <p data-bbox="523 1021 791 1050">Flexão (viga em balanço)</p>	
 <p data-bbox="528 1245 786 1301">Flexão (viga engastada em ambos os extremos)</p>	
Tipo de solicitação	Padrão das franjas
 <p data-bbox="592 1570 751 1599">Rotação plana</p>	
 <p data-bbox="624 1816 703 1845">Torção</p>	

Figura 2.5 - Simulações computacionais de padrões de interferência.

2.8. AVALIAÇÃO VISUAL DOS INTERFEROGRAMAS

A avaliação visual é realizada sobre as franjas de interferometria nos hologramas obtidos em filmes fotográficos. Para tanto, adota-se um procedimento que divide o holograma em linhas igualmente espaçadas. Sobre cada linha marcam-se as posições dos centros das franjas identificadas pelo observador, finalmente, são medidas as coordenadas de cada ponto marcado.

A Figura 2.6 ilustra uma fotografia de um holograma, reproduzido após uma gravação de dupla exposição, contendo as informações das franjas de interferência.

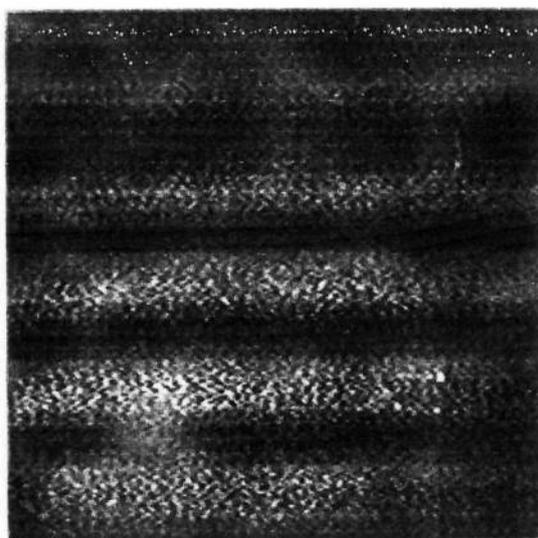


Figura 2.6 - Foto de holograma a ser analisado visualmente.

Sobre o holograma, são traçadas as linhas auxiliares, mostradas na Figura 2.7 como linhas verticais. Sobre estas linhas auxiliares, são marcados os pontos encontrados, as cruzes, que são os centros das franjas observados, os dados são então extraídos das coordenadas destes pontos.

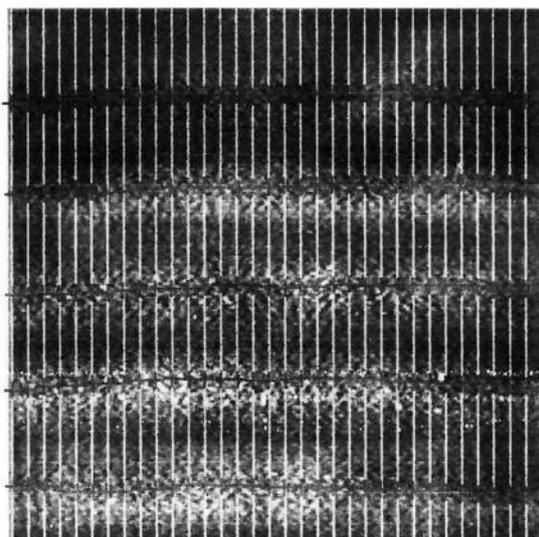


Figura 2.7 - Análise visual, com marcação dos centros das franjas.

O processo de localização dos centros das franjas é notadamente demorado quanto realizado pela interpretação visual, dependendo da precisão desejada das medições. Além disso, está sujeita a erros de medição frutos da subjetividade da visão humana, especialmente nos casos em que os níveis de ruído presentes na imagem são significativos, introduzindo dificuldades e fontes de erro na localização dos centros.

2.9. AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DOS INTERFEROGRAMAS

É importante salientar que os desenvolvimentos atuais de medição por imagens ocorreram no sentido de permitir uma análise mais rápida, chegando virtualmente ao tempo real, ao mesmo tempo em que eliminam a subjetividade e os erros que seriam introduzidos pela análise visual.

Simulações computacionais de padrões de interferência ideais, como já mostrados na Figura 2.5, auxiliaram a encontrar o melhor arranjo para otimizar o carregamento, desenvolver métodos de avaliação melhores e interpretar os interferogramas registrados [3].

O principal objetivo da tarefa de análise das franjas auxiliada por computador reside na determinação da distribuição da fase de interferência. Depois de se registrar o interferograma holográfico, ou múltiplos interferogramas, as distribuições de intensidade são digitalizadas e quantificadas antes de serem armazenadas na memória do computador. A intensidade armazenada é da seguinte forma [3]:

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[\Delta\phi(x,y)] \quad (2.8)$$

onde:

$I(x,y)$ é intensidade luminosa do pixel

$a(x,y)$ é iluminação de fundo da imagem

$b(x,y)$ é amplitude de modulação das franjas

(x,y) são as coordenadas dos pixels.

2.10. ESQUELETIZAÇÃO DE FRANJAS

Assume-se que o máximo local da distribuição de intensidade corresponde ao máximo da função co-seno. Neste caso, a fase de interferência nos pixels, onde a intensidade máxima ou mínima é detectada, é um múltiplo inteiro par ou ímpar de π .

Um esquema geral do processo para a esqueletização por segmentação consiste dos seguintes passos [3]:

- a. Melhoria dos níveis de ruído do sinal no padrão de interferência por meio de uma filtragem espacial e temporal;
- b. Segmentação da intensidade em máxima, mínima e inclinação por limiarização adaptativa, operadores de gradiente ou aproximação de pequenos elementos através de funções elementares;
- c. Realce de regiões e eliminação de pontos isolados;
- d. Produção do esqueleto das franjas pelo afinamento de regiões para estruturas de linhas;
- e. Realce do esqueleto pela união de linhas interrompidas, pela adição de pontos omitidos e pela remoção de artefatos, cruzamento de linhas e interconexões. Esta etapa pode ser realizada interativamente;
- f. Numeração das franjas pela inclusão de números de ordem de interferência. Linhas vizinhas indicativas de máximos de franjas adjacentes podem diferir apenas por +1, 0 ou -1, se for assumida uma distribuição de fase de interferência contínua;

- g. Interpolação da distribuição de fase de interferência entre as linhas do esqueleto. Isto pode ser realizado por funções lineares ou bilineares, por funções “spline”, polinômios de Bezier ou outros;
- h. O cálculo dos valores a serem medidos a partir da distribuição da fase de interferência.

CAPÍTULO III

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

3.1. CONCEITOS BÁSICOS

Imagem é uma figura, fotografia, ou outra forma de representação visual de um objeto ou cena. Entretanto, no processamento digital de imagens, há um outro significado: uma imagem é uma matriz bidimensional de números. A Figura 3.1 mostra uma imagem digital, onde (a) é uma imagem de um padrão geométrico simples e (b) é a imagem digital correspondente.

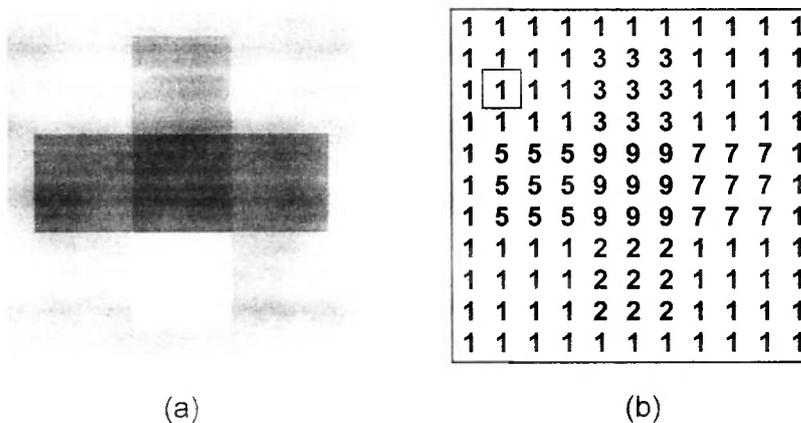


Figura 3.1 - Uma imagem digital simples: (a) A imagem e (b) A correspondente matriz de números.

A imagem digital possui onze linhas e onze amostras por linha. Cada número em (b) corresponde a uma pequena área da imagem visual e o número fornece o nível de escuridão ou brilho desta área. Assume-se que quanto maior for o número,

mais brilhante a área, assim zero é preto, o máximo valor é branco e valores intermediários são tons de cinza.

Cada pequena área é chamada **pixel**, que é o menor elemento da imagem. O tamanho da área física representada pelo pixel é chamado resolução espacial do pixel. Isto varia grandemente, desde uns poucos nanômetros em uma imagem de microscópio a dezenas de quilômetros em imagem de satélites. Cada pixel possui um valor, mais uma coordenada de linha e uma coordenada de amostra. Isto fornece a sua localização no vetor de imagem. Por exemplo, o pixel na linha 3, amostra 2 (que possui um quadro em volta) tem valor 1 [4].

Assume-se sempre que as imagens são matrizes retangulares, ou seja, que há n_l linhas na imagem e n_s amostras em cada linha. Frequentemente, as imagens são quadradas e de tamanhos típicos de imagens 256x256, 512x512 e 1024x1024.

O mínimo valor que um pixel pode ter é tipicamente zero e o máximo depende de como o número é armazenado no computador. Diferentes formatos permitem diferentes máximos. Uma maneira é armazenar cada pixel como um único bit, o que significa que este pode apresentar apenas os valores zero ou um. Outra maneira é armazenar o pixel como um byte, que consistem em oito bits. Desta forma, o valor máximo do pixel é 255. Outros formatos são possíveis e variam um tanto dependendo da arquitetura do computador. Exemplos são inteiros, 16 bits por pixel, ou ponto flutuante, geralmente 32 bits por pixel. Isto permite maiores precisões e faixas de valores de pixel, mas requerem, respectivamente, duas a quatro vezes mais memória do computador para armazenar a imagem. No formato de byte, o valor do pixel pode ser apenas inteiro. Quando cálculos que são realizados sobre os valores dos pixels requerem precisão fracionária, assume-se um passo final de arredondamento ou truncagem.

Quando se exibe uma imagem digital, por exemplo, em um tubo de raios catódicos (CRT), ou seja, um tipo de dispositivo de TV, ou como uma fotografia no segmento de filme, cada pixel controla a intensidade de brilho de um pequeno ponto. Um tamanho típico de ponto é $\frac{1}{4}$ mm para monitores de CRT e podem ser menores em dispositivos de impressão. Nessas escalas, o reticulado da imagem normalmente não é notado.

Uma cena pode possuir várias imagens associadas. Por exemplo, quando se lida com cores, pode-se ter imagens a partir de três componentes: vermelho, verde e azul. As imagens são coletivamente referidas como “a imagem”, as imagens individuais como “**bandas**” da imagem e pode-se dizer, por exemplo, a banda vermelha de uma imagem. Na maioria dos casos, as bandas são consideradas alinhadas de modo a se sobreporem e poderem, por exemplo, ser exibidas nas três cores de uma tela de monitor colorido sem mudança ou deslocamento entre si.

Histograma da imagem. Frequentemente, deseja-se obter alguma medida da distribuição dos valores dos pixels de uma imagem. Pode-se utilizar a média \bar{v} e o desvio padrão σ [4]:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i,j} v(i, j) \quad (3.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i,j} (v(i, j) - \bar{v})^2} \quad (3.2)$$

onde n é o número de pixels da imagem.

Além disso, um das medidas mais comuns de valores de pixel em uma imagem é uma tabela que fornece o número de pixels que possui um determinado valor v . Esta tabela, que é freqüentemente dada por meio de um gráfico, é chamada de histograma da imagem e denota-se por $h(v)$ [4].

