

D.A. 16.09.87

ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL

ANALISE DE DESLOCAMENTOS E DEFORMAÇÕES EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS
POR INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA

dissertação

~~Tese~~ apresentada à Escola Politécnica da USP
para a obtenção do Título de Mestre em
Engenharia

Autor: RICARDO FORNERIS JUNIOR

São Paulo, 1987

882-07
Biblioteca da Escola Politécnica
São Paulo
i
RICARDO FORNERIS JUNIOR

Eng. Mecânico , Escola de Engenharia Mauá, 1983

. ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS E DEFORMAÇÕES EM ELEMENTOS
ESTRUTURAIS POR INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA

Diene Jaeger

~~Tese~~ apresentada à Escola
Politécnica da USP para a
obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Edison Gonçalves
Professor do Departamento de
Engenharia Naval da EPUSP.

São Paulo, 1987

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi executado no Laboratório de Espectroscopia do Departamento de Física Experimental do Instituto de Física da USP. Agradecemos à direção do Departamento pelas facilidades proporcionadas que incluem a construção da mesa holográfica e de alguns componentes mecânicos.

O equipamento holográfico e as chapas fotográficas utilizadas foram doadas pela DFVLR (Deutsche Forschung und Versuchsanstalt für Luft und Raumfahrt, Colonia, Alemanha). Agradecemos ao Prof. Kurt Wanders da DFVLR pela doação.

Agradecemos ao Prof. Dr. Edison Gonçalves pela valiosa orientação, dedicação e ensino durante a realização deste trabalho.

Agradecemos ao Prof. Dr. Roberto I. M. G. Forneris pela orientação na parte de holografia e por ministrar o curso especial de adaptação "Introdução à óptica, Espectroscopia e Lasers" e o curso especial de pós-graduação "Holografia e suas Aplicações à Engenharia Mecânica".

Agradecemos ao Prof. Dr. José Manuel Vasconcelos Martins pelo empréstimo do gerador de sinais e do frequencímetro.

Agradecemos ao Prof. Hélio Nanni da Escola de Engenharia Mauá pela autorização de utilização do medidor de coordenadas XYZ.

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de uma bolsa de mestrado.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a potencialidade da utilização da interferometria holográfica para a análise qualitativa e quantitativa de esforços estáticos e dinâmicos aplicados a qualquer peça.

Inicialmente, faz-se um apanhado teórico sobre os conceitos de óptica clássica para posteriormente analisar-se como fazer e reconstruir um holograma.

Em seguida analisa-se um dos métodos para se avaliar os deslocamentos com relação ao padrão de franjas observado sobre a peça quando se faz um holograma de tempo real ou de dupla exposição.

Descreve-se a seguir um dos métodos para se ler, diretamente do holograma, as componentes de deformação e rotação superficial de um ponto sobre o objeto.

Analisa-se, também, como avaliar as deformações dinâmicas, oscilatórias ou não.

Utiliza-se as técnicas citadas acima para um estudo qualitativo e quantitativo de barras engastadas quando solicitadas por carregamentos estáticos e dinâmicos oscilatórios.

Finalizando, faz-se uma análise do método suas vantagens e desvantagens e das dificuldades encontradas para a realização dos ensaios. Também, propõe-se uma série de estudos posteriores para facilitar a utilização do método bem como para aprimorá-lo.

RESUME

This thesis has as its main objective to evaluate the possibilities of use of holographic interferometry to the qualitative and the quantitative analysis of static and dynamic loads applied to any kind of mechanical component.

We begin by presenting a few concepts of classical optics needed to explain how to make and reconstruct a hologram.

We follow with an analysis of one of the methods available to evaluate the displacements in relation to the fringe pattern observed over the component with a real time or double exposure hologram.

We describe next one of the methods for reading, directly from the hologram, the surface deformation and rotation components of a point in the object.

We also analyse how to evaluate a dynamical deformation whether oscillatory or not.

We follow with an application of these techniques to a qualitative and quantitative study of cantilevered beams under static and dynamic applied loads.

We finalize with an analysis of the interferometric holographic method presenting its advantages and disadvantages and the difficulties encountered in the performance of the tests. We also propose a series of studies which should follow from this work to simplify and improve it.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
RESUME	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DAS FIGURAS	vii
ÍNDICE DAS TABELAS	ix
RELAÇÃO DE SÍMBOLOS E VÁRIÁVEIS	x
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 HOLOGRAFIA E INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA E ALGUMAS APLICAÇÕES	2
1.3 OBJETIVOS DESTA TRABALHO	4
CAPÍTULO II - CONCEITOS BÁSICOS DA HOLOGRAFIA E DA INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA	5
2.1 FENÔMENOS DE INTERFERÊNCIA DIFRAÇÃO E FILTRAGEM ESPACIAL	5
2.1.1 INTERFERÊNCIA	5
2.1.2 DIFRAÇÃO E FILTRAGEM ESPACIAL ..	9
2.2 O PROCESSO HOLOGRÁFICO	16
2.3 INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA	21
CAPÍTULO III - AVALIAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS	24
3.1 RELAÇÕES BÁSICAS ENTRE DESLOCAMENTOS E A CONFIGURAÇÃO DAS FRANJAS	24
3.1.1 INTRODUÇÃO	24
3.1.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO NESTE TRABALHO	28
3.2 EQUAÇÃO PARA A INTERPRETAÇÃO DAS FRANJAS	35
CAPÍTULO IV - AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES	39
4.1 AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES	39
4.2 CÁLCULO DAS TENSÕES	49

CAPÍTULO V - ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES	50
CAPÍTULO VI - ANÁLISE EXPERIMENTAL DE BARRAS ENGASTADAS	58
6.1 DESCRIÇÃO DO ARRANJO HOLOGRÁFICO	58
6.2 ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS DE UMA BARRA ENGASTADA	62
6.2.1 ANÁLISE DE UMA BARRA SUBMETIDA A CARREGAMENTO UNIDIRECIONAL ..	62
6.2.2 ANÁLISE DE UMA BARRA SUBMETIDA A CARREGAMENTO BIDIRECIONAL ...	66
6.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES SENOIDAIS DE UMA BARRA ENGASTADA	77
CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	82
7.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTUDO REALIZADO	82
7.2 RECOMENDAÇÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

ÍNDICE DAS FIGURAS

1.1 Gravação de um holograma	3
1.2 Reconstrução de um holograma	3
2.1 Onda plana com vetor de propagação \vec{k}	12
2.2 Intersecção de sucessivas frentes de onda com o plano $x-y$	13
2.3 Descrição da alteração da amplitude complexa pela interação com o objeto de amplitude de transmitância t	13
2.4 Filtragem espacial	15
2.5 Holografia fora do eixo	18
2.6 Holografia em linha	20
3.1 Holodiagrama	26
3.2 Arranjo óptico para a realização da hologra- fia-moiré	27
3.3 Relações básicas para a análise das franjas	30
3.4 Determinação gráfica do vetor sensibilidade	32
3.5 Ilustração de um deslocamento coplanar	32
3.6 Análise de um único holograma	34
3.7 Análise de múltiplos hologramas	34
3.8 Método de análise do holograma proposto por Dhir e Sikora	37
4.1 Observação das franjas sobre um objeto em interferometria holográfica quando de uma deformação homogênea	43
5.1 Vibração de uma barra engastada	53
5.2 Gráfico de $J_0^2(\xi)$	56
6.1 Arranjo básico utilizado nesta tese	59
6.2 Suporte de três pontos para a realização de holografia de tempo real	61
6.3 Esquema do dispositivo para realizar o estudo de flexão	64
6.4 Dimensões da barra utilizada neste estudo mm ...	64
6.5 Holograma de dupla exposição da barra engastada	64

6.6 Esquema do arranjo holográfico para se realizar o estudo de dupla flexão da barra engastada	67
6.7 Foto do arranjo holográfico	67
6.8 Foto do holograma de dupla exposição	68
6.9a Posição das franjas para a direção de observação 1	71
6.9b Posição das franjas para a direção de observação 2	71
6.9c Posição das franjas para a direção de observação 3	72
6.9d Posição das franjas para a direção de observação 4	72
6.9e Posição das franjas para a direção de observação 5	73
6.9f Posição das franjas para a direção de observação 6	73
6.9g Posição das franjas para a direção de observação 7	74
6.9h Posição das franjas para a direção de observação 8	74
6.9i Posição das franjas para a direção de observação 9	75
6.10 Arranjo experimental	79
6.11 Barra e suporte utilizado para o ensaio	79
6.12 Equipamento gerador, leitor e amplificador de sinais	80
6.13 Padrão de franjas gerado sobre a barra	80
6.14 Visualização de uma linha nodal	81
6.15 Hologramas de tempo médio	81
7.1 Formação das franjas em holografia interferométrica	84

ÍNDICE DAS TABELAS

5.1 Zeros da função de Bessel	55
6.1 Características principais de algumas emulsões fotográficas para holografia	61
6.2 Coordenadas dos pontos sobre o objeto mm	69
6.3 Coordenadas dos pontos sobre o holograma mm	69
6.4 Função lugar geométrico das franjas	70
6.5 Variação da função lugar geométrico das franjas em relação a direção de observação 1	70
6.6 Deslocamentos obtidos experimentalmente	76
6.7 Deslocamentos obtidos analiticamente	76