3.2. PROPRIEDADES MÉTRICAS DAS IMAGENS DIGITAIS

Uma imagem digital consiste de elementos de figura com tamanhos finitos. Algumas propriedades claramente intuitivas das imagens contínuas não apresentam uma analogia direta no domínio das imagens digitais. A **distância** é um exemplo importante. A distância entre dois pixels em uma imagem digital é uma medida quantitativa significativa.

A distância entre pontos de coordenadas (i,j) e (h,k) pode ser definida de várias maneiras diferentes; a **distância euclidiana** D_E conhecida da geometria clássica e da experiência cotidiana é definida por [4]:

$$D_E((i,j),(h,k)) = \sqrt{(i-h)^2 + (j-k)^2} \quad (3.3)$$

A vantagem da distância euclidiana é o fato de ser intuitivamente óbvia. As desvantagens são os cálculos custosos devido à raiz quadrada e seu valor não inteiro.

A distância entre dois pontos pode ser também expressa como um mínimo número elementar de passos em uma grade digital que são necessários para se mover do ponto inicial ao ponto final. Se apenas movimentos verticais ou horizontais são permitidos, a distância D_4 é obtida, por:

$$D_4((i, j)(i, j)) = |i - h| + |j - k| \quad (3.4)$$

Caso movimentos na diagonal sejam permitidos na grade de digitalização, obtém-se a distância D_8 , dada por:

$$D_8((i, j)(i, j)) = \max\{|i - h|, |j - k|\} \quad (3.5)$$

3.3. MORFOLOGIA MATEMÁTICA

A morfologia matemática, que começou a se desenvolver nos anos 60, permanece como uma parte relativamente distinta da análise de imagens [5].

A abordagem não morfológica do processamento de imagens está próxima do cálculo, baseado no conceito de função de espalhamento de ponto e transformações lineares, tais como a convolução. A morfologia matemática está baseada na geometria e na forma; os operadores morfológicos simplificam a imagem e preservam as principais características de forma dos objetos.

Transformações morfológicas, quando usadas, normalmente constituem uma parte intermediária da seqüência de processamento da imagem. Na primeira fase, a imagem é digitalizada e pré-processada, usando-se operadores locais de convolução, e segmentada para se obter uma imagem binária com os objetos

separados do segundo plano. Os operadores morfológicos podem constituir a segunda fase que opera na forma destes objetos. O último passo do processamento avalia os resultados da morfologia usando diferentes descrições numéricas ou abordagens sintáticas.

Os operadores morfológicos são predominantemente usados para os seguintes propósitos [5]:

- a. Pré-processamento de imagens (filtragem de ruídos, simplificação de forma);
- b. Melhoramento da estrutura do objeto (esqueletização, afinamento, espessamento, invólucro convexo, marcação de objetos);
- c. Descrição quantitativa de objetos (área, perímetro, projeções, características de Euler-Poincaré).

3.3.1. Transformações Morfológicas

A morfologia matemática explora as propriedades de um conjunto de pontos, resultados de geometria e topologia integrais. Uma hipótese inicial afirma que imagens reais podem ser modeladas usando-se conjuntos de pontos de qualquer dimensão; o espaço 2D euclidiano E^2 e seu sistema de subconjuntos são um domínio para descrição de formas no plano. Os conceitos de inclusão (\subset ou \supset), interseção (\cap), união (\cup), o conjunto vazio (\emptyset), o conjunto complementar (c) e a diferença (\setminus) são assumidos.

Consideram-se imagens binárias que podem ser vistas como subconjuntos do espaço 2d de todos os inteiros. Um ponto é representado por um par de inteiros que

dão as coordenadas com respeito aos dois eixos coordenados da grade digital; a unidade de comprimento da grade é igual ao período de amostragem em cada direção. Esta representação é adequada para grades tanto retangulares quanto hexagonais, porém serão assumidas grades retangulares daqui a diante.

Uma imagem binária pode ser tratada como um conjunto 2d de pontos. Os pontos que pertencem aos objetos na imagem representam um conjunto X — estes pontos são pixels com valores iguais a um. Pontos do conjunto complementar X^c correspondem ao segundo plano com valores iguais a zero. A origem (marcada como uma cruz diagonal nos exemplos) possui coordenadas (0,0) e as coordenadas de qualquer ponto são interpretadas como (*linha*, *coluna*).

A Figura 3.2 mostra um exemplo de conjunto assim — os pontos pertencentes ao objeto são denotados por pequenos quadrados. Qualquer ponto x de uma imagem discreta X pode ser tratado como um vetor com respeito a origem (0,0).

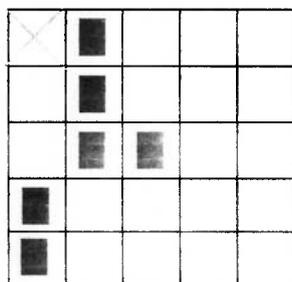


Figura 3.2 - Um exemplo de conjunto de pontos

Uma transformação morfológica ϕ é dada por uma relação de uma imagem com outro pequeno conjunto de pontos B , chamado **elemento estrutural**. B é expresso com respeito a uma origem local O (chamado ponto representativo).

Alguns elementos estruturais típicos são mostrados na Figura 3.3, nos quais o ponto representativo está marcado por uma cruz.

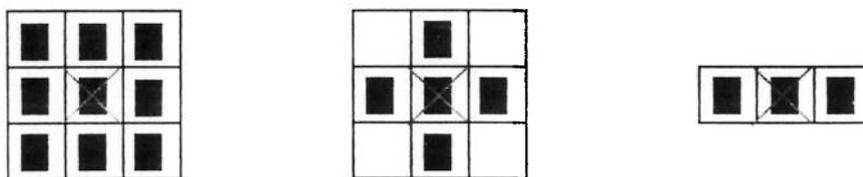


Figura 3.3 - Um exemplo de conjunto de pontos

A transformação morfológica $\phi(X)$ aplicada à imagem X significa que o elemento estrutural B é movido ao longo de toda a imagem. Assume-se que B é posicionado em algum ponto da imagem; o pixel na imagem corresponde ao ponto representativo O do elemento estrutural é chamado pixel corrente. O resultado da relação (que pode ser tanto zero quanto um) entre a imagem X e o elemento estrutural B na posição corrente é armazenada no pixel corrente da imagem.

A translação de um conjunto de pontos X por um vetor h é denotado por X_h e é definido por [5]:

$$X_h = \{d \in E^2 : d = x + h, \forall x \in X\} \quad (3.6)$$

Isto é ilustrado na Figura 3.4.

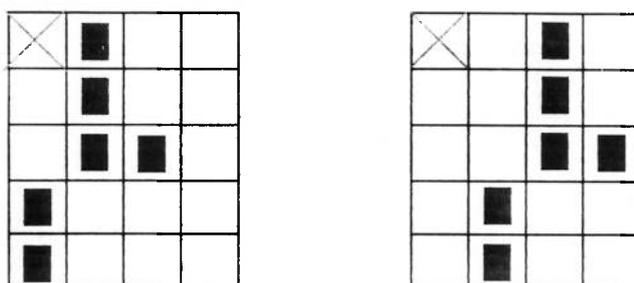


Figura 3.4 - Translação por um vetor

É apropriado restringir o conjunto de transformações morfológicas possíveis na análise de imagens pela imposição de várias restrições. O menor conjunto de transformações morfológicas quantitativas assim obtidas são: a dilatação, a erosão, abertura e fechamento.

3.3.2. Dilatação

A transformação morfológica **dilatação** \oplus combina dois conjuntos usando a adição vetorial. A dilatação $X \oplus B$ é o conjunto de pontos de todas as possíveis adições vetoriais de pares de elementos, um de cada um dos conjuntos X e B [5]:

$$X \oplus B = \{d \in E^2 : d = x + b, \forall x \in X, \forall b \in B\} \quad (3.7)$$

A Figura 3.5 ilustra um exemplo de dilatação.

$$X = \{(0,1), (1,1), (2,1), (2,2), (3,0), (4,0)\}$$

$$B = \{(0,0), (0,1)\}$$

$$X \oplus B = \{(0,1), (1,1), (2,1), (2,2), (3,0), (4,0), (0,2), (1,2), (2,2), (2,3), (3,1), (4,1)\}$$

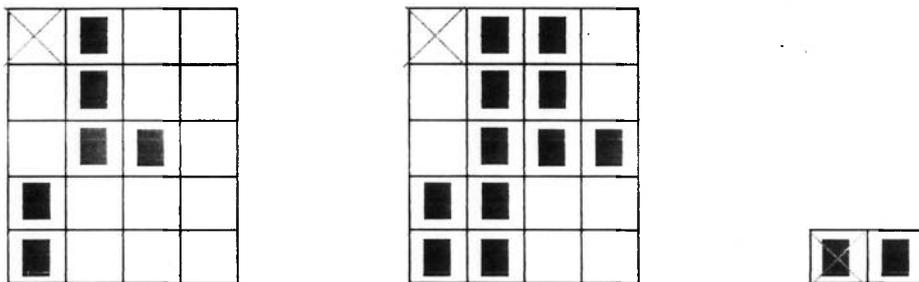


Figura 3.5 - Dilatação

3.3.3. Erosão

A **erosão** \ominus combina dois conjuntos usando a subtração vetorial e constitui a dual da dilatação. Tanto a erosão quanto a dilatação são transformações irreversíveis [5].

$$X \ominus B = \{d \in E^2 : d + b \in X, \forall b \in B\} \quad (3.7)$$

A Figura 3.6 ilustra um exemplo de um conjunto de pontos X erodido pelo elemento estrutural B .

$$X = \{(0,1), (1,1), (2,1), (3,0), (3,1), (3,2), (3,3), (4,1)\}$$

$$B = \{(0,0), (0,1)\}$$

$$X \ominus B = \{(3,0), (3,1), (3,2)\}$$

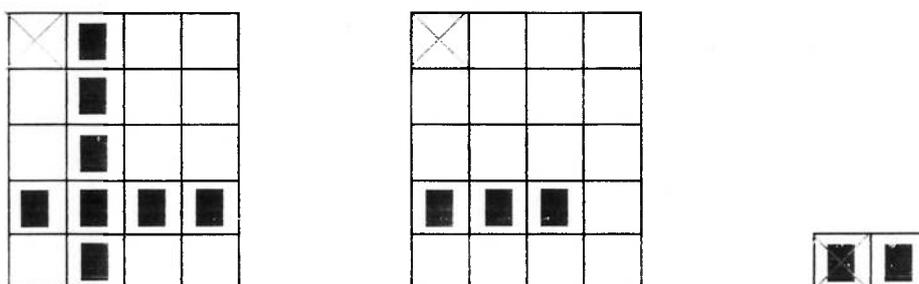


Figura 3.6 - Erosão

3.3.4. Abertura e fechamento

A erosão e a dilatação são transformações irreversíveis. A erosão seguida de dilatação cria uma importante transformação chamada **abertura**. A abertura de uma imagem X por um elemento estrutural B é denotada por $X \circ B$ e é definida como:

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B \quad (3.9)$$

A dilatação seguida de erosão é chamada **fechamento**. O fechamento de uma imagem X , por um elemento estrutural B é denotada $X \bullet B$ e é definida como

$$X \bullet B = (X \oplus B) \ominus B \quad (3.10)$$

3.4. OUTROS PROCESSAMENTOS TOPOLÓGICOS

3.4.1. Transformações homotópicas

As propriedades topológicas são associadas à continuidade e a morfologia matemática pode ser utilizada para se estudar tais propriedades dos objetos nas imagens. Há um grupo interessante entre as transformações morfológicas chamadas **transformações homotópicas** [5].

Uma transformação é homotópica se não modifica a relação de continuidade entre regiões e orifícios na imagem. Esta relação é expressa por uma árvore homotópica; sua raiz corresponde ao segundo plano da imagem, os troncos do primeiro nível correspondem aos objetos (regiões), e os troncos do segundo nível indicam aos orifícios dentro dos objetos etc. Uma transformação homotópica não altera a árvore homotópica.

3.4.2. Esqueletização

Às vezes é vantajoso converter um objeto em uma espécie de figura formada por linhas chamada **esqueleto**. Pode-se dizer, de maneira informal, que o esqueleto

$S(Y)$ de um conjunto Y é a união dos centros x dos círculos $D(x)$ inscritos em Y que tocam seus contornos em pelo menos dois pontos distintos [5].

Será visto a seguir que o esqueleto é freqüentemente substituído por uma seqüência de afinamentos homotópicos que não apresenta as propriedades mencionadas anteriormente. Por outro lado, a computação do esqueleto homotópico substituto é mais lento (tipicamente dez vezes) do que a computação do esqueleto a partir da definição acima.

3.4.3. Afinamento e espessamento

As operações descritas até aqui utilizavam um elemento estrutural B e testavam-se pontos quanto a sua ocorrência em X ; pode-se também testar se alguns pontos não pertencem a X . Uma operação pode ser denotada por um par de conjuntos disjuntos $B=(B_1, B_2)$, chamado **elemento estrutural composto**.

A transformação inclusão ou exclusão \otimes é definida como [5]:

$$X \otimes B = \{x: B_1 \subset X \text{ e } B_2 \subset X^c\} \quad (3.11)$$

Isto significa que para um ponto x estar no conjunto resultante, as duas condições devem ser satisfeitas simultaneamente. A transformação inclusão ou exclusão opera como uma comparação binária entre a imagem X e o elemento estrutural (B_1, B_2) . Pode ser expressa também em termos de erosões e dilatações:

$$X \otimes B = (X \ominus B) \mid (X \oplus B) \quad (3.12)$$

Uma aplicação da transformação inclusão ou exclusão é o afinamento e o espessamento de conjuntos de pontos. Para uma imagem X e um elemento estrutural composto $B=(B_1, B_2)$, o **afinamento** é definido como

$$X \ominus B = X \setminus (X \otimes B) \quad (3.13)$$

E o **espessamento** é definido como:

$$X \odot B = X \cup (X \otimes B) \quad (3.14)$$

O afinamento e o espessamento são muito freqüentemente utilizados seqüencialmente. Neste caso, $\{B_{(i)}\}$ denotam a seqüência de elementos estruturais compostos $B_{(i)} = (B_{i1}, B_{i2})$.

O **afinamento seqüencial** pode ser expresso como

$$X \ominus \{B_{(i)}\} = X \ominus \bigcap_{j=1}^i B_{(j)} \quad (3.15)$$

e o **espessamento seqüencial** como:

$$X \odot \{B_{(i)}\} = X \odot \bigcup_{j=1}^i B_{(j)} \quad (3.16)$$

O afinamento seqüencial é muito importante, pois serve como substituto homotópico do esqueleto; a imagem final consiste unicamente de linhas de espessura unitária e pontos isolados.

3.5. FERRAMENTAS MATEMÁTICAS

3.5.1. Convolução e correlação

Uma forma integral padrão, chamada integral de convolução, surge em várias áreas de análise, incluindo o processamento de imagens. A integral é da forma [6]:

$$\int f(t)h(x-t)dt \quad (3.17)$$

e é denotada por $f * h$. Uma integral similar surge quando se calcula o coeficiente de correlação entre duas funções. Esta é dada por

$$\int f(t)h(t)dt \quad (3.18)$$

Freqüentemente se deseja encontrar o ponto para o qual a função h deve ser deslocada para produzir a melhor correlação com f . Este é dado pelo valor de x que maximiza:

$$\int f(t)h(t-x)dt \quad (3.19)$$

o que é similar a integral de convolução, mas com h refletido. Se h é simétrico, $h(x)=h(-x)$, e as operações são idênticas.

No caso digital, as integrais tornam-se somatórios:

$$\sum_i f(i)h(m-i) \quad (3.20)$$

e

$$\sum_i f(i)h(i-m) \quad (3.21)$$

Para a convolução e correlação respectivamente, há apenas um valor de convolução e correlação para cada valor de m . O processamento de Imagens normalmente usa as duas representações bidimensionais:

$$\sum_i \sum_j f(i,j)h(m-i,n-j) \quad (3.22)$$

e

$$\sum_i \sum_j f(i,j)h(i-m,j-n) \quad (3.23)$$

Para a maioria dos casos, considera-se a convolução da função h com a função f , h é simétrica (ou antimétrica) e devido à natureza dos cálculos, pode-se ignorar a reflexão de h na integral ou somatório. Assim, a convolução e correlação parecem idênticas. Entretanto, nesta abordagem, há duas diferenças. Primeiro, quando se fala em convolução, está-se interessado na saída completa da função (ou imagem) dada por:

$$g(m,n) = \sum_i \sum_j f(i,j)h(m-i,n-j) = \sum_i \sum_j f(i,j)h(i-m,j-n) \quad (4.24)$$

(A segunda equação é válida apenas para h simétrico.) Quando se fala de correlação, está-se geralmente interessado nos valores de m e n dados pelo máximo do somatório. Segundo, quando se calcula as convoluções, utilizam-se os valores como calculados diretamente pelo somatório acima, mas para as correlações, geralmente normaliza-se f e h de maneira que os resultados fiquem no intervalo (-1, 1).

3.5.2. Limiarização

A limiarização de tons de cinza é o processo de segmentação mais simples. Isto se deve ao fato de que muitos objetos ou regiões das imagens são caracterizados por constantes refletividade ou absorção de luz em suas superfícies. Uma intensidade constante de brilho ou limiar pode ser determinada para segmentar objetos e o segundo plano. O limiar é computacionalmente barato e rápido — é o método mais antigo de segmentação e ainda amplamente utilizado em aplicações

simples. A limiarização pode ser realizada em tempo real com o uso de um hardware especializado.

Uma segmentação completa pode resultar da limiarização em cenas simples. Definem-se a seguir alguns termos básicos. Uma segmentação completa de uma imagem R é um conjunto finito de regiões R_1, \dots, R_s . [7]

$$R = \bigcup_{i=1}^s R_i \quad (3.25)$$

$$R_i \cap R_j = \emptyset \quad (3.26)$$

$$i \neq j \quad (3.27)$$

O limiar é a transformação digital de uma imagem de entrada f para uma imagem binária de saída (segmentada) g como se segue:

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{para } f(i, j) \geq T \\ 0 & \text{para } f(i, j) < T \end{cases} \quad (3.28)$$

onde T é o limiar, $g(i, j)=1$ para os elementos objetos e $g(i, j)=0$ para os elementos de segundo plano da imagem (ou vice versa).

Se cada um dos objetos não toca os outros objetos da imagem e o seu nível de cinza é claramente distinto dos tons do segundo plano, a limiarização é o método de segmentação mais adequado.

A seleção correta do limiar é crucial para o processo de segmentação; esta seleção pode ser determinada interativamente ou pode ser o resultado de algum método de detecção de limiar que serão discutidos posteriormente.

Uma outra possibilidade de limiarização é segmentar a imagem em regiões de pixels com os níveis de cinza de um conjunto D e em segundo plano, no caso contrário.

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{para } f(i, j) \in D \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3.29)$$

Há algumas modificações no caso da utilização de múltiplos limiares, depois do qual a imagem resultante não é mais binária, porém, mais precisamente, uma imagem constituída de um número bastante limitado de níveis de cinza.

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{para } f(i, j) \in D_1 \\ 2 & \text{para } f(i, j) \in D_2 \\ 3 & \text{para } f(i, j) \in D_3 \\ \dots & \\ n & \text{para } f(i, j) \in D_n \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3.30)$$

onde cada D_i é um subconjunto específico de níveis de cinza.

Outra escolha especial de subconjunto de níveis de cinza D_i define o semilimiar, que é usado algumas vezes para marcar mais facilmente as análises assistidas por humanos.

$$g(i, j) = \begin{cases} f(i, j) & \text{para } f(i, j) \geq T \\ 0 & \text{para } f(i, j) < T \end{cases} \quad (3.31)$$

Este processo auxilia a marcação do segundo plano deixando as informações sobre os níveis de cinza presentes nos próprios objetos.

3.6. TRANSFORMAÇÃO DE IMAGENS

3.6.1. Introdução à Transformada de Fourier

Seja $f(x)$ uma função contínua de uma variável real x . A Transformada de Fourier de $f(x)$, denotada por $\mathfrak{F}\{f(x)\}$, é definida pela equação:

$$\mathfrak{F}\{f(x)\} = F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp[-j2\pi ux] dx \quad (3.32)$$

onde $j = \sqrt{-1}$.

Dada $F(u)$, $f(x)$ pode ser obtida pela transformada inversa de Fourier

$$\mathfrak{F}^{-1}\{F(u)\} = f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u) \exp[j2\pi ux] du \quad (3.33)$$

A Transformada de Fourier pode ser facilmente estendida a uma função $f(x,y)$ de duas variáveis. Se $f(x,y)$ é contínua e integrável e $F(u,v)$ é integrável, tem-se que o par de Transformadas de Fourier a seguir, existem:

$$\mathfrak{F}\{f(x, y)\} = F(u, v) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (3.34)$$

$$\mathfrak{F}^{-1}\{F(u, v)\} = f(x, y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv \quad (3.35)$$

onde u e v são as variáveis de frequência.

3.6.2. A transformada discreta de Fourier

Já no caso de duas variáveis, o par de Transformadas Discretas de Fourier é dado pelas equações:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp[-j2\pi(ux / M + vy / N)] dx dy \quad (3.36)$$

para $u=0, 1, 2, \dots, M-1, v=0, 1, 2, \dots, N-1$ e

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp[j2\pi(ux / M + vy / N)] dx dy \quad (3.37)$$

para $x=0, 1, 2, \dots, M-1, y=0, 1, 2, \dots, N-1$ e

A amostragem de uma função contínua está agora em uma grade com divisões de comprimentos Δx e Δy nos eixos x e y , respectivamente. Como no caso unidimensional, a função discreta $f(x,y)$ representa amostras de uma função $f(x_0+x\Delta x, y_0+y\Delta y)$ para $x=0, 1, 2, \dots, M-1$ e $y=0, 1, 2, \dots, N-1$. Comentários similares valem para $F(u,v)$. O incremento de amostragem nos domínios espaciais e de frequência são dados por:

$$\Delta u = \frac{1}{M\Delta x}$$

e

$$\Delta v = \frac{1}{N\Delta y}$$
(3.38)

Muitos espectros de imagens decaem bastante rápido como uma função do aumento da frequência e, portanto, seus termos de alta frequência têm a tendência de se tornarem obscurecidas quando apresentadas na forma de imagens.

3.7. REALCE DE IMAGENS

3.7.1. Realce de Imagens por modificação de histogramas

Um histograma de uma imagem em níveis de cinza fornece uma descrição global da aparência da imagem. A presente técnica consiste na modificação do histograma de uma dada imagem de uma maneira específica. O tipo e o grau de realce obtido depende da natureza e particularidade do histograma.

3.7.2. Suavização de imagens

As operações de suavização são utilizadas primariamente para diminuir os efeitos degenerados que podem se apresentar em uma imagem digital como o resultado de um sistema de amostragem, ou canal de transmissão, pobres. As técnicas de suavização podem ser consideradas em ambos os domínios de espaço e frequência.

3.7.3. Aguçamento de imagens

As técnicas de aguçamento são úteis primariamente como ferramentas de realce para iluminar os contornos da imagem. Estas técnicas também podem ser aplicadas em ambos os domínios de espaço e frequência.