RELAÇÃO DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

A, Q	ponto de observação
\vec{A}	vetor amplitude de movimento
$\vec{a}(x,y,z)$	vetor amplitude em um dado ponto no espaço
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$..	ângulos entre a direção de propagação da onda plana com os eixos x, y e z
e	permissividade elétrica do meio em que a luz propaga
E	erro inerente as medidas
E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}	componentes de deformação normal
$\vec{E}(x,y,z)$	vetor intensidade do campo elétrico
f	fase inicial das oscilações
f_x, f_y, f_z ..	frequências espaciais de uma onda plana
θ	diferença de fase entre as ondas
θ_1	fase da luz espalhada por P
θ_2	fase da luz espalhada por P'
θ_r	fase da luz que parte da fonte
$\theta(x,y,z)$	fase das oscilações em um dado ponto
$\Delta\theta, d$	diferença de fase entre duas ondas espaço
$[g]$	matriz da variação linear do vetor sensibilidade
G	função lugar geométrico das franjas
G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}	componentes de deformação angular
I	irradiância
J_0	função de Bessel de primeiro tipo e ordem zero
\vec{k}	vetor de propagação da onda
\vec{k}_1, \vec{k}_3	vetores de iluminação
\vec{k}_2, \vec{k}_4	vetores de observação
\vec{K}	vetor sensibilidade
\vec{K}_r	vetor franja no ponto P
\vec{L}	vetor deslocamento
λ	comprimento de onda

M_t	função característica
n	coeficiente de poisson
N	número de franjas
O	fonte
P	ponto sobre o objeto
P'	ponto P do objeto deslocado de \vec{L}
R_i	módulo do vetor P ao ponto de iluminação
R_o	módulo do vetor P ao ponto de observação
\vec{R}_P	vetor da origem de um sistema de coordenadas ao ponto P
$\Delta\vec{R}_{PQ}$	vetor do ponto P ao ponto Q
S	tensão no ponto
x, y e z	coordenados do ponto no espaço
t	variável tempo
$t(x,y)$	amplitude de transmitância
u, v e w	componentes de deslocamento
$U(x,y,z)$	amplitude complexa da luz
v	velocidade de propagação da onda
w	frequência angular
w_x, w_y, w_z ..	componentes de rotação
$Z(x)$	amplitude complexa de vibração
$[E_{ij}]$	matriz deformação
$[f_{ij}]$	matriz gradiente de deformação
$[\theta_{ij}]$	matriz rotação
$\{L\}$	matriz coluna das componentes do vetor deslocamento
$\{K\}$	matriz coluna das componentes do vetor sensibilidade

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O termo holografia (holo = todos, grafos = registro) é utilizado para descrever o processo pelo qual se grava a amplitude e a fase de ondas, tais como, luz, micro-ondas, som, etc., em um plano. A seguir pode-se reconstruir essas amplitude e fase mantendo-se as suas características integrais.

A holografia foi inventada por Dennis Gabor em 1948. Ele descreveu a possibilidade de gravar (em uma emulsão fotográfica) a amplitude e a fase das ondas coerentes de luz transmitidas por um objeto transparente. Pela projeção desta mesma luz através do filme fotográfico (ou holograma) foi possível reproduzir uma imagem tridimensional do objeto original [1].

A gravação e a reconstrução de um holograma, como Gabor sugeriu, se tornou mais fácil com o advento do Laser como fonte coerente monocromática de luz.

Em 1964, Leith e Upatnieks demonstraram, utilizando um Laser, que também um holograma de um objeto opaco poderia ser gravado e reconstruído de maneira similar àquela proposta por Gabor [2].

Para se fazer um holograma, Figura 1.1, ilumina-se o objeto com luz proveniente de um Laser L. A luz direta do Laser 1 e a luz 2 difundida pelo objeto O interferem resultando em uma variação de intensidade no plano do filme

fotográfico F. O filme registra então permanentemente a interação das duas ondas de luz.

Na reconstrução da imagem do objeto pelo holograma, Figura 1.2, o filme fotográfico F é iluminado com uma fonte de luz coerente L. A luz do Laser interage com o padrão de intensidade registrado no filme fotográfico e o resultado é uma imagem tridimensional do objeto original O que pode ser vista por um observador colocado em A.

A imagem reconstruída do objeto foi estudada por varios pesquisadores que desenvolveram muitas aplicações práticas para o processo, principalmente em engenharia, artes, armazenamento de dados, medicina, etc.

1.2 HOLOGRAFIA E INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA E ALGUMAS APLICAÇÕES.

A holografia e a interferometria holográfica tem muitas aplicações nas áreas técnicas. A engenharia utiliza principalmente a técnica da interferometria holográfica para a realização de ensaios experimentais.

Para se fazer interferometria holográfica grava-se sobre o mesmo holograma dois estados diferentes de um objeto. Assim, as fases das ondas de luz que chegam ao holograma em dois instantes de tempo são diferentes e podem interferir. Por isso, um padrão de franjas se formará sobre a imagem reconstruída do objeto. Esse padrão é função do tipo de mudanças ocorridas no estado inicial do objeto.

A interferometria holográfica é uma técnica altamente sensível que permite a avaliação de pequenas alterações, da ordem de 0,07 micron, ocorridas no objeto. A enorme vantagem desta técnica em relação a outras técnicas usadas para medir pequenos deslocamentos, é que peças mecânicas ou qualquer outro objeto, podem ser testados em condições de trabalho de forma não destrutiva.

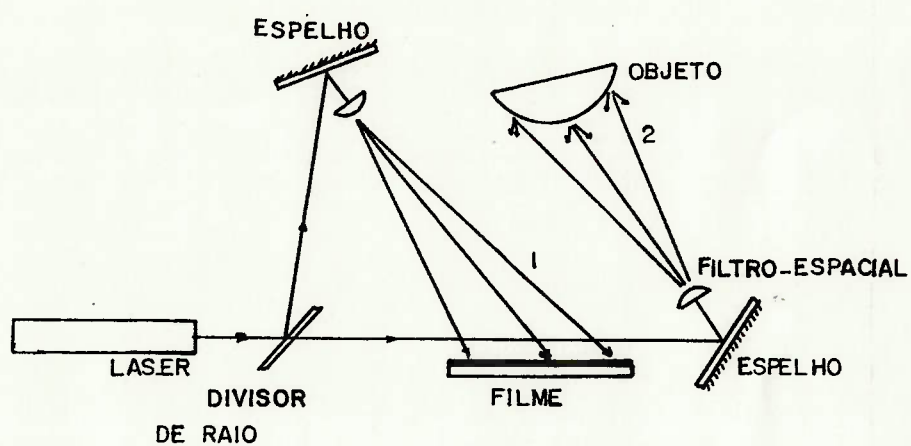


Figura 1.1 - Gravação de um holograma.

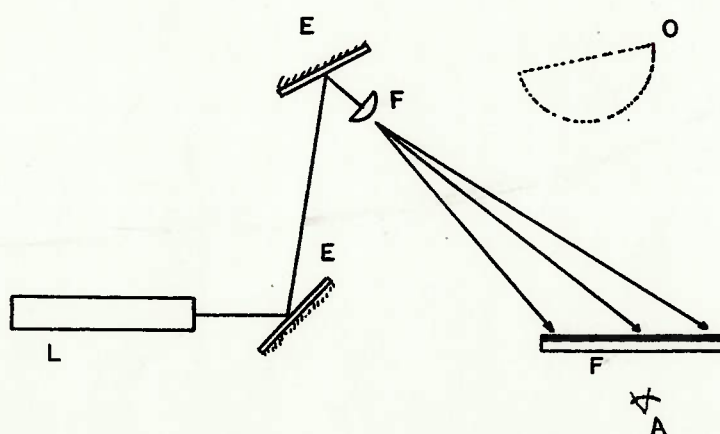


Figura 1.2 - Reconstrução de um holograma.

Por exemplo, um defeito interno numa peça mecânica tal como uma trinca, um vazio ou uma falta de homogeneidade podem ser facilmente detetadas através da observação do holograma. Isto porque, quando tensionado, o objeto produz regiões de micro-deformações que são sensíveis ao processo.

Pode-se também fazer uma análise quantitativa de um holograma, como por exemplo, avaliando-se deslocamentos, deformações, frequências e modos de ressonância, estudos de fratura e fadiga.

Consequentemente, por poder-se avaliar o comportamento em operação sob condições diferentes, projetos podem ser otimizados determinando-se com precisão o desempenho dos componentes.

1.3 OBJETIVOS DESTE ESTUDO.

Este estudo tem por objetivo expor os princípios da holografia e da interferometria holográfica e verificar as potencialidades de sua utilização no campo da engenharia.

Para tanto, é desenvolvido um estudo teórico dos conceitos físicos da holografia e mostra-se como utilizar o método em aplicações práticas: avaliações qualitativas e quantitativas dos hologramas no estudo dos deslocamentos, das deformações e nas análises dinâmicas.

Concluindo o trabalho discute-se as vantagens e desvantagens do método bem como as dificuldades encontradas para a sua aplicação.

Finalmente, dá-se sugestões visando estudos posteriores para melhorar e facilitar o uso do método holográfico.

CAPÍTULO II

CONCEITOS BÁSICOS DA HOLOGRAFIA E DA INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA

2.1 FENÔMENOS DE INTERFERÊNCIA, DIFRAÇÃO E FILTRAGEM ESPACIAL

2.1.1 INTERFERÊNCIA.

Os princípios fundamentais de interferência da luz foram extensamente estudados [1] e alguns conceitos básicos são apresentados em diversos trabalhos como introdução ao desenvolvimento da teoria da holografia [2] [3] [4].

A luz é uma forma de radiação eletromagnética e é caracterizada por sua amplitude, comprimento de onda, velocidade de propagação, direção de propagação, fase e polarização.

Quando a luz é refletida ou espalhada por um objeto, todas ou algumas das características acima podem ser alteradas. Com a avaliação destas mudanças, podem ser obtidas informações sobre o objeto, como por exemplo, temperatura, tamanho, etc.

Embora um grande número de fenômenos de interações da luz devam ser interpretados pela óptica quântica, na holografia e na interferometria holográfica manifestações de natureza quântica da luz são desprezíveis, podendo-se fazer uso da teoria eletromagnética clássica da luz.