CAPÍTULO IV

SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS

4.1. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

O primeiro passo para resolver um problema de processamento de imagens consiste em configurar o programa para operar com os dispositivos eletrônicos ou ópticos daquela aplicação particular. Isto é realizado em três etapas:

A. Captura da imagem

A aquisição da imagem ou dados pode ser feita de várias formas, incluindo gravadores de imagens digitais e analógicos, scanners, Foto-CD, VCRs, ou outros tipos de fontes de vídeo. No caso de câmeras, deve-se assegurar primeiro que a câmera, a placa de captura de imagem, as fontes de luz e outros elementos ópticos estejam instalados e preparados corretamente antes de se iniciar a aquisição de dados.

B. A calibração

Antes de coletar os dados se faz necessária a calibração do software. A calibração espacial consiste em se fornecer um padrão de medida para se estabelecer uma relação de tamanho para os objetos amostrados por meio de imagens. No caso de medição sobre superfícies curvas, se torna necessária a

calibração por múltiplos pontos para corrigir as distorções presentes na imagem bidimensional amostrada.

C. Configuração de arquivos

Finalmente, a configuração dos arquivos do software assegura a repetibilidade, salvando as opções como calibração da imagem, faixa de iluminação, escalas etc. sob a forma de arquivo. Dessa forma, se assegura a completa consistência das aplicações da análise de imagem.

4.2. AQUISIÇÃO DOS DADOS

Uma vez configurado o software adequadamente, pode-se proceder a aquisição de dados das imagens, através de:

A. Captura

Uma vez configurada a câmera e placa de captura de imagens, o software pode iniciar a aquisição dos dados, controlando estes dispositivos. O objetivo da automatização deste processo é criar comandos e rotinas que controlem todo o processo de aquisição das imagens.

B. Tratamento

Uma vez que as imagens foram adquiridas, um certo grau de tratamento dessas imagens se faz necessário para facilitar a identificação dos elementos que compõem a imagem. Nesse sentido há uma gama de técnicas que podem ser aplicadas para realçar a imagem dependendo do tipo de aplicação a que se destina.

C. Identificação

A etapa seguinte é identificar os elementos da imagem que se deseja medir. No caso da automatização do processamento, esta tarefa deve ser realizada automaticamente, usando-se como parâmetro de reconhecimento uma determinada característica que defina o objeto alvo da análise.

D. Medição

Neste passo, definem-se os tipos de medidas que se deseja extrair das imagens. Através de um processo que rotula os elementos contidos na imagem, é possível extrair suas medidas individualmente ou em grupo, e utilizar os padrões comuns de medida e também criar um conjunto próprio de padrões de medição.

4.3. RELACIONAMENTO E GERENCIAMENTO DOS RESULTADOS

Após extraídos os resultados das imagens é possível, por meio do software, transferir estes dados para outros programas, afim de se criar banco de dados, gráficos, arquivos de entrada, relatórios etc.

Uma vez definido o processo de análise das imagens, a automação deste assegura que os resultados sejam consistentes, fáceis de se obter e repetitivos. Para se obter essa automação é possível gravar em arquivo as etapas do processo e também criar um programa em uma linguagem de alto nível.

4.4. FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE IMAGENS

4.4.1. Tipos de Imagens

Uma grande variedade de tipos de imagens pode ser utilizada e suportada pelo software. Atenção especial é dada à profundidade dos bits que compõe as imagens. Pode-se trabalhar com as seguintes profundidades:

- a. 8 bits de cinza;
- b. 10 bits de cinza;
- c. 12 bits de cinza;
- d. 16 bits de cinza;
- e. 24 bits de cinza;
- f. 32 bits de cinza;
- g. Ponto flutuante;
- h. 8 bits de cor indexada;

- i. 24 bits de cor RGB, HSI, HSL;
- j. 48 bits de cor RGB, HSI, HSL.

4.4.2. Tratamento

A. Contraste

O contraste e o brilho das imagens podem ser controlados, tanto via software, quanto pela configuração dos parâmetros da câmera.

B. Seleção de uma região de interesse

As técnicas de processamento são aplicadas sobre regiões de interesse. Estas regiões podem ser definidas em termos de número de pixels ou em unidade de calibração especificada. A forma desta região pode ser variada e até mesmo específica.

C. Geometria

O **escalonamento** permite a imagem origem ser escalonada para se ajustar a uma imagem destino.

O **alinhamento** permite alinhar uma imagem origem a uma imagem destino usando um conjunto de pontos fiduciais especificados.

A **rotação** possibilita a rotação de uma imagem ou região de interesse através da especificação de um centro de rotação e um ângulo de giro. Ferramentas

adicionais permitem inverter e espelhar áreas de interesse sobre eixos pré-determinados.

D. Filtros

Os filtros são, em geral, funções matemáticas conhecidas como máscaras de convolução, que atribuem valores de cinza a pixels, baseados nos valores de cinza de seus pixels vizinhos. Outros filtros geram um valor para o pixel alvo por meio de uma amostragem da vizinhança e pela aplicação de alguma outra função matemática sobre esta. Os principais tipos de filtro e suas aplicações estão abaixo listados:

Médias 3x3 e 5x5 são convoluções designadas para remover ruído. Os efeitos do filtro 5x5 são mais fortes do que os efeitos do filtro 3x3.

Gaussianos 3x3 e 5x5 são convoluções designadas para realizar uma normalização através da aplicação de uma aproximação discreta da curva de Gauss. O gaussiano oferece um desempenho melhor em frequência do que a média padrão.

Medianas 3x3, 5x5 e 7x7 são filtros que mudam o pixel alvo pela mediana da luminância dos pixels vizinhos.

Medianas Triplas 3x3 e 5x5 são filtros que criam um histograma da luminância da vizinhança, removem os 10% da parte alta e da parte baixa do histograma e mudam o pixel alvo pela média dos valores de luminância remanescentes.

Nitidez Baixa é uma convolução que consiste no filtro passa-alta 3x3 que melhora suavemente detalhes.

Nitidez Média é uma convolução que consiste no filtro passa-alta 3x3 que torna nítidas as bordas e melhora detalhes.

Nitidez Alta é uma convolução que consiste no filtro passa-alta 5x5 que torna nítidas as bordas e melhora detalhes. Este filtro provoca um aumento elevado dos gradientes ao longo das bordas em todas as direções.

Laplaces médio e alto são filtros de convolução 3x3 que iluminam as bordas em todas as direções.

Sobel é um filtro que ilumina as bordas usando a soma do gradiente na direção X com o gradiente na direção Y, usando dois filtros de convolução 3x3 e calculando a raiz quadrada da soma dos quadrados.

Borda de Roberts é um filtro que ilumina as bordas em todas as direções encontrando a raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre os pixels nas duas direções diagonais. O operador da Borda de Roberts utiliza um filtro 2x2 e então desloca o pixel resultante para a esquerda e para cima de um pixel.

Borda Horizontal é um filtro que ilumina as bordas horizontais dentro da imagem. Todos os pixels que não fazem parte do gradiente horizontal são mudados para preto, todas as bordas se tornam brancas.

Borda Vertical é um filtro que ilumina as bordas verticais dentro da imagem. Todos os pixels que não são identificados como parte do gradiente horizontal são mudados para preto.

2DFFT é uma transformação rápida de Fourier em duas dimensões para filtrar imagens entre o domínio espacial e o domínio da frequência.

HDC/Wallis é um conjunto de funções de filtragem com vários núcleos especializados. Estes filtros são especialmente úteis para suavização de imagens de

grande escala, determinando as regiões de grandes gradientes locais, e melhorando o contraste para revelar pequenas frestas ou características similares.

Filtro de Compasso é um filtro que realiza uma série de convoluções de borda 3x3 em oito pontos de compasso, então os copia juntos usando o operador de Max par conseguir a reconstrução das bordas.

E. Morfologia Binária

A morfologia binária funciona em dois níveis de cinza, preto e branco. Segue uma lista das principais operações de morfologia de imagens binárias:

Inversão é uma operação que provoca a transformação de todos os pixels do primeiro plano em pixels do segundo plano e vice-versa.

Erosão é uma função que primeiro segmenta uma imagem de tons de cinza em seus componentes de primeiro e de segundo plano. Na imagem binária resultante, os pixels do primeiro plano que são 8-conectados aos pixels do segundo plano são eliminados.

Erosão Condicional é uma função de erosão que é realizada dentro das bordas do marcador e da máscara que são especificadas.

Dilatação é o inverso da erosão. Depois da segmentação da imagem de tons de cinza em uma imagem binária, a operação de dilatação identifica os pixels do segundo plano que são 8-conectados aos pixels do primeiro plano e os modifica para o primeiro plano. Finalmente, o "bitmap" dilatado é copiado de volta ao quadro.

Dilatação Condicional é uma função de dilatação que é realizada dentro das bordas do marcador e da máscara que são especificadas.

Abertura é uma erosão seguida de uma dilatação.

Fechamento é uma dilatação seguida de uma erosão.

Contorno é uma operação em que os pixels do primeiro plano que são 4-conectados a um pixel do segundo plano permanecem inalterados. Todos os outros pixels mudam para o segundo plano. Isto produz um contorno 8-conectado.

Preenchimento é uma função que preenche orifícios na região do primeiro plano. Primeiro, traça o limiar na imagem de tons de cinza em seus componentes de primeiro e segundo plano, e então preenche os orifícios nas regiões do primeiro plano. Finalmente, o "bitmap" resultante é copiado de volta para a tela.

Esqueletização 1 é uma operação que, após a segmentação da imagem em seus componentes de primeiro e segundo plano, encontra uma linha de centro apropriada para cada componente conectado no primeiro plano. A linha de centro é encontrada através de um desgaste repetitivo no contorno dos componentes.

Esqueletização 2 é o mesmo que a esqueletização 1 exceto que um algoritmo diferente é utilizado para erodir os contornos. A esqueletização 2 é melhor na medida em que preserva a conectividade em regiões da imagem em que segmentos de linha se unem.

Afinamento é uma operação que aplica uma transformação morfológica casual ao primeiro plano até que não mais haja mudança. O efeito da afinação é a identificação de um conjunto de pixels que descrevem formas subjacentes na imagem.

Aparador pode ser aplicado para reduzir o tamanho dos fios que são produzidos pelo afinamento e pela esqueletização. Devido ao fato de que esta operação destrói agressivamente o contorno dos elementos do primeiro plano, o número de operações de aparamento pode ser especificado.

Espessamento 1 é uma operação que, a cada iteração de espessamento, preenche pequenos orifícios e fendas no contorno dos componentes do primeiro plano. Após várias iterações de espessamento, cada componente tende a se aproximar da forma de um fechamento octógono.

Espessamento 2 é como o espessamento 1 exceto que, após várias iterações de espessamento, cada componente tende a se aproximar da forma de um invólucro de fechamento convexo mais suave.

Separação é uma função que separa áreas conectadas de pixels do primeiro plano através da aplicação de um algoritmo de “watershed” sobre uma imagem intermediária derivada, a partir dos componentes do segundo plano da imagem segmentada. A imagem intermediária é formada pela inversão da Transformação de Distância da imagem binária.

Transformação de Distância é uma função que rotula cada pixel do primeiro plano de uma imagem binária de entrada com a distância ao seu pixel de segundo plano mais próximo.

Separação é um macro que permite separar áreas conectadas de pixels do primeiro plano, através da realização de uma série de passos de erosão binária. Este utilitário funciona melhor em imagens que apresentam áreas circulares conectadas de pixels do primeiro plano que se tocam em pequenas junções, tais como objetos da forma sino.

F. Morfologia em Tons de Cinza

A morfologia em tons de cinza utiliza os mesmos princípios da morfologia binária, mas opera em imagens em tons de cinza ao invés de imagens binárias. A

sonda, também conhecida como grade ou núcleo, pode ser definida e aplicada a uma região de interesse.

Os elementos da sonda correspondem a pixels na imagem. O seu tamanho pode ser especificado em 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 ou 11x11 pixels. É possível criar uma determinada forma de sonda ou utilizar uma forma predefinida: barra horizontal, barra vertical, círculo, cruz, cruz diagonal, barra diagonal, barra diagonal invertida, diamante, quadrado, quadrado arredondado, triângulo e cilindro.

Uma vez escolhida a sonda, é possível aplicar qualquer das seguintes funções:

Erosão é uma operação que troca cada pixel pelo tom de cinza mais escuro de sua vizinhança tal como é definida pela sonda. Remove as pontes de brilho entre os objetos escuros.

Dilatação é uma operação que troca cada pixel pelo tom de cinza mais brilhante de sua vizinhança tal como é definida pela sonda. Remove as pontes de escuridão entre os objetos escuros.

“Top Hat” é uma função que subtrai o resultado de uma abertura da imagem original. É particularmente útil para realçar detalhes de uma imagem que apresente sombras.

“Well” é uma função que subtrai o resultado de um fechamento da imagem original. Esta é a inversa da operação “Top Hat”.

G. Operações Aritméticas

As operações aritméticas permitem combinar imagens aritmeticamente na base de pixel por pixel para reduzir ruído da imagem, corrigir condições não

uniformes de iluminação ou retirar o segundo plano de uma imagem. São operações padrões e outras mais complexas: **adição, subtração, média, constante, cópia, divisão, multiplicação, máximo, mínimo, ou, e e ou exclusivo.**

4.4.3 Identificação

A identificação de elementos se torna possível, uma vez que a imagem foi tratada. As técnicas de identificação reconhecem os elementos do primeiro plano, que se deseja medir, através do limiar da imagem. Os elementos de interesse identificados podem então ser marcados por ferramentas de identificação, tais como:

A. Limiar

O limiar permite definir o primeiro plano de uma imagem através da seleção de uma faixa de valores de tons de cinza ou cores — Todos os outros valores são considerados como segundo plano. Um grupo de pixels conectados cujos valores estão dentro do primeiro plano é definido como um elemento do primeiro plano. A seguir são mostrados os principais tipos de limiar:

Tons de Cinza: há várias técnicas que podem ser usadas para atribuir uma faixa de limiar de tons de cinza. É possível especificar diretamente os valores de limite, variar interativamente os valores sobre uma escala ou amostrar pontos manualmente a partir da imagem.

Adaptativo: uma vez que um segundo plano com iluminação irregular pode tornar difícil atribuir um único valor de limiar de tons de cinza que possa isolar os objetos do primeiro plano em toda a região de interesse, o software proporciona

ferramentas de suavização local ou global que permitem corrigir a iluminação na imagem com segundos planos que variam suavemente.

Múltiplo: permite criar múltiplos limiares para cores, bem como para tons de cinza. Limiares múltiplos operam da mesma forma para ambos os tipos de imagens, exceto que será requisitada a seleção de cores quando se trabalha com imagens coloridas. Quando se utiliza múltiplo limiar, o software aplica as funções para cada um dos limiares ativos.

Automático: é possível produzir automaticamente limiares em imagens para garantir repetibilidade. Há opções de limiar unimodal, limiar em objetos iluminados ou escurecidos, ou em um número específico de fases. Cada uma das opções suporta métodos de múltiplo limiar, tais como a técnica de “watershed”, que cria contornos entre os objetos sem modificar os próprios objetos, permitindo a identificação automática de elementos. Outros métodos incluem ajuste exponencial, busca de mínimos, aparamento a partir de pontos extremos ou minimização da variância de segmentos.

B. Detecção de bordas

Os marcadores do software podem encontrar bordas ou padrões com acurácia da ordem de sub-pixel. Medidas podem ser extraídas baseadas na posição, amostragem, índice ou distância das bordas detectadas na imagem.

C. Ferramentas de detecção de elementos

As ferramentas de detecção de elementos dentro do software permitem identificar elementos específicos dentro da imagem dos quais se deseja extrair as medidas. As identificações destas áreas podem ser feitas manualmente com as seguintes ferramentas: **desenhar linhas, marcar pontos, desenhar áreas**.

Alternativamente, os elementos podem ser identificados automaticamente com um conjunto de ferramentas automáticas. As ferramentas automáticas se baseiam nas ferramentas de limiar descritas acima e é possível especificar parâmetros de amostragem para cada ferramenta, descritas a seguir:

Auto Linhas: automaticamente cria linhas em todos os objetos do primeiro plano como se os objetos fossem esqueletizados à espessura de um pixel. Podem-se especificar parâmetros de amostragem tais como comprimento mínimo.

Auto Áreas: automaticamente cria áreas baseadas no atual limiar. Podem-se especificar parâmetros de amostragem tais como posição do contorno e comprimento mínimo do contorno. Pode-se também especificar a inclusão ou exclusão de furos, bem como a remoção de áreas que tocam a borda da área de interesse.

Auto Pontos: automaticamente cria pontos baseados no atual limiar. Podem-se especificar parâmetros de amostragem tais como tamanho mínimo do ponto.

As ferramentas de identificação podem ser usadas em conjunto com as ferramentas de morfologia e filtragem para separar objetos do seu segundo plano. Cada área identificada é tratada como um objeto de uma tela diferente e pode ser selecionado, movido, editado ou excluído.

4.5. MEDIÇÃO

Uma vez identificados os elementos, podem-se extrair dados da imagem, como mostrados a seguir:

A. Conjunto de medições

Primeiro, especifica-se qual medida se deseja calcular e extrair. Estas medidas, junto com a disposição dos dados e especificações de rotulação, são armazenadas como conjuntos de medições. São conjuntos de medições pré-definidos: forma de partícula, classificação de objeto, densiometria, calibração, morfometria de área, linha e ponto, análise de posição, rastreamento de objeto e análise de ponto.

Podem-se ajustar os parâmetros de amostragem para cada um dos conjuntos de medição. Tais parâmetros incluem limites de luminância para extrair dados, intervalos de bordas de área, média de luminância de ponto, número de intervalos de linha e comprimento médio de linha.

B. Macros aplicativas

Para a maioria das aplicações, pode-se utilizar um dos vários macros aplicativos já incluídos no software. Os macros aplicativos incluem:

Área percentual: mede o percentual de área, por limiar, de objetos do tipo área.

Contagem de partículas: conta partículas e constrói histogramas de dados.

Análise de movimento: rastreia um objeto através de uma série de imagens.

Análise de volume: rastreia o volume de um objeto através de uma série de imagens.

Plotagem de superfície de luminância: cria uma vista tridimensional baseada na luminância.

Outras macros aplicativas incluem: Morfometria e Contorno de Linha, Morfometria e Densimetria de Área, Medição de Dimensões Críticas e de Calibração, Análise de Ponto.

C. Exportação de dados

Tipicamente, deseja-se exportar os dados obtidos para análises posteriores. Pode-se especificar um destino de exportação para os dados extraídos, tal como um arquivo binário, arquivo de dados ASCII, ou relatórios customizados criados em outros programas.

D. Explorador de medição

O explorador de medição permite extrair e visualizar os dados para medidas individualmente selecionadas. Pode-se aprender interativamente sobre cada medição e os dados que esta gera.

4.6. AUTOMAÇÃO

Uma vez o processo de análise definido, a automação assegurará resultados consistentes, facilidade de utilização e repetibilidade. A Linguagem Analítica para Imagens (LAI) é a linguagem de controle de macros do software. Entre os vários recursos, a LAI oferece: Declarações de Controle para Ramificação e Laços, Expressões Aritméticas de Inteiro e Ponto Flutuante, Expressões Lógicas. A LAI também oferece um extenso conjunto de funções embutidas: Matemática, Comunicação, Manipulação de Arquivo, Controle de Aplicativo.

CAPÍTULO V

CASO EXEMPLO

5.1. INTRODUÇÃO

A seguir, apresenta-se um caso exemplo, através do qual, são consolidadas e aplicadas as técnicas apresentadas nos capítulos anteriores. Tomamos um exemplo simples e de fácil reprodução para ilustrar o funcionamento do sistema proposto de holografia e processamento de imagens.

Para tanto, uma barra engastada é submetida à flexão, conforme descrito a seguir. Um holograma de dupla exposição é registrado em dois momentos. O primeiro, quando a viga se encontra em repouso, e o segundo, quando se encontra deformada.

Através da reprodução do holograma, a interferometria holográfica revela os deslocamentos obtidos sobre a viga. O processamento de imagens é utilizado como ferramenta para capturar a imagem reproduzida e processá-la, para depois analisar e medir estes deslocamentos de forma automática. Através destes deslocamentos medidos, em cada ponto da viga, são calculadas as deformações e tensões correspondentes.

O sistema proposto é utilizado para avaliar as tensões e deformações de uma viga elástica sob flexão, na condição engastada, aplicando-se um deslocamento em sua extremidade.

Nesta situação, a viga apresenta deformações como as ilustradas na Figura 5.1, abaixo:

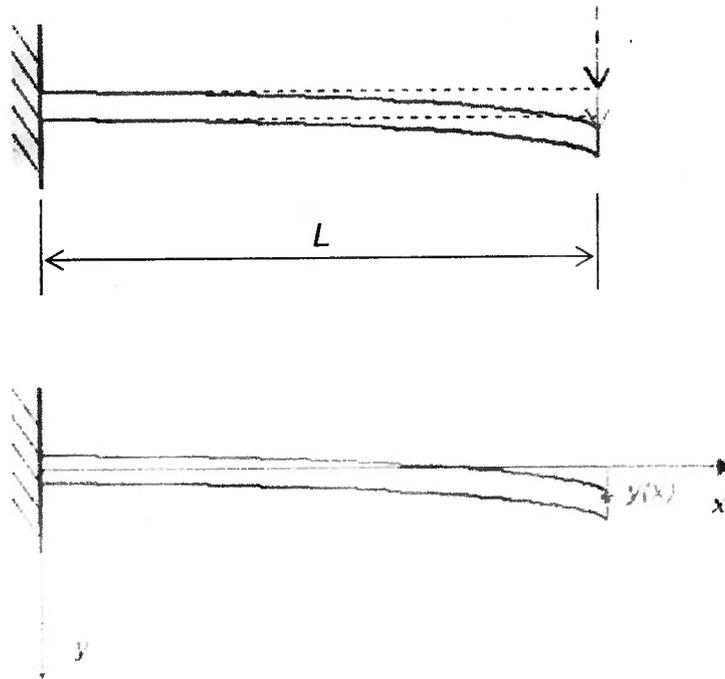


Figura 5.1 - Barra engastada, carregamento aplicado, deslocamentos e sistema de eixos.

São conhecidos: o comprimento total da viga L , seu momento de inércia I e seu módulo de elasticidade E . Para este caso, a distribuição de deslocamentos y_x é dada pela seguinte expressão:

$$y_x = \frac{P}{6EI} (3Lx^2 - x^3) \quad (5.1)$$

onde:

P é a carga correspondente ao deslocamento

L é o comprimento da barra

E é o módulo de elasticidade do material

I é o momento de inércia da barra

A distribuição de deformações ε_x sobre a linha média é dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_x = \frac{Pc}{EI}(L-x) \quad (5.2)$$

onde:

c corresponde à metade da altura da secção transversal da barra

E a distribuição de tensões σ_x sobre a linha média é dada por:

$$\sigma_x = \frac{Pc}{I}(L-x) \quad (5.3)$$

Para o caso exemplo, conhecida a flecha máxima y_M na extremidade ($x=L$), substituindo na fórmula 5.1 e reescrevemos as fórmulas 5.2 e 5.3, assim, podemos calcular as tensões e deformações, com segue:

$$\sigma_x = \frac{3Ec y_M}{L^3}(L-x) \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_x = \frac{3c y_M}{L^3}(L-x) \quad (5.5)$$

onde:

y_M é a carga flexa máxima

5.2. SISTEMA DE IMAGENS HOLOGRÁFIAS

Para a realização dos ensaios experimentais, construiu-se o sistema de ensaio mecânico por interferometria holográfica com processamento de imagens. Foi utilizado o método de Holografia de Dupla Exposição, o arranjo é mostrado na Figura 5.2.