De acordo com a teoria clássica, uma onda de luz monocromática pode ser representada na seguinte forma:

$$\vec{E}(x,y,z) = \vec{a}(x,y,z) \cos[\omega t + \phi(x,y,z)], \quad (2.1)$$

onde:

$\vec{E}(x,y,z)$ vetor intensidade do campo elétrico
 $\vec{a}(x,y,z)$ vetor amplitude em um dado ponto
 (x,y,z) no espaço
 $\phi(x,y,z)$ fase das oscilações em um dado ponto
 (x,y,z) no espaço
 x,y,z coordenadas do ponto no espaço
 t tempo
 ω frequência angular das oscilações.

Uma onda de luz é também caracterizada por um vetor de onda \vec{k} , cuja direção coincide com a direção de propagação da onda. O módulo do vetor \vec{k} é dado por:

$$k = 2\pi/\lambda = \omega/v, \quad (2.2)$$

onde:

λ comprimento de onda
 v velocidade de propagação da onda.

Uma onda é chamada plana se em qualquer instante de tempo as superfícies de igual fase estão contidas num mesmo plano. Sendo \vec{r} o vetor posição de qualquer ponto no espaço, a Equação (2.1) pode ser escrita neste caso como:

$$\vec{E}(x,y,z) = \vec{a}(x,y,z) \cos(\omega t + f - \vec{k} \cdot \vec{r}), \quad (2.3)$$

onde:

f fase inicial das oscilações.

Para uma onda esférica que emerge de uma fonte pontual, a fase das ondas é constante para todos os pontos a

uma distância r do centro. Então, a Equação (2.1) pode ser escrita como:

$$\vec{E}(r,t) = \vec{a}(r) \cos(\omega t + \phi - k \cdot r). \quad (2.4)$$

O fenômeno de interferência é o princípio básico da holografia. Sabe-se que a frequência da luz é da ordem de 10^{15} Hz. Detetores, tais como, filmes fotográficos, fotodiodos ou a retina do olho não são capazes de responder a estas variações de frequência extremamente rápidas. Contudo, eles respondem à IRRADIÂNCIA (I^*) que é a média do fluxo de energia luminosa. Pela teoria eletromagnética clássica da luz, pode-se mostrar que:

$$I^* = ev \langle \vec{E}^2 \rangle, \quad (2.5)$$

onde:

e permissividade elétrica do meio em que a luz propaga

$\langle \rangle$ significa média no tempo.

O ponto chave da equação (2.5) é que I^* é proporcional ao valor médio de \vec{E}^2 no tempo.

Para iniciar as considerações de interferência, supõe-se duas ondas de luz (1) e (2) estejam presentes simultaneamente numa dada região do espaço. Os vetores campo elétrico são, respectivamente, \vec{E}_1 e \vec{E}_2 de mesma frequência angular e superpostos, ou seja, $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Logo a irradiância das ondas superpostas é dada por:

$$I = I^*/(ev) = \langle \vec{E}_1^2 \rangle + \langle \vec{E}_2^2 \rangle + 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle. \quad (2.6)$$

Uma análise simplificada do fenômeno de interferência pode ser feita admitindo-se que as duas ondas de luz sejam planas e linearmente polarizadas na mesma

direção. Pela Equação (2.3) tem-se, no caso da primeira onda, que as três componentes do vetor \vec{E}_1 são dadas por:

$$E_{y1} = 0$$

$$E_{y1} = A_1 \cos(\omega t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r})$$

$$E_{z1} = 0 ,$$

e analogamente para a segunda onda. Desta forma os módulos do vetor intensidade de campo elétrico para as ondas (1) e (2) são dados por:

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r}) \quad (2.7)$$

e

$$E_2 = A_2 \cos(\omega t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \phi), \quad (2.8)$$

onde:

ϕ diferença de fase entre as ondas.

Combinando as Equações (2.7) e (2.8) em (2.6) e executando-se o cálculo do fluxo médio de energia tem-se:

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 \cdot I_2)^{1/2} \cos d, \quad (2.9)$$

sendo:

$$I_1 = A_1^2$$

$$I_2 = A_2^2$$

$$d = \vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \phi ,$$

onde:

d diferença de fase entre as duas ondas em qualquer posição do espaço.

A irradiância devida à interação das duas ondas varia do valor mínimo

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2(I_1 \cdot I_2)^{1/2} \text{ para } d = (2N+1)\pi,$$

até o valor máximo

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2(I_1 \cdot I_2)^{1/2} \text{ para } d = 2N\pi,$$

onde:

N número inteiro.

Duas ondas de luz que são capazes de interferir uma com a outra são chamadas COERENTES. A coerência pode ser dividida em coerência espacial e coerência temporal. Diz-se que uma onda tem coerência espacial perfeita se a diferença de fase entre dois pontos fixados num plano perpendicular à direção de propagação for independente do tempo. A coerência temporal, por sua vez, é devida à largura finita da linha espectral; diz-se que uma onda tem coerência temporal perfeita se a diferença de fase entre dois pontos fixados ao longo de sua direção de propagação for independente do tempo.

Por causa da necessidade de coerência, a maioria dos arranjos para interferência é utilizada com duas imagens da mesma fonte. Estas imagens são produzidas por um dispositivo chamado interferômetro.

2.1.2 DIFRAÇÃO E FILTRAGEM ESPACIAL.

A formação de um holograma é um processo interferométrico. Na prática da holografia, utiliza-se a luz de um Laser por ser a mesma altamente coerente. O fenômeno

de difração é tratado adequadamente (devido às propriedades praticamente ideais da luz) em termos da teoria elementar da difração.

Para o desenvolvimento da teoria da difração escalar, o vetor \vec{E} será substituído pela grandeza $u(x,y,z)$, que se refere simplesmente à perturbação óptica. A expressão para uma onda monocromática pode ser escrita como (conforme [1] [2] [3]):

$$u(x,y,z) = a(x,y,z)\cos[\omega t - \phi(x,y,z)], \quad (2.10)$$

onde:

$a(x,y,z)$ amplitude real da onda de luz

$\phi(x,y,z)$ fase da onda.

A Equação (2.10) pode também ser escrita na forma:

$$u(x,y,z,t) = \text{Re}\{ U(x,y,z)\exp(-i\omega t) \}, \quad (2.11)$$

onde:

$$U(x,y,z) = a(x,y,z)\exp[-i\phi(x,y,z)]. \quad (2.12)$$

$U(x,y,z)$ é chamada de AMPLITUDE COMPLEXA DA LUZ e contém todas as informações sobre a estrutura espacial das ondas de luz o que é suficiente para o estudo da difração em holografia.

A amplitude complexa de uma onda plana com um vetor de propagação \vec{k} é:

$$U(x,y,z) = a(x,y,z)\exp(-i\vec{k}\cdot\vec{r}) \quad (2.13)$$

ou

$$U(x,y,z) = a(x,y,z)\exp[-i2\pi (x.\cos\alpha_1/\lambda + y.\cos\alpha_2/\lambda + z.\cos\alpha_3/\lambda)]. \quad (2.14)$$

Como mostra a Figura (2.1), α_1 , α_2 , α_3 são os ângulos entre a direção de propagação da onda plana e os eixos x , y , z .

A amplitude complexa pode também ser escrita em termos dos ângulos:

$$\theta_1 = \pi/2 - \alpha_1 : \theta_2 = \pi/2 - \alpha_2 : \theta_3 = \pi/2 - \alpha_3, \quad (2.15)$$

assim:

$$U(x,y,z) = a(x,y,z) \exp[-i2\pi(x.\text{sen}\theta_1/\lambda + y.\text{sen}\theta_2/\lambda + z.\text{sen}\theta_3/\lambda)]. \quad (2.16)$$

Considerando uma onda plana na qual o vetor de propagação \vec{k} pertença ao plano y-z, as intersecções das sucessivas frentes de onda com este plano podem ser representadas como na Figura 2.2. As frentes de onda são separadas por um comprimento de onda e interceptam o eixo y em intervalos periódicos de $\lambda/\text{sen}\theta_2$ e o eixo z em intervalos periódicos de $\lambda/\text{sen}\theta_3$. O recíproco destes períodos é chamado de FREQUÊNCIA ESPACIAL. As frequências espaciais de uma onda plana são :

$$f_x = \text{sen}\theta_1/\lambda : f_y = \text{sen}\theta_2/\lambda : f_z = \text{sen}\theta_3/\lambda. \quad (2.17)$$

Combinando-se as Equações (2.16) com (2.17) obtém-se:

$$U(x,y,z) = a(x,y,z) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y + f_z z)]. \quad (2.18)$$

Quando a luz passa através de um objeto, tal como uma rede de difração ou um holograma, a sua amplitude complexa é alterada. A descrição desta alteração é feita pela AMPLITUDE DE TRANSMITÂNCIA (t), de um objeto, que é a razão entre a amplitude complexa que entra e a amplitude complexa que sai. Tem-se:

$$U_o(x,y,z) = t(x,y)U_i(x,y), \quad (2.20)$$

conforme é ilustrado na Figura 2.3.

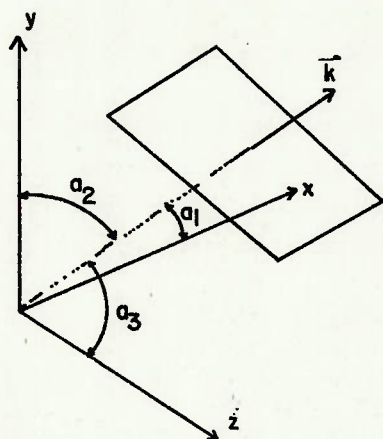


Figura 2.1 - Onda plana com vetor de propagação \vec{k} .

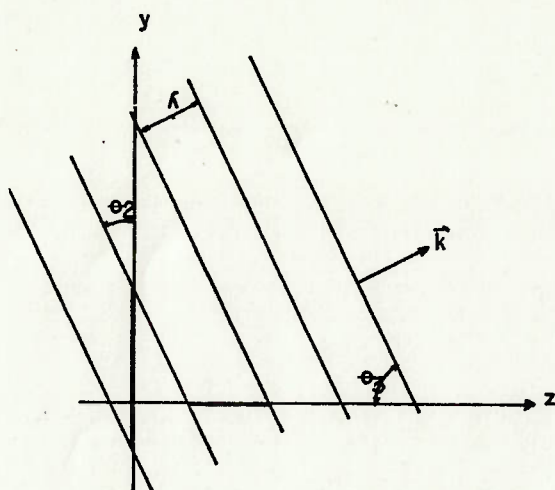
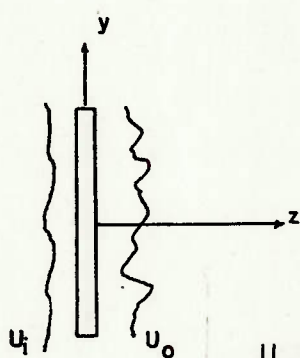


Figura 2.2 - Intersecção de sucessivas frentes de onda com o plano z-y.

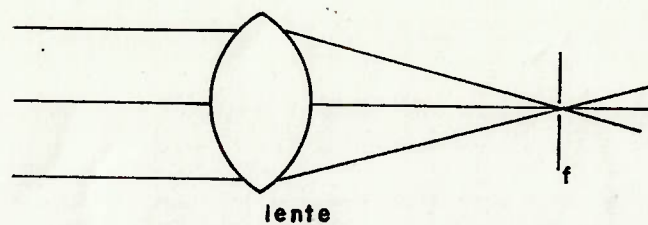


$$U_o(x,y,z) = t(x,y)U_i(x,y,z)$$

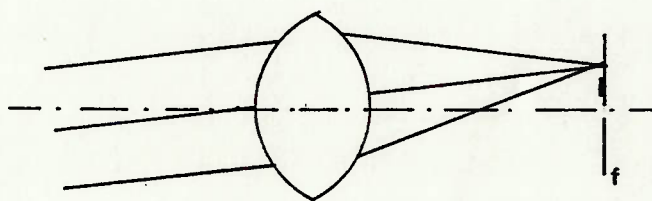
Figura 2.3 - Descrição da alteração da amplitude complexa pela interação com o objeto de amplitude de transmitância t .

A filtragem espacial é uma técnica importante em muitas aplicações de holografia interferométrica [2] [3] [37]. Um caso fundamental de operação da filtragem espacial é o isolamento das componentes individuais de uma onda plana de luz que foi difratada por um objeto. Como mostra a Figura 2.4a, uma onda plana de luz que caminha na direção axial será concentrada, por uma lente, em um ponto onde o eixo óptico intercepta o plano focal. Uma onda plana vinda de uma direção não axial incide sobre a lente e será focalizada em um ponto no plano focal mas fora do eixo, como é mostrado na Figura 2.4b. Desde que haja uma correspondência entre a direção de propagação e a localização do plano focal da lente, as componentes individuais de uma frente de onda difratada por um objeto (uma rede senoidal por exemplo) podem ser fisicamente isoladas. Isto é feito no plano focal no qual passa a radiação de frequência espacial desejada, como mostra a Figura 2.4c.

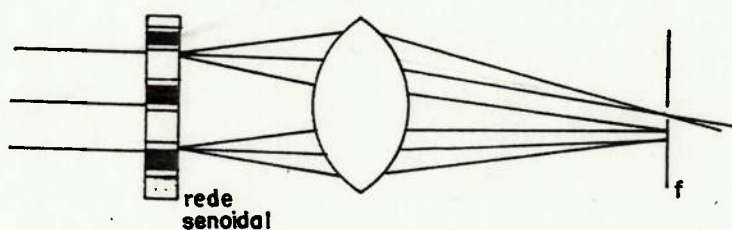
Para se fazer uso da holografia o feixe de um Laser necessita ser expandido. Por causa desta expansão pequenas partículas de sujeira ou imperfeições dos componentes ópticos gerarão grandes padrões de difração. Estes ruídos ópticos prejudicam seriamente a formação de interferogramas, sendo, portanto, necessária uma filtragem espacial.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.4 - Filtragem espacial: a) Onda plana de luz com direção axial incidindo em uma lente, b) Onda plana de luz com direção não axial incidindo em uma lente, c) Exemplo de filtragem espacial.

2.2 O PROCESSO HOLOGRAFICO

Holografia é uma técnica para gravar e reconstruir frentes de onda [2] [3] [5]. As ondas que devem ser gravadas são chamadas de RAIO OBJETO. Para reconstruir um facsímile do raio objeto é suficiente reproduzir sua amplitude complexa (U_o) em um plano do espaço. Uma vez reproduzida, a luz que se propaga para fora deste plano será idêntica ao raio objeto original. Para isto, a distribuição das amplitudes e fases no plano precisa ser gravada; contudo, filmes fotográficos ou qualquer outro detetor respondem somente à irradiância. Sendo a irradiância do objeto $I_o = U_o \cdot U_o^*$ (onde U_o^* é a amplitude complexa conjugada) uma grandeza real, a exposição fotográfica pode somente gravar a distribuição de amplitude. Logo a distribuição de fase se perderá.

Foi mencionado seção 2.1.1 que a interferometria pode ser usada para converter uma distribuição de fase em um padrão de irradiância, o qual pode ser registrado em um filme fotográfico. Esta é a base da invenção de Gabor.

Holografia é, portanto, a formação de um padrão de interferência pela adição de um RAIO DE REFERÊNCIA coerente ao raio objeto. Este padrão de interferência pode ser gravado em um filme fotográfico. Quando o filme, após ser revelado, é iluminado apropriadamente, ele difrata de tal maneira que a amplitude complexa U_o é reproduzida no plano do filme.

Analisa-se a seguir o caso mais geral, a holografia fora do eixo, cujo esquema é mostrado na Figura 2.5. O raio de referência utilizado em holografia fora do eixo se propaga em uma direção angular diferente da direção do raio objeto. A Figura 2.5a ilustra a formação de um holograma fora do eixo utilizando-se uma onda plana como raio de referência. As amplitudes complexas no plano do filme, $z=0$, são as seguintes:

$$\text{Raio Objeto} : U_o(x,y) = a_o(x,y) \exp[-i\phi(x,y)] \quad (2.21)$$

$$\text{Raio Referência: } U_r(x,y) = a_r(x,y) \exp[i2\pi f_y y], \quad (2.22)$$

onde:

$f_y = \sin\theta_r / \lambda$ frequência espacial do raio de referência.

No caso da holografia em linha, Figura 2.6, o raio de referência se propaga na mesma direção que o raio objeto. Logo, $\theta_r = 0$ e $U_r(x,y) = a_r(x,y)$.

No caso da holografia fora do eixo, a irradiância no plano do filme é dada por:

$$I(x,y) = |U_o + U_r|^2,$$

$$I(x,y) = |U_o|^2 + a_r^2 + a_r U_o \exp(-i2\pi f_y y) + a_r U_o^* \exp(i2\pi f_y y).$$

(2.23)

O filme é exposto ao padrão de irradiância, Equação (2.23). Depois é revelado sendo a amplitude de transmitância $t(x,y)$ proporcional a $I(x,y)$, ou seja:

$$t(x,y) = t_b + B[|U_o|^2 + a_r U_o \exp(-i2\pi f_y y) + a_r U_o^* \exp(i2\pi f_y y)],$$

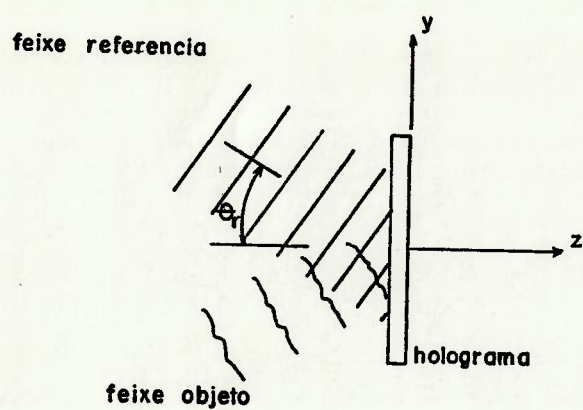
(2.24)

onde:

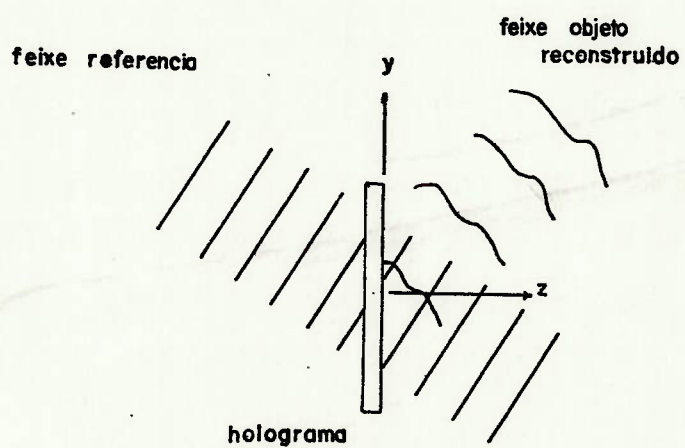
t_b é proporcional a a_r^2

B uma constante do filme.

Pela Equação (2.24) vê-se que o holograma consiste de um conjunto de franjas de interferência de frequência espacial f_y que são moduladas em amplitude por $a_o(x,y)$ e em fase por $\phi(x,y)$.