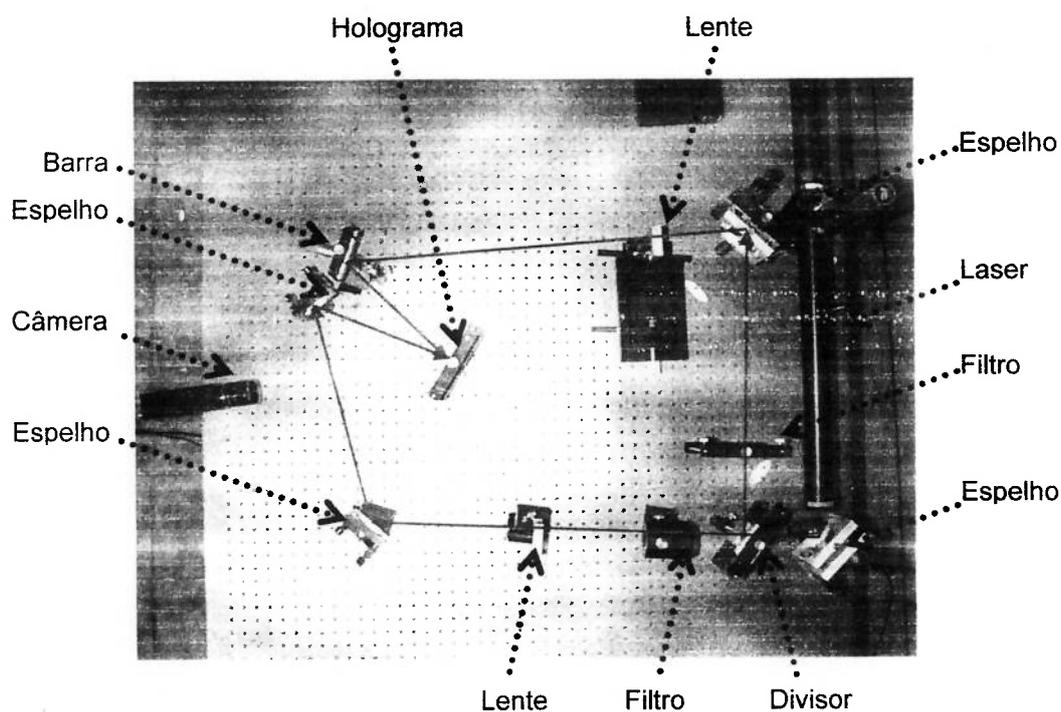


Figura 5.2 - Vista do arranjo e caminho óptico, método da dupla exposição.

Um dispositivo permite a fixação adequada dos corpos de prova à mesa holográfica, como ilustrado na Figura 5.3. Tomou-se uma primeira exposição, avançou-se o micrômetro para aplicar um deslocamento sobre a barra e tomou-se uma segunda exposição, de modo a registrar através das franjas de interferência o efeito da carga aplicada, ou seja, para registrar os deslocamentos.

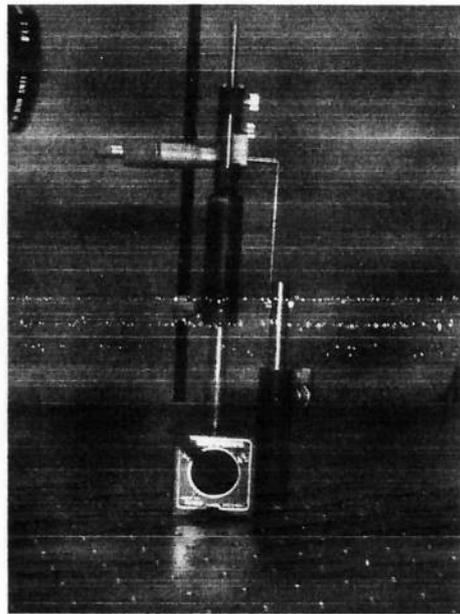


Figura 5.3 - Micrômetro utilizado para aplicar deslocamento à barra.

No arranjo holográfico, utiliza-se um laser de He-Ne, com uma potência de saída de 25 mW e comprimento de onda $\lambda = 632,8$ nm. A barra possui comprimento $L = (134,0 \pm 0,1)$ mm, espessura $2c = (2,0 \pm 0,1)$ mm e módulo de elasticidade do aço $E = (204 \pm 1)$ GPa. A flecha máxima aplicada pelo micrômetro foi (7 ± 1) μm .

5.3. DESCRIÇÃO DO ARRANJO E CAMINHO ÓPTICO

À frente da fonte laser, é colocado um espelho, cuja função é desviar o feixe de laser em aproximadamente 90° , para melhor aproveitar o espaço útil da mesa e facilitar a movimentação dos demais componentes ópticos. A seguir, um prisma cúbico, que possui uma interface parcialmente reflexiva em uma das diagonais principais, permite que um raio incidente seja dividido em dois raios, um raio cuja direção não é alterada e outro raio cuja direção é desviada em 90° , a função deste prisma é dividir o feixe de laser original em dois, o raio objeto e o raio de referência.

O raio desviado pelo prisma, o raio objeto, passa por um filtro espacial, cujo papel é espalhar o raio objeto de modo a cobrir a superfície de interesse no objeto. Sem este filtro, o feixe incidiria sobre o objeto na forma pontual. Uma lente divergente completa o trabalho de espalhar o raio ou abrir o ângulo de incidência do raio, para que o objeto seja iluminado adequadamente. O segundo espelho permite que o objeto seja iluminado sob um ângulo favorável em relação ao raio de referência, que será tratado a seguir. Ao refletir sobre o objeto, o raio objeto incide sobre o holograma, assim, a frente de onda objeto é gravada.

A função desta primeira parte do arranjo é fazer com que o raio objeto seja encaminhado sobre a superfície do holograma segundo um caminho ou comprimento de trajetória adequado, que deve ser aproximadamente o mesmo caminho do raio de referência, contando a partir da divisão no prisma. A diferença entre elas não deve exceder o comprimento de coerência do Laser utilizado, que no caso é de aproximadamente 30 cm. Nesta etapa, o holograma já está sendo iluminado pelo raio objeto, restando apenas ser iluminado pelo raio de referência.

O raio não desviado pelo prisma atravessa um filtro espacial e uma lente divergente, à semelhança do raio objeto. Após passar pela lente, o raio de referência é direcionado ao holograma através de um terceiro espelho, fazendo com que o ângulo entre os dois raios seja aproximadamente 30° . O holograma é colocado à frente do ponto de convergência dos raios objeto e de referência para que nele incidam os dois raios simultaneamente.

Assim é realizada uma exposição. Notar que a segunda exposição é feita da mesma forma, alterando-se apenas as condições do objeto. Para o presente caso, a alteração no objeto é produzida através da aplicação de um deslocamento.

5.4. REGISTRO DOS HOLOGRAMAS

Todos os hologramas foram registrados sobre placas holográficas e o tempo de exposição da chapa holográfica será de 3 s na dupla exposição. Uma vez exposta a chapa, a mesma é revelada com o seguinte procedimento:

- (a) Revelação por 5 minutos, com pequena agitação intermitente e lavagem em água corrente por 30 segundos a 20°C ;
- (b) Fixação de 5 minutos;
- (c) Lavagem por 10 minutos em água corrente;
- (d) Secagem vagarosa na temperatura ambiente.

5.5. RECONSTRUÇÃO DOS HOLOGRAMAS

A reconstrução do holograma se faz da seguinte forma, como pode ser visto na Figura 5.4.

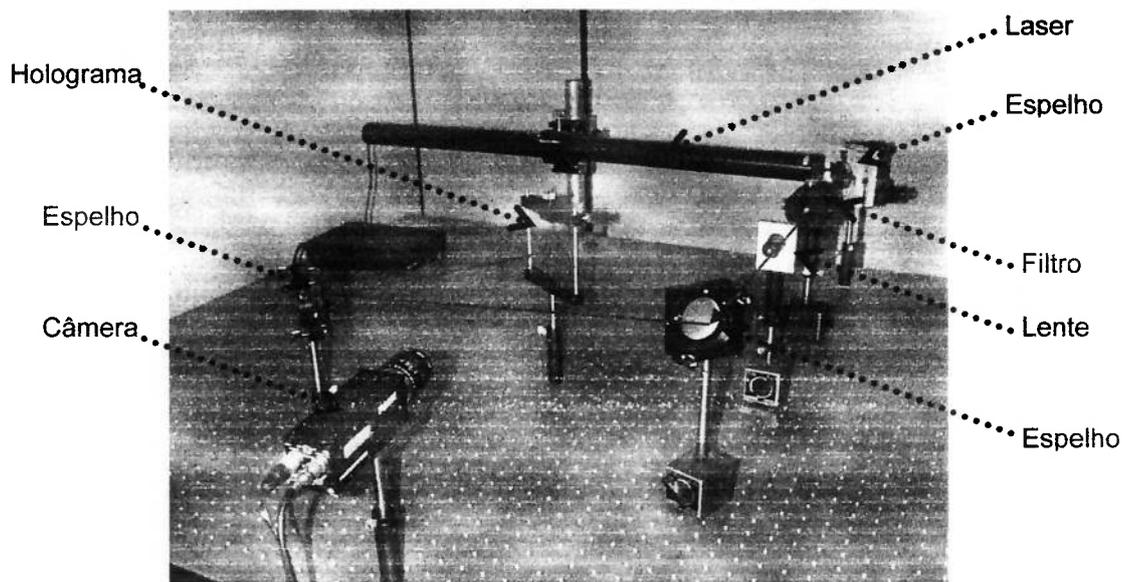


Figura 5.4 - Caminho óptico percorrido pelo laser na reconstrução do holograma.

Na reprodução do holograma, o arranjo não é necessariamente alterado, bastando que se bloqueie mecanicamente o raio objeto, fazendo com que apenas o raio de referência incida sobre o holograma. Quando somente o raio de referência incide sobre o holograma, ele reproduz as informações gravadas no holograma.

No caso da dupla exposição, o efeito desta reprodução é a criação das franjas de interferência, que é o efeito das duas imagens holográficas gravadas e superpostas. O processo pode ser entendido como se o objeto original e o objeto deformado estivessem presentes simultaneamente no mesmo local e a luz coerente por eles refletida gerasse a interferência e os padrões das franjas.

Uma câmera é colocada de forma perpendicular à superfície do holograma, com o intuito de captar os raios provenientes desta superfície. Estes raios trazem as informações de posição e intensidade da luz laser quando o holograma é reproduzido. A câmera é dotada de uma lente de vídeo para que a imagem possa ser conduzida ao dispositivo de captura de imagens da câmera adequadamente.

5.6. ESQUELETIZAÇÃO DAS FRANJAS

A esqueletização consiste em se repetir as operações de erosão, até que os objetos da imagem sejam reduzidos a uma linha, com a espessura de apenas um pixel. Utilizaremos o processo de esqueletização descrito no item 2.10. Nesta análise, será utilizado o holograma representado pela Figura 5.5.

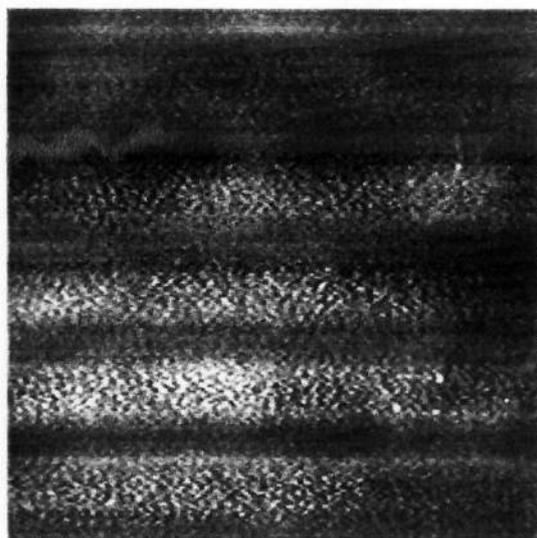


Figura 5.5 - Imagem do holograma original.