(a)



(b)

Figura 2.5 - Holografia fora do eixo: a) Formação de um holograma, b) Reconstrução de um holograma.

Para reconstruir o raio objeto o holograma é iluminado por uma onda plana que se propaga na mesma direção do raio de referência. Sua amplitude complexa no plano do holograma é:

$$U_e(x,y) = a_e(x,y)\exp(i2\pi f_w y). \quad (2.25)$$

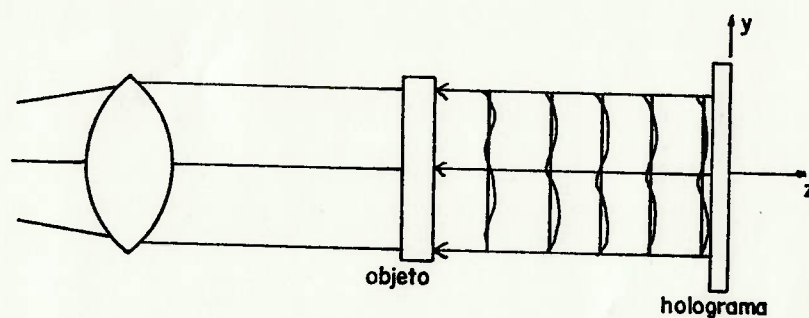
A amplitude complexa resultante da luz à direita do holograma, $z=0+$, é (utilizando a Equação (2.24)):

$$U_i = (t_b + B|U_o|^2)a_e \exp(i2\pi f_w y) + Ba_e a_r U_o + Ba_e a_r U_o^* \exp(i4\pi f_w y). \quad (2.26)$$

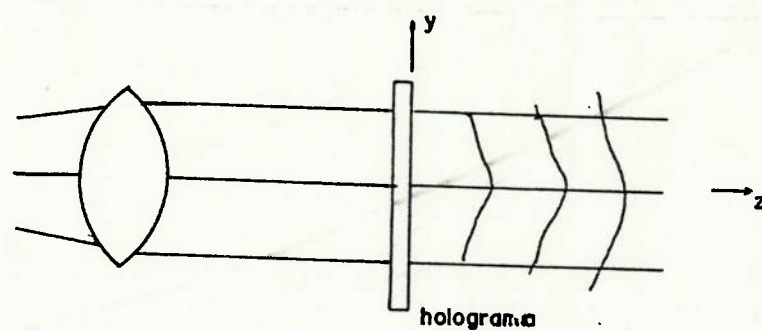
O primeiro termo da Equação (2.26) representa uma porção do raio de reconstrução que é transmitida pelo holograma com atenuação e alguma modulação na irradiância. O segundo termo representa uma onda difratada que é uma réplica do raio objeto original, Figura 2.5b. O terceiro termo representa uma onda que é a conjugada do raio objeto original.

A Figura 1.1 mostra um arranjo holográfico convencional para a realização da holografia fora do eixo. Utiliza-se um Laser cujo o raio é dividido em raio objeto e raio de referência por meio de um divisor de feixe. Estes raios são direcionados ao objeto e à emulsão fotográfica por meio de espelhos. Ambos os raios são expandidos por uma lente de curta distância focal e filtrados espacialmente por um pequeno orifício.

Para reconstruir o holograma, Figura 1.2, reposiciona-se a chapa holográfica na sua posição original e ilumina-se com o raio de referência. Um observador verá uma imagem realística em três dimensões do objeto, como descrito anteriormente.



(a)



(b)

Figura 2.6 - Holografia em linha: a) Formação de um holograma, b) Reconstrução de um holograma.

2.3 INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA.

O método da interferometria holográfica foi proposto em 1965 por diversos autores [2] [3].

O princípio da interferometria holográfica pode ser facilmente entendido. Suponha-se que um holograma após ter sido exposto e revelado é recolocado exatamente no mesmo local onde estava no momento da exposição. Iluminando o holograma com o feixe de referência e sem remover o objeto, e iluminando este último com o raio objeto, tem-se que as duas ondas se propagarão simultaneamente atrás do holograma: uma delas espalhada pelo objeto e a outra reconstruída pelo holograma. Esta última é uma réplica da onda espalhada pelo objeto durante a exposição do holograma. Estas ondas são coerentes e podem interferir.

Mudanças que ocorrem no objeto (por exemplo uma deformação) resultam numa distorção da fase entre a onda espalhada pelo objeto e a onda reconstruída pelo holograma. Franjas de interferência irão aparecer. As suas formas serão determinadas pelas mudanças que ocorreram no objeto.

Quando a observação do padrão de interferência é simultânea com as mudanças que ocorrem no objeto, este método é chamado de HOLOGRAFIA DE TEMPO REAL.

Quando dois hologramas correspondentes a dois estados distintos do mesmo objeto são consecutivamente gravados em uma mesma chapa holográfica, as duas ondas que existiram em diferentes momentos são reconstruídas simultaneamente e interferem entre si. Esta variação do método é chamada de HOLOGRAFIA DE DUPLA EXPOSIÇÃO.

Um método para a análise de vibrações de um objeto é a chamada HOLOGRAFIA DE TEMPO MÉDIO. A exposição do filme é bem maior que o período das oscilações do objeto. Ela registrará, então, em uma chapa holográfica o tempo médio das condições individuais predominantes das oscilações. Por exemplo, em uma oscilação senoidal de amplitude constante, a posição provável de maior permanência estacionária da

superfície do objeto será nos picos. Então, a luz refletida nesta condição predomina. Os pontos nodais não mudam de posição e, conseqüentemente, não há mudanças na fase da luz refletida, tendo estas áreas do holograma um brilho particular.

Suponha-se que uma onda de amplitude complexa $U_1(x,y)$ no plano do holograma é gravada no instante de tempo t_1 , em um arranjo holográfico fora do eixo como mostra a Figura 1.1. No instante de tempo t_2 uma segunda onda de amplitude complexa $U_2(x,y)$ é gravada na mesma chapa holográfica, sendo ambas as exposições feitas com o mesmo raio de referência $U_r(x,y)$. A amplitude do raio reconstruído será proporcional a $|U_1(x,y) + U_2(x,y)|^2$.

Nas aplicações de interferometria holográfica, $U_1 = U_o(x,y)$ representa a luz espalhada por um objeto e $U_2 = U_o'(x,y)$ representa a luz espalhada do mesmo objeto depois do mesmo ter sido, por exemplo, deformado.

Pequenas deformações do objeto afetam a fase de $U_o(x,y)$ assim:

$$U_o(x,y) = a(x,y)\exp[-i\phi(x,y)]$$

e

$$U_o'(x,y) = a(x,y)\exp\{-i[\phi(x,y) + \Delta\phi(x,y)]\}. \quad (2.27)$$

A irradiância da onda reconstruída, $I(x,y) = |U_o + U_o'|^2$, é dada por:

$$I(x,y) = 2 a^2(x,y) \{ 1 + \cos[\Delta\phi(x,y)] \}. \quad (2.28)$$

A Equação (2.28) representa a irradiância do objeto, $a^2(x,y)$, modulada pelo padrão de franjas $2\{1 + \cos[\Delta\phi(x,y)]\}$, onde contornos de franjas escuras aparecerão para valores constantes de $\Delta\phi$ que sejam múltiplos ímpares inteiros de π e franjas claras para valores que sejam múltiplos pares inteiros de π .

Em várias aplicações, $\Delta\theta$ pode ser relacionado com grandezas físicas tais como deslocamento, deformação, amplitude de vibração, temperatura, pressão, concentração de massa, etc.. A maneira pela qual $\Delta\theta$ é avaliado e relacionado com as grandezas físicas será discutida nos capítulos seguintes, em relação aos estudos de deslocamentos, deformações e vibrações.

CAPÍTULO III

AVALIAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

3.1 RELAÇÕES BÁSICAS ENTRE DESLOCAMENTOS E CONFIGURAÇÃO DAS FRANJAS.

3.1.1 INTRODUÇÃO

A interferometria holográfica tem muitas aplicações que requerem avaliações quantitativas dos padrões de franjas, especialmente no campo dos ensaios não destrutivos, da medicina, da metrologia e na análise experimental de estruturas.

Viu-se no capítulo anterior, que a distribuição de irradiância na frente de onda reconstruída de um holograma de dupla exposição é dada pela equação:

$$I(x,y) = 2|a(x,y)|^2[1+\cos\Delta\phi(x,y)],$$

onde $|a(x,y)|^2$ representa a amplitude da luz da imagem do objeto e o termo entre colchetes descreve a configuração das franjas; $\Delta\phi(x,y)$ é a mudança na fase óptica devida à mudança do caminho óptico entre as exposições quando o objeto, por exemplo, se deforma.

Foram desenvolvidos vários procedimentos para a determinação da mudança de fase pela análise dos padrões de franjas para relacioná-la com o vetor deslocamento dos pontos da superfície do objeto [6] [10] [17]. Eles serão descritos a seguir.

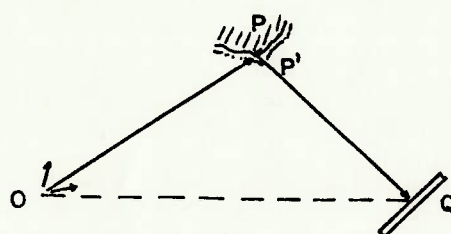
As primeiras tentativas na holografia de se relacionar o padrão de franjas com o vetor deslocamento foram feitas por Haines e Hildebrand [2] [6] [7]. No seu tratamento a superfície do objeto foi dividida em regiões planas infinitesimais. Uma teoria simplificada da difração

foi utilizada para determinar as componentes do vetor deslocamento.

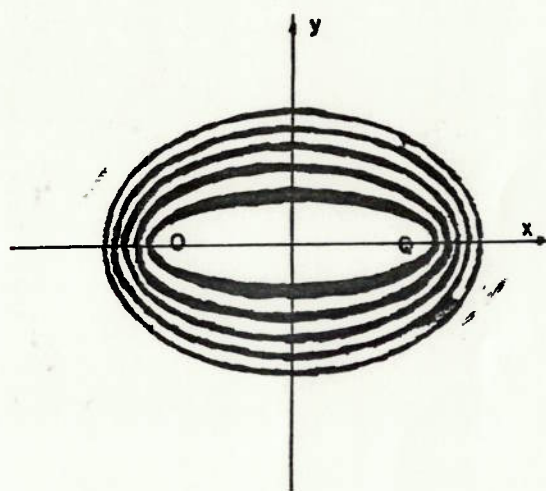
O holodiagrama constitui um outro conceito e também um dispositivo desenvolvido por Abramson [2] [3] [9], para descrever e avaliar hologramas interferométricos.

Qualquer dispositivo holográfico é equivalente ao mostrado na Figura 3.1a, onde Q é a fonte de luz (o Laser) P o ponto do objeto que espalha a luz em direção ao ponto Q sobre a chapa holográfica. A fonte envia, também, o raio de referência QQ para o ponto Q . O holodiagrama básico correspondente ao sistema da Figura 3.1a é mostrado na Figura 3.1b. As elipses são os lugares geométricos dos pontos para os quais a distância OPQ é constante. Para formar um interferograma, P é deslocado para uma nova posição P' . O holodiagrama resultante reconstrói a luz espalhada de P e P' , Figura 3.1c. Um observador olhando o ponto P através do holograma em Q receberá, simultaneamente, a luz que viaja pelos caminhos OPQ e $OP'Q$. Consequentemente, uma análise do padrão de franjas com a utilização do holodiagrama levará às componentes do vetor deslocamento.

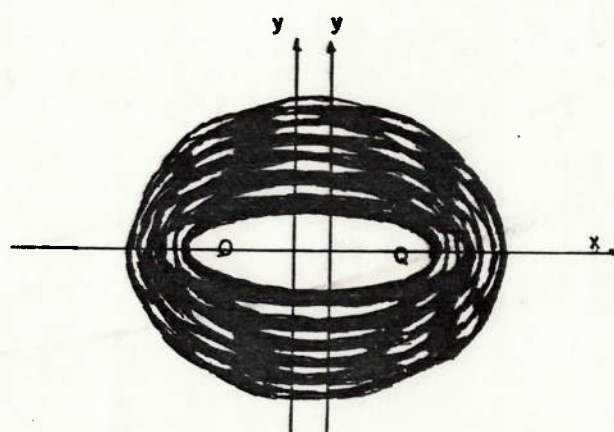
A técnica de holografia-moiré foi estudada principalmente por Sciammarella e Gilbert [10] [11] e por Schakner e Sirahi [12]. Este método é muito utilizado para se determinar as componentes do deslocamento no plano perpendicular ao plano de observação, geralmente coincidente com o plano tangente à superfície do objeto. Usam-se dois raios simétricos para iluminar o objeto, como mostra a Figura 3.2. Cada um dos raios atua independentemente para a formação de um padrão de franjas. Quando os raios iluminam simultaneamente as duas configurações de franjas, elas se somam ópticamente. O padrão de franjas formado pela superposição destes dois padrões é chamado PADRÃO DE MOIRÉ.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1 - Holodiagrama: a) Diagrama esquemático de um sistema holográfico, b) holodiagrama, c) holodiagrama resultante da luz espalhada por P e P'.

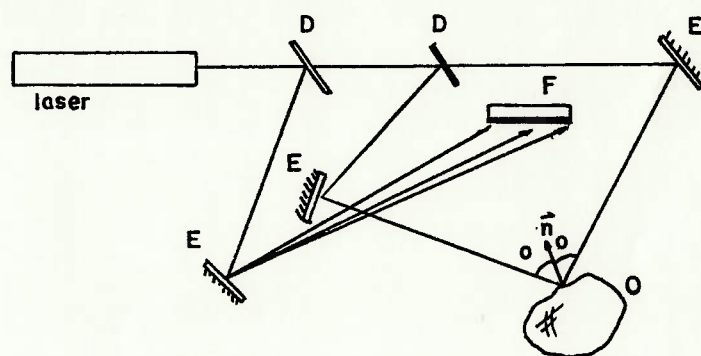


Figura 3.2 - Arranjo óptico para a realização da holografia-moiré.

Entre outros métodos para a determinação do vetor deslocamento, devido a sua importância para o desenvolvimento de sistemas optoeletrônicos para a análise de interferogramas, pode-se citar o método para análise de múltiplos hologramas com projeção da imagem real [13] [14] e os métodos optoeletrônicos de análise de interferogramas [2] [3] [15].

3.1.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO NESTE TRABALHO.

Descreve-se a seguir o método desenvolvido por Aleksandrov e Bruewich [16] e posteriormente generalizado por Sollid [17]. Este método será utilizado neste trabalho para a determinação do vetor deslocamento de diversos pontos de uma barra engastada. Trata-se de um método que apresenta bons resultados e pode ser realizado em um sistema convencional de holografia.

Se um ponto arbitrário, P , de um objeto sofre um deslocamento \vec{L} para uma posição P' , a luz espalhada por P e a luz espalhada por P' contribuem para a formação das franjas de interferometria holográfica. Conforme a Figura 3.3a, tem-se um objeto iluminado por uma fonte pontual Q . A luz espalhada pelo ponto P do objeto é observada através do holograma por um observador situado na posição Q . Foi feito um holograma de dupla exposição. Entre as exposições, o ponto P foi deslocado de \vec{L} . Um observador localizado em Q olhando através do holograma para o ponto P percebe que quando este é deslocado de \vec{L} resulta uma mudança d na fase da luz, que pode ser associada ao vetor deslocamento. A notação d é usada de preferência em lugar de $\Delta\phi(x,y)$; d representa a mudança de fase da luz espalhada por um ponto particular do objeto que foi deslocado em uma dada direção.

Na Figura 3.3b é definida uma série de vetores para se determinar a relação entre d e \vec{L} . Os vetores \vec{R}

e \vec{r}_1 pertencem ao plano definido por OPQ. \vec{k}_1 e \vec{k}_2 são os vetores de propagação da onda de luz que ilumina o ponto P e da luz espalhada em direção ao observador, respectivamente. As fases dos dois raios de luz que chegam ao observador são :

$$\phi_1 = \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \vec{k}_2 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_1) + \phi_r \quad (3.1)$$

$$\phi_2 = \vec{k}_3 \cdot \vec{r}_3 + \vec{k}_4 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_3) + \phi_r, \quad (3.2)$$

onde:

ϕ_1 fase da luz espalhada por P antes do deslocamento

ϕ_2 fase da luz espalhada por P após o deslocamento

ϕ_r fase da luz que parte da fonte O.

A diferença de fase medida pelo observador é:

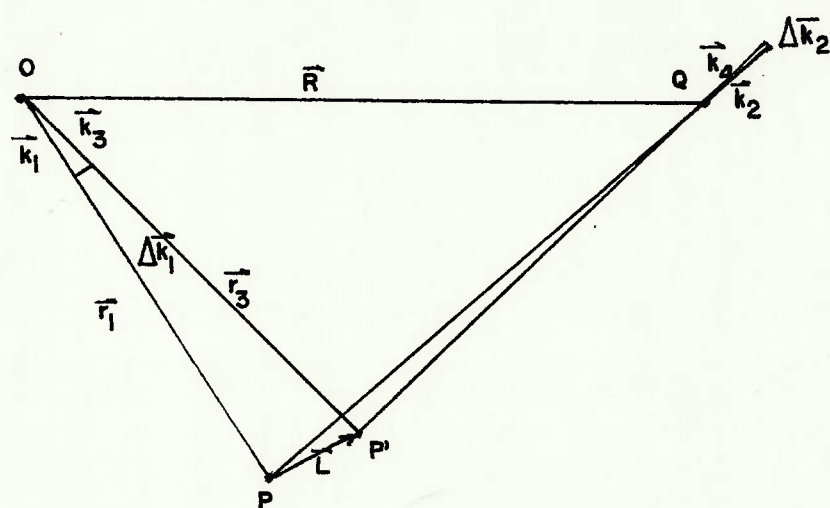
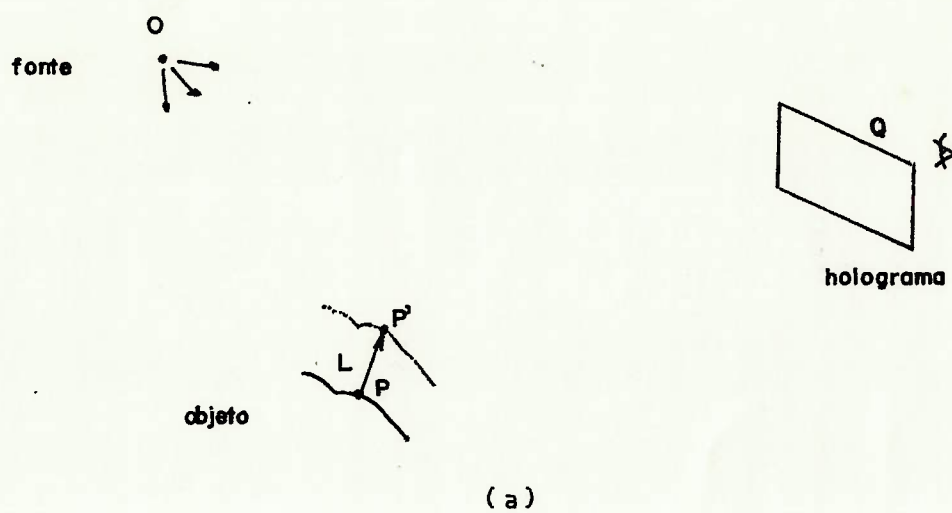
$$d = \phi_1 - \phi_2 \quad (3.3)$$

Deslocando P, os novos vetores de propagação na direção de iluminação e na direção de observação são \vec{k}_3 e \vec{k}_4 , respectivamente. Para pequenas mudanças, $\Delta\vec{k}_1$ e $\Delta\vec{k}_2$, nestes vetores de propagação tem-se:

$$\vec{k}_3 = \vec{k}_1 + \Delta\vec{k}_1 \quad \text{e} \quad \vec{k}_4 = \vec{k}_2 + \Delta\vec{k}_2. \quad (3.4)$$

Combinando-se as equações anteriores, tem-se:

$$d = (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot (\vec{r}_3 - \vec{r}_1) + \Delta\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_3 + \Delta\vec{k}_2 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_3). \quad (3.5)$$



(b)

Figura 3.3 - Relações básicas para a análise das franjas: a) Diagrama esquemático do sistema holográfico, b) Posição e vetores de propagação.