As imagens resultantes de cada operação de esqueletização são mostradas nas Figuras 5.6 e 5.7.

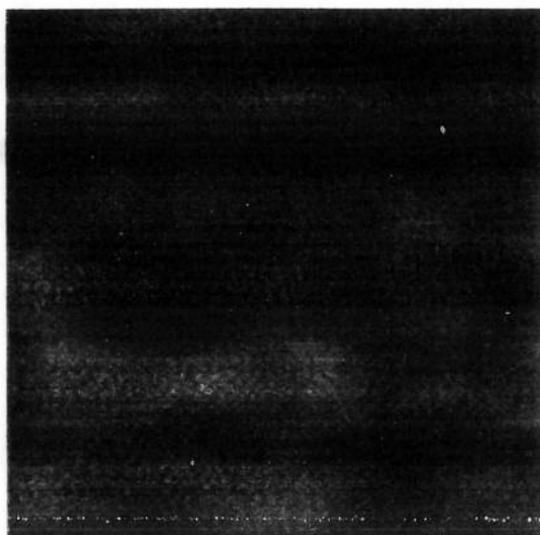


Figura 5.6 - Imagem do holograma após a aplicação dos filtros.

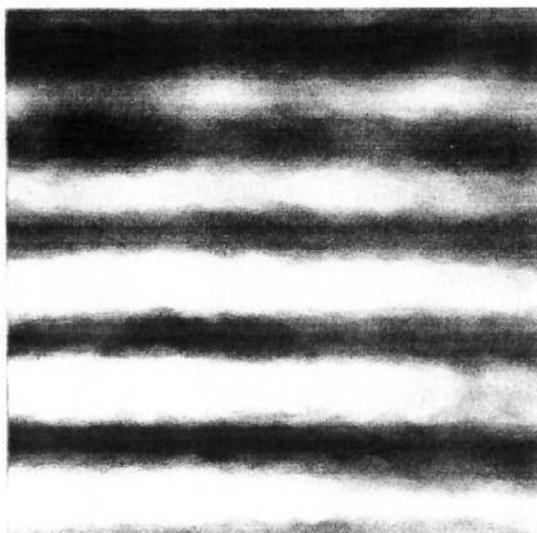


Figura 5.7 - Imagem do holograma após segmentação e realce.

As linhas centrais indicam os centros das franjas resultantes das operações finais de esqueletização, conforme ilustram as Figuras 5.8 e 5.9.

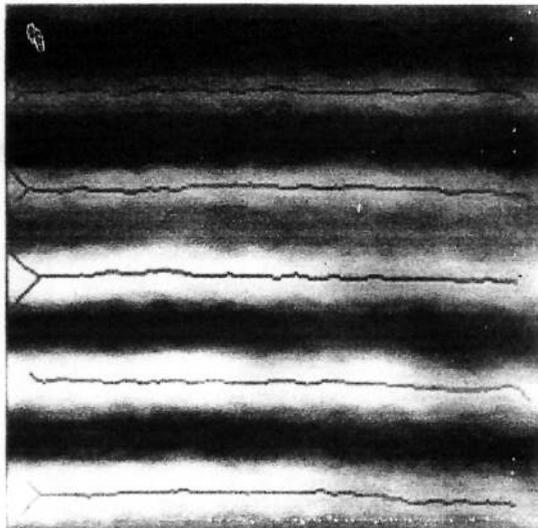


Figura 5.8 - Imagem do holograma após a esqueletização.

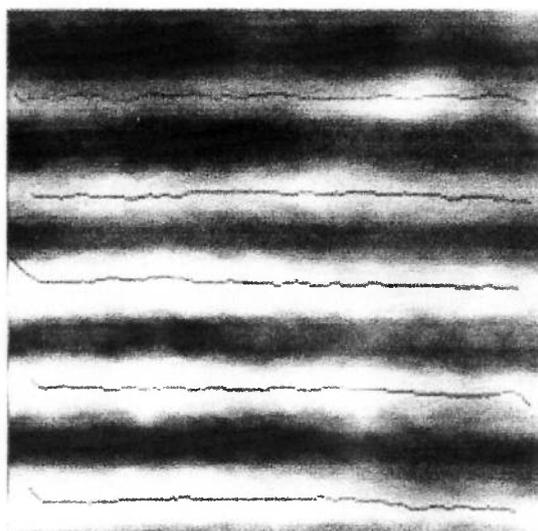


Figura 5.9 - Imagem final do holograma após a obtenção dos centros das franjas.

Por meio da localização de cada ponto dos centros das franjas, calculamos os deslocamentos, tensões e deformações, obtidos sobre a linha central da barra. Os resultados são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Deslocamentos, tensões e deformações obtidos.

Ponto	Distância (mm)	Ordem	Deslocamento (nm)	Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Tensão (kPa)
1	0	0	0	1,25	256
2	7	1	316	1,19	242
3	17	2	633	1,09	223
4	25	3	949	1,02	208
5	32	4	1266	0,95	195
6	39	5	1582	0,89	181
7	45	6	1898	0,83	170
8	49	7	2215	0,79	162
9	57	8	2531	0,72	147
10	62	9	2848	0,67	137
11	67	10	3164	0,63	128
12	73	11	3480	0,57	116
13	78	12	3797	0,52	107
14	83	13	4113	0,48	97
15	88	14	4430	0,43	88
16	92	15	4746	0,39	80
17	98	16	5062	0,34	69
18	104	17	5379	0,28	57
19	108	18	5695	0,24	50
20	112	19	6012	0,21	42
21	116	20	6328	0,17	34
22	120	21	6644	0,13	27
23	125	22	6961	0,08	17
24	130	23	7277	0,04	8
25	134	24	7594	0,00	0

Os deslocamentos obtidos da Tabela 5.1, uma vez interpolados, revelam os deslocamentos da figura 5.10. O comportamento da curva na origem dos eixos indica uma derivada de deslocamento diferente de zero, causada pela imperfeição do engaste.

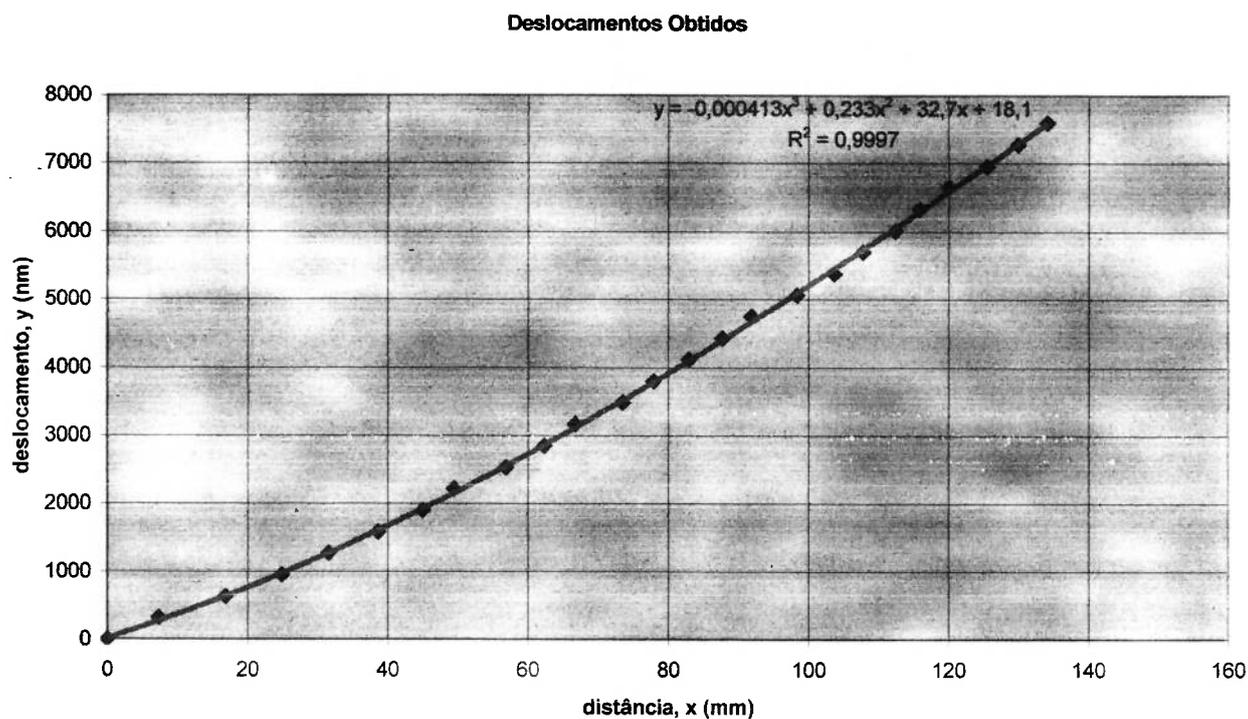


Figura 5.10 – Gráfico dos deslocamentos obtidos por interpolação das fases.

Os deslocamentos obtidos sobre todos os pontos da superfície da viga, interpolados, revelam os deslocamentos da figura 5.11.

Deslocamentos registrados no holograma

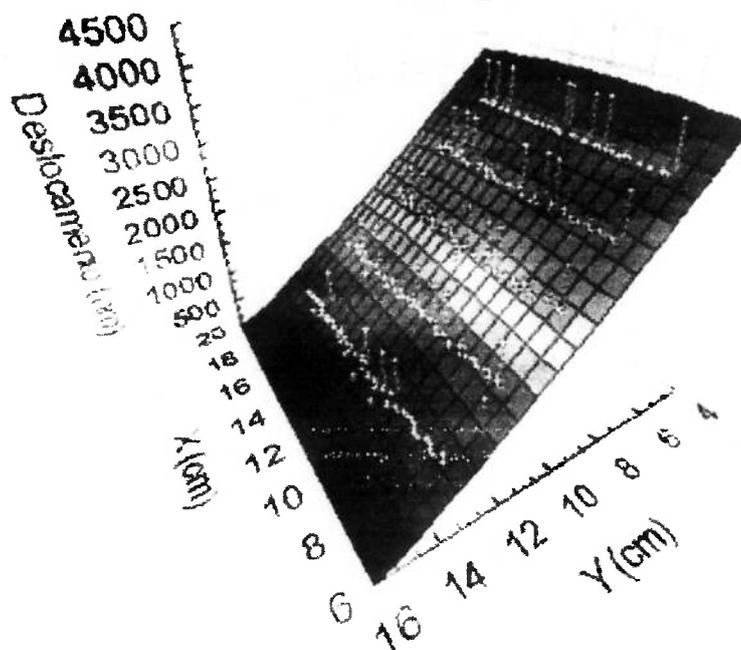


Figura 5.11 – Gráfico mostrando a distribuição dos deslocamentos sobre a barra.

5.7. MÉTODO DA CORRELAÇÃO

Este método foi desenvolvido, no presente trabalho, para corrigir os problemas de indeterminação e descontinuidade que a esqueletização produz, quando a imagem possui um grau acentuado de ruído. O algoritmo percorre toda a imagem e procura por mudanças de intensidade luminosas, que obedecem a um padrão senoidal por correlação, calculando o centro da franja.

O processo se inicia a partir de uma amostragem da imagem do holograma original, como é ilustrada pela Figura 5.12.