Como os módulos de \vec{r}_1 e \vec{r}_3 são muito maiores do que $L = |\vec{r}_3 - \vec{r}_1|$, tem-se para fins práticos $\vec{k}_1 \perp \vec{r}_3$ e $\vec{k}_2 \perp (\vec{R} - \vec{r}_3)$. Portanto, podemos simplificar a Equação (3.5) para:

$$d = (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{L} \quad (3.6)$$

Esta relação forma a base da interpretação quantitativa das franjas em interferometria holográfica.

Define-se o vetor sensibilidade como:

$$\vec{K} = \vec{k}_2 - \vec{k}_1 \quad (3.7)$$

então:

$$d = \vec{K} \cdot \vec{L} \quad (3.8)$$

Sendo o ângulo entre as direções de iluminação e de observação 2θ (Figura 3.4) e os módulos de \vec{k}_1 e de \vec{k}_2 iguais a $2\pi/\lambda$, então o vetor sensibilidade tem módulo igual a $2k\cos\theta$ e está situado na bissetriz entre o ângulo de iluminação e o ângulo de observação. Um simples exame do interferograma determina um valor de d que é uma medida da componente de \vec{L} nesta direção.

Primeiramente far-se-á uma análise simplificada na avaliação dos deslocamentos coplanares, que são aqueles em que o vetor deslocamento é conhecido e pertence ao plano OPQ. Tais deslocamentos possuem importância prática e, por este motivo os mesmos são medidos em holografia interferométrica. A Figura 3.5 mostra um caso particular de deslocamento coplanar onde:

$$d = 2kL\cos\theta\cos\gamma \quad (3.9)$$

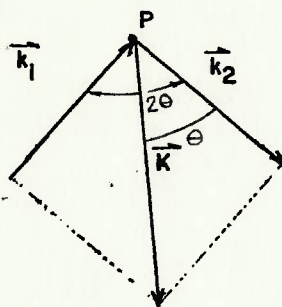


Figura 3.4 - Determinação gráfica do vetor sensibilidade.

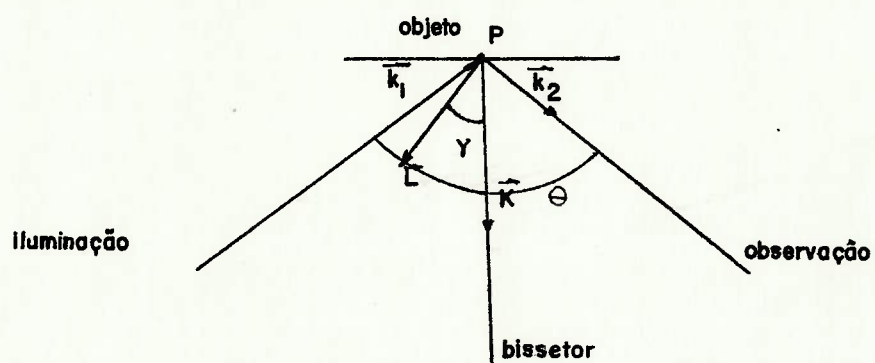


Figura 3.5 - Ilustração de um deslocamento coplanar.

Conhecendo-se "a priori" a direção de \vec{L} , a Equação (3.9) determina o módulo do deslocamento. Se essa direção não for conhecida, somente a componente paralela ao vetor sensibilidade é determinada.

A maneira pela qual se pode medir um vetor deslocamento em três dimensões é fazendo observações em locais diferentes do holograma; assim, determinam-se projeções do vetor deslocamento e compondo-as, tem-se o vetor deslocamento \vec{L} . Há dois modos de se fazer tal trabalho: pela análise de múltiplos hologramas e pela análise de um único holograma.

A análise de um único holograma é feita da seguinte maneira: se um observador se move continuamente de Q_1 para Q_2 , Figura 3.6, enquanto mantém fixo o seu olho no ponto P , as franjas parecerão estar cruzando o seu campo de visão. O número de franjas que ele vê cruzar o seu campo de visão é N_{12} ou seja a medida $d_1 - d_2$ pois $d_1 - d_2 = 2\pi N_{12}$. Com isto, a Equação (3.6) pode ser escrita, para os quatro pontos da Figura 3.6, como:

$$\begin{aligned} d_1 &= (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{L}, \\ d_2 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_1) \cdot \vec{L}, \\ d_3 &= (\vec{k}_4 - \vec{k}_1) \cdot \vec{L}, \\ d_4 &= (\vec{k}_5 - \vec{k}_1) \cdot \vec{L}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Subtraindo os pares de equações resulta:

$$\begin{aligned} d_1 - d_2 &= (\vec{k}_2 - \vec{k}_3) \cdot \vec{L}, \\ d_2 - d_3 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_4) \cdot \vec{L}, \\ d_3 - d_4 &= (\vec{k}_4 - \vec{k}_5) \cdot \vec{L}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Adotando-se um sistema de coordenadas retangulares, pode-se escrever um sistema de equações para determinar as componentes do vetor deslocamento \vec{L} , como:

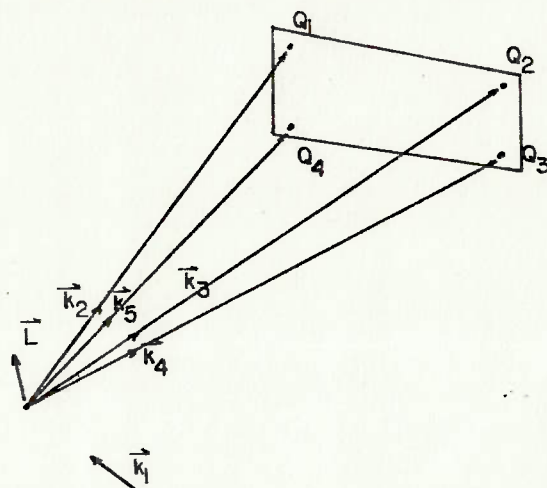


Figura 3.6 - Análise de um único holograma.

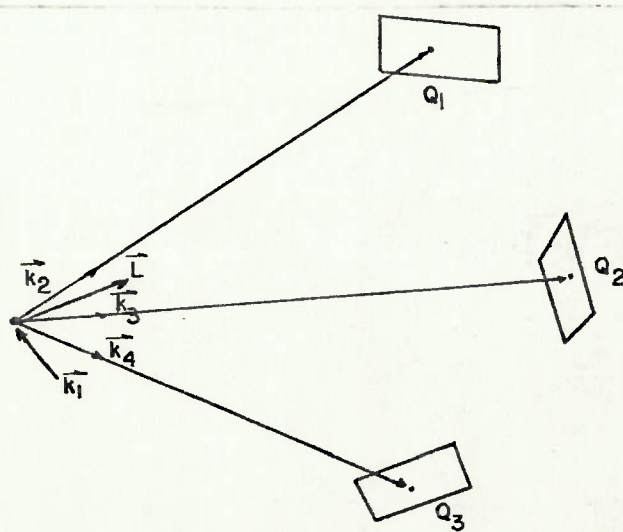


Figura 3.7 - Análise de múltiplos hologramas.

$$\begin{bmatrix} K_{1x} & K_{1y} & K_{1z} \\ K_{2x} & K_{2y} & K_{2z} \\ K_{3x} & K_{3y} & K_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = 2\pi \begin{bmatrix} N_{12} \\ N_{23} \\ N_{34} \end{bmatrix} . \quad (3.12)$$

Na análise de múltiplos hologramas, são feitos três diferentes interferogramas. As fases d_1 , d_2 , d_3 são medidas em três direções distintas de observação \underline{Q}_1 , \underline{Q}_2 , \underline{Q}_3 ou seja, uma observação em cada holograma. Para cada ponto de observação, \underline{Q}_n , é definido um vetor propagação, determinando-se o vetor de sensibilidade \vec{K}_n , Figura 3.7. Então, com procedimento análogo ao anterior chega-se a:

$$\begin{bmatrix} K_{1x} & K_{1y} & K_{1z} \\ K_{2x} & K_{2y} & K_{2z} \\ K_{3x} & K_{3y} & K_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = 2\pi \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} . \quad (3.13)$$

3.2 EQUAÇÃO PARA A INTERPRETAÇÃO DAS FRANJAS

Os métodos para a interpretação das franjas descritos no item 3.1 são severamente limitados pelo ângulo sólido que os pontos de observação do holograma fazem com o objeto, isto é, pela impossibilidade de se ver mudanças suficientes nos padrões de franjas de um ponto a outro no holograma. Isto influencia os resultados obtidos levando a erros significativos. Para sanar esta deficiência do método, Dhir e Sikora [18] propuseram uma técnica de análise simples e muito eficiente para avaliar as componentes cartesianas do vetor deslocamento de um holograma de exposição dupla. Este método é baseado no conceito introduzido por Aleksandrov e Bruewich [16]. A imagem virtual reconstruída do objeto é observada em diferentes partes do mesmo holograma, Figura 3.8. São a seguir determinadas as diferenças nos números de franjas contadas entre os pares de observações.