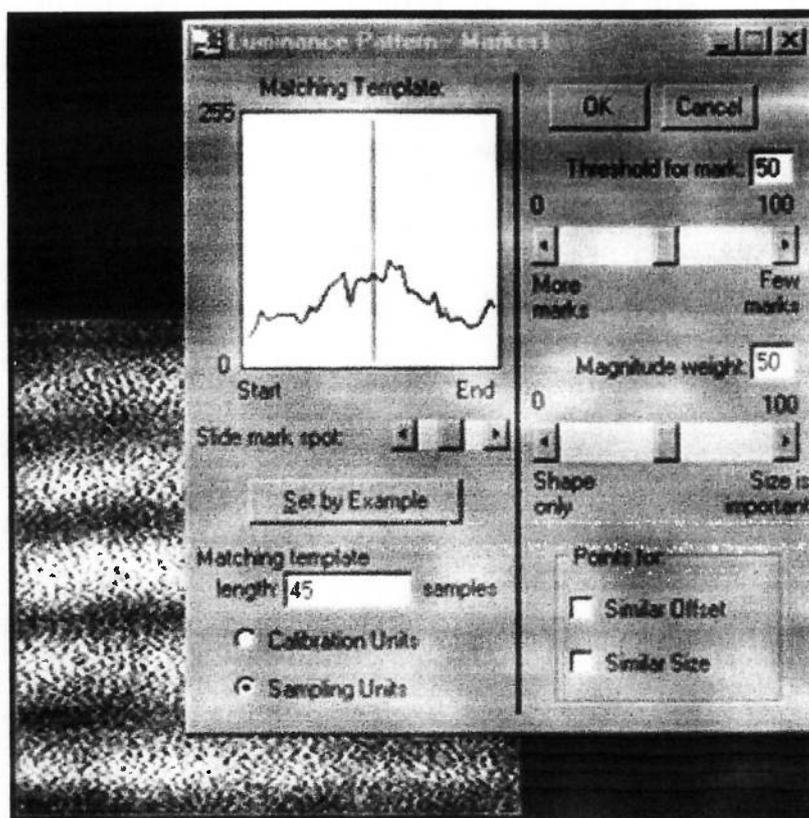


Figura 5.12 - Amostragem das franjas.

Feita a amostragem, o algoritmo localiza os centros das franjas por correlação, marcando-os com a letra *P*, como é apresentado na Figura 5.13.

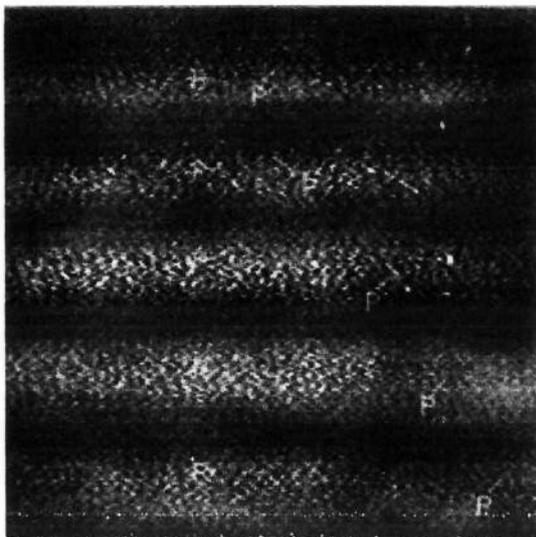


Figura 5.13 - Exemplo de localização dos centros das franjas.

A seguir, o algoritmo é aplicado a cada ponto da imagem do holograma, através do macro-comando ilustrado na Figura 5.14.

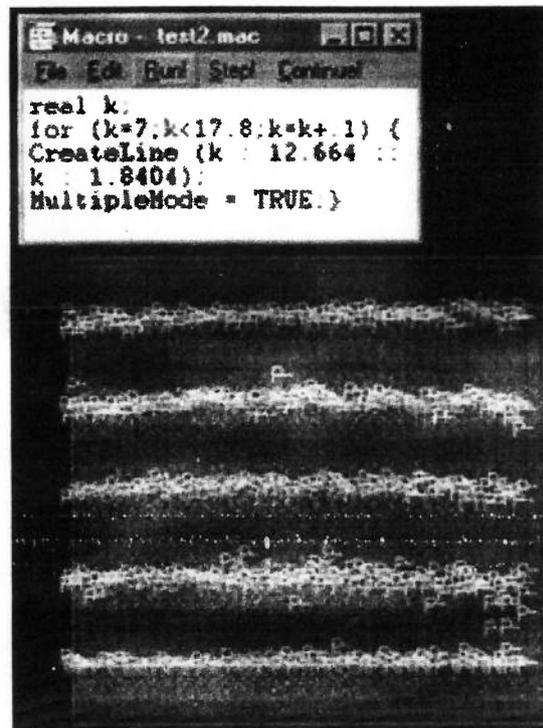


Figura 5.14 - Programa de localização dos centros das franjas e o resultado da busca global dos centros das franjas.

O método é extremamente útil na realização de análise automática das imagens e quando as condições de ruído inviabilizam a esqueletização das franjas. Neste caso, a interpolação dos pontos obtidos se faz necessária devido aos pequenos desvios causados pelos ruídos, desta forma, é possível estabelecer o centro das franjas ao longo de toda a superfície do material.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. CONCLUSÕES

A Interferometria Holográfica, com o auxílio do Processamento de Imagens, no estudo de deformações e tensões mostrou-se satisfatória. O método revelou-se adequado para o processamento de imagens holográficas, no sentido de avaliar os deslocamentos em uma viga em flexão e, a partir destes, calcular as tensões e deformações da barra.

O arranjo holográfico proposto permitiu a gravação e reprodução dos hologramas com precisão, e o método de dupla exposição, utilizado para registrar as franjas, produziu padrões de interferência em conformidade com os previstos pela bibliografia. Desta forma, o método proposto mostrou-se válido para medição de deslocamentos.

O sistema de processamento de imagens revelou-se uma ferramenta poderosa e eficiente, pois permitiu não apenas analisar as imagens dos hologramas, pelo método tradicional de esqueletização, como também permitiu o desenvolvimento de uma nova técnica de análise por correlação. As imagens apresentaram qualidade e os resultados do processamento das imagens apresentaram repetibilidade.

No caso exemplo, foi possível obter os centros das franjas sobre toda a superfície da barra engastada em flexão, quando se utilizou o método da correlação proposto neste trabalho. Enquanto que o método tradicional de esqueletização das

franjas não se mostrou satisfatório em algumas situações em que a iluminação do holograma não era uniforme.

6.2. RECOMENDAÇÕES

Como a necessidade crescente de se fazer medições em estruturas e peças reais em condições de operação, o método óptico de interferometria holográfica apresenta cada vez maior utilidade e novos desenvolvimentos. As tecnologias para tornar isto possível estão se tornando cada vez mais acessíveis. O progresso no desenvolvimento de equipamentos ópticos e programas de computador já está disponibilizando estes métodos ópticos para as aplicações industriais.

A seguir são apresentadas recomendações para trabalhos futuros que venham envolver a análise de tensões e deformações através do método da interferometria holográfica.

Uma evolução do método da dupla exposição, a técnica da franja viva, consiste em se utilizar o próprio objeto interferindo com uma única imagem holográfica de referência, permitindo que se realize a interferometria diretamente sobre a superfície do objeto em seu estado atual, permitindo a análise sem a necessidade de revelação do holograma a cada perturbação provocada sobre o objeto.

Com a técnica da franja viva, aliada à rotina de análise de imagens por computador, pode-se alcançar a análise dos deslocamentos em tempo real. Adicionando-se o cálculo das deformações e tensões a partir dos deslocamentos, é possível obter a análise completa das tensões e deformações, sem contato com o corpo e de forma rápida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WILSON, J. **Optoelectronics, an Introduction to.** Prentice Hall, 1989.
- [2] CLOUD, G. L. **Optical Methods of Engineering Analysis.** Cambridge University Press, 1995.
- [3] VEST, C. M. **Holographic Interferometry.** Wiley, 1979.
- [4] BARRET, A. **Computer Vision and Image Processing.** Chapman and Hall, 1991.
- [5] SONKA, M.; HLAVAC V.; BOYLE, R. **Image, Processing, Analysis and Machine Vision.** Chapman & Hall, 1993.
- [6] NIBLACK, W. **Image Processing, an Introduction to.** Prentice-Hall, 1986.
- [7] CASTLEMAN, K. R. **Digital Image Processing.** Prentice-Hall, 1986.
- [8] RUSS, J. C. **Image Processing Handbook.** CRC Press, 1994.
- [9] CONLEY, E., ed.; ROBILLARD, J., ed. **Industrial Applications for Optical Data Processing and Holography.** CRC Press, 1992.
- [10] RASTOGI, K., ed. **Interferometria Holográfica.** Springer-Verlag, 1994.
- [11] GONZALEZ, R. C. **Processamento de imagens digitais.** Edgard Blucher, 2000.
- [12] SILVA, G. B. **Processamento de Imagens Aplicado a Engenharia Mecânica.** Trabalho de Formatura, EPUSP, 1997.
- [13] OLIVA, A. R. T. **Processamento de imagens: Sistema de Detecção de Formas Geométricas Simples em Imagens Digitais.** Trabalho de Formatura, EPUSP, 2000.
- [14] PARKER, J R. **Algorithms for Image Processing and Computer Vision.** John Wiley, 1997.
- [15] JÄHNE, BERND. **Digital Image Processing: Concepts, Algorithms, and Scientific Applications.** Springer, 1997.
- [16] UMBAUGH, SCOTT E. **Computer Vision and Image Processing.** Prentice Hall, 1998.
- [17] COLLINGS, NEIL. **Optical Pattern Recognition Using Holographic Techniques.** Addison-Wesley, 1988.
- [18] GLASSNER, ANDREW S. **Principles of Digital Image Synthesis.** Morgan Kaufmann, 1995.
- [19] GREEN, WILLIAM B. **Digital Image Processing: a Systems Approach.** Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [20] PRATT, WILLIAM K. **Digital Image Processing.** Wiley, 1978.
- [21] JAIN, ANIL K. **Fundamentals of Digital Image Processing.** Prentice Hall, 1989.

- [22] EKSTROM, MICHAEL P. **Digital Image Processing Techniques**. Academic Press, 1984.
- [23] BOLC, L.; KULPA, Z. **Digital Image Processing Systems**. Springer-Verlag, 1981.
- [24] CHELLAPPA, R.; SAWCHUK, A. A. **Digital Image Processing and Analysis**. Silver Spring, 1985.
- [25] JÄHNE, B. **Digital Image Processing**. Springer, 1997.
- [26] LYON, D. A. **Image Processing in Java**. Prentice Hall, 1999.
- [27] D'ORNELLAS, M. C. **Algorithmic Patterns for Morphological Image Processing**. Amsterdam, 2001.
- [28] BIANCHI, A. G. C. **Inferring Shape Evolution**. Elsevier Science, 2003.
- [29] HIRATA J., R. **Microarray Gridding by Mathematical Morphology**. IEEE, 2001.
- [30] HIRATA J., R. **Design of Gray-Scale Nonlinear Filters via Multiresolution Aperture**. SPIE, 2001.
- [31] PRATT, W. K. **Digital Image Processing**. Wiley, 2001.
- [32] RUSS, J. C. **The Image Processing Handbook**. CRC Press, 2002
- [33] GONZALEZ, R. C. **Digital Image Processing**. Prentice Hall, 2002
- [34] SONKA, M. **Image Processing, Analysis, and Machine Vision**. PWS Pub., 1999.
- [35] NADER, G. **Laser Interferometry Technique Applied to the Measurement of Flexensional Transducers Displacement**. ABCM, 2001.
- [36] CARDOSO, F. P. **Determinação de Parâmetros Físicos Através da Holografia Digital**. USP, 2001.
- [37] RIVERA, J. L. V. **Análise de Holografia Interferométrica de Objetos sob Condições Submersas**. USP, 1997.
- [38] FORNERIS JR., R. **Análise de Deslocamentos e Deformações em Elementos Estruturais por Interferometria Holográfica**. USP, 1987.
- [39] MELÃO, I. **Análise de Superfícies Através do Método Óptico de Sub-Franjas**. USP, 1998.
- [40] RIVERA, J. L. V. **Desenvolvimento de holografia digital com aplicação na análise de deslocamentos em condições submersas**. USP, 2001.