O método de Dhir e Sikora foi aprimorado por Sciammarella e Gilbert [19] e conclusões experimentais comparando os resultados com outros métodos foram realizadas por Pryputniewicz [7].

Teoricamente, o sistema de Equações (3.12) seria suficiente para determinar L_x , L_y , L_z . Contudo, o valor do determinante desta equação é muito pequeno, devido ao tamanho limitado da placa holográfica. Desse fato resultam erros significativos. Uma alternativa para contornar esse problema é gerar um sistema sobredeterminado de equações lineares relacionando a mudança do padrão de franjas com as três componentes desconhecidas do vetor deslocamento e obter o resultado pelo princípio dos mínimos quadrados [20].

A diferença de fase d é obtida pela observação da imagem virtual do holograma, Figura 3.8, e pode ser escrita como:

$$d_{1..m} = (\vec{K}_{2m} - \vec{K}_{12}) \cdot \vec{L} = G_{1..m}, \quad m = 2, 3, \dots, n \quad (3.14)$$

onde:

$G_{1..m}$ função que descreve a variação das franjas, ou seja, $G_{1..m} = 2\pi N_{1..m}$

n número total de observações

$N_{1..m}$ número de franjas que cruza o campo de visão.

Obviamente, independentemente de quantas observações forem feitas e dos cuidados tomados, sempre haverá erros inerentes às medidas. Consequentemente, a Equação (3.14) pode ser escrita da seguinte forma:

$$E_{1..m} = (\vec{K}_{2m} - \vec{K}_{12}) \cdot \vec{L} - G_{1..m}, \quad m = 2, 3, \dots, n, \quad (3.15)$$

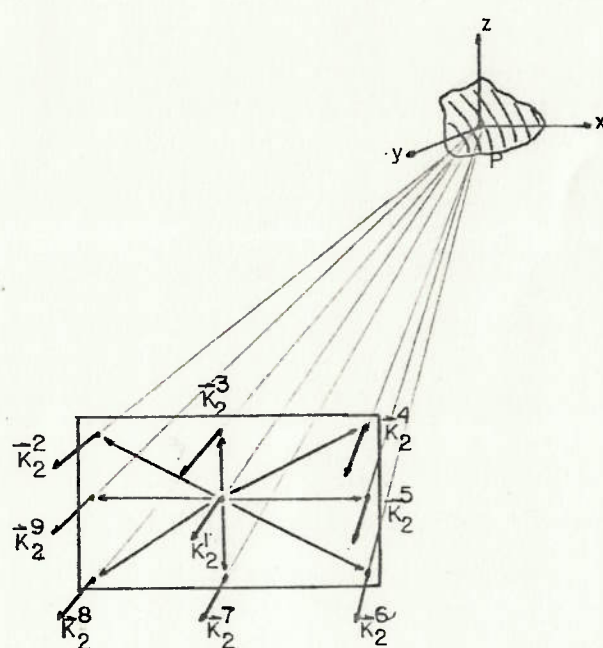


Figura 3.8 - Método de análise do holograma proposto por Dhir e Sikora [18].

onde:

$E_{1..m}$ erro entre o deslocamento real e o medido.

A importância desta análise está no ajustamento dos coeficientes da Equação (3.15) de tal forma a minimizar a soma de todos os quadrados dos erros, isto é:

$$\sum (E_{1..m})^2 = \sum [(\vec{K}_{2..m} - \vec{K}_{1..m}) \cdot \vec{L} - G_{1..m}]^2 \quad (3.16)$$

Para minimizar o quadrado do erro, $\sum (E_{1..m})^2$, as derivadas parciais da Equação (3.16), com relação às componentes do deslocamento, precisam ser nulas:

$$\partial / \partial L_i [\sum (E_{1..m})^2] = \partial / \partial L_i [\sum [(\vec{K}_{2..m} - \vec{K}_{1..m}) \cdot \vec{L} - G_{1..m}]^2] \quad (3.17)$$

$$i = x, y, z,$$

que resultará na seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta k_{2x}^{1..m} & \Delta k_{2y}^{1..m} & \Delta k_{2z}^{1..m} \\ \Delta k_{2x}^{1..m} & \Delta k_{2y}^{1..m} & \Delta k_{2z}^{1..m} \\ \Delta k_{2x}^{1..m} & \Delta k_{2y}^{1..m} & \Delta k_{2z}^{1..m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{1..m} \\ G_{1..m} \\ G_{1..m} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\text{onde: } \Delta k_{2x}^{1..m} = k_{2x}^m - k_{2x}^1, \quad \Delta k_{2y}^{1..m} = k_{2y}^m - k_{2y}^1, \quad \Delta k_{2z}^{1..m} = k_{2z}^m - k_{2z}^1.$$

O método descrito acima pode ser usado do seguinte modo. Decide-se o número de observações n a serem feitas através de um holograma simples e determina-se as direções dos vetores de observação. Assume-se um sinal de referência para o movimento das franjas no ponto de interesse do objeto e obtém-se as mudanças de franjas enquanto se move o olho do centro do holograma até o ponto de observação. Calcula-se, então as componentes de deslocamento pela Equação (3.18).

CAPÍTULO IV

AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES SUPERFICIAIS

4.1 AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES

Um problema para o qual a utilização da interferometria holográfica apresenta grandes vantagens é a avaliação das deformações de um objeto. Existem duas maneiras básicas para se avaliar as componentes de deformação a partir das componentes de deslocamento medidas: pela diferenciação dos dados dos vetores deslocamento e pela diferenciação óptica da distribuição das franjas.

A diferenciação dos dados dos vetores deslocamento pode ser feita de duas formas: diferenciação numérica direta pelo método das diferenças finitas e através da interpolação polinomial dos dados para posterior diferenciação analítica [2] [21].

A diferenciação óptica da distribuição das franjas pode ser feita, basicamente, de três formas: pela determinação da primeira e segunda derivadas do deslocamento pelo padrão de moiré formado pela superposição de duas transparências fotográficas de um holograma [2]; pela condição de localização da franja, isto é, a posição no espaço onde as franjas se localizam depende das derivadas do deslocamento [22]; e pela introdução do vetor franja para a determinação das deformações homogêneas [23].

Estas duas últimas formas citadas são as mais frequentemente utilizadas. Elas permitem determinar os elementos da matriz gradiente de deformação $[f_{ij}]$ que é dada por:

$$[f_{ij}] = \begin{vmatrix} du/dx & du/dy & du/dz \\ dv/dx & dv/dy & dv/dz \\ dw/dx & dw/dy & dw/dz \end{vmatrix} . \quad (4.1)$$

onde:

u, v, w componentes de deslocamento correspondentes às direções x, y, z .

As matrizes de deformação e de rotação são dadas respectivamente por:

$$[E_{ij}] = 1/2 \begin{vmatrix} 2E_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ G_{yx} & 2E_{yy} & G_{yz} \\ G_{zx} & G_{zy} & 2E_{zz} \end{vmatrix} \quad (4.2)$$

e

$$[\Theta_{ij}] = \begin{vmatrix} 0 & -w_x & w_y \\ w_x & 0 & -w_z \\ -w_y & w_z & 0 \end{vmatrix} . \quad (4.3)$$

Nessas expressões as componentes de deformação normal são dadas por:

$$\begin{aligned} E_{xx} &= du/dx , \\ E_{yy} &= dv/dy , \\ E_{zz} &= dw/dz , \end{aligned} \quad (4.4)$$

as componentes de deformação angular são dadas por:

$$\begin{aligned} G_{xy} &= du/dy + dv/dx , \\ G_{yz} &= dv/dz + dw/dy , \\ G_{zx} &= dw/dx + du/dz \end{aligned} \quad (4.5)$$

e as componentes de rotação w_x, w_y, w_z em relação a x, y e z , respectivamente, são dadas por:

$$\begin{aligned} w_x &= 1/2(dw/dy - dv/dz) , \\ w_y &= 1/2(du/dz - dw/dx) , \end{aligned}$$

$$w_z = 1/2(dv/dx - du/dy) . \quad (4.6)$$

Examinando as Equações (4.1) a (4.6) vê-se que uma vez determinada $[f_{ij}]$, a matriz $[E_{ij}]$ e a matriz $[\theta_{ij}]$ podem ser obtidas assim,

$$[E_{ij}] = 1/2([f_{ij}] + [f_{ij}]^T) , \quad (4.7)$$

$$[\theta_{ij}] = 1/2([f_{ij}] - [f_{ij}]^T) , \quad (4.8)$$

onde o índice T denota matriz transposta.

Na análise das deformações de uma barra engastada, como será descrito na parte experimental deste trabalho, as deformações resultantes da aplicação de um carregamento na ponta da barra são aproximadamente homogêneas sobre uma região do objeto, ou seja, não haverá regiões com concentração de tensão. Então, a teoria do vetor franja desenvolvida por Stetson [23] se aplica a este caso e será utilizada em preferência às outras por gerar bons resultados e poder ser realizada em um arranjo holográfico convencional. O seu desenvolvimento é apresentado a seguir [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30].

A função G que descreve o lugar geométrico das franjas sobre o objeto depende do vetor sensibilidade e do vetor que define as coordenadas da superfície do objeto. Sejam os vetores de iluminação e de observação dados por \vec{K}_1 e \vec{K}_2 , como mostra a Figura 4.1; define-se o vetor sensibilidade como: $\vec{K} = \vec{K}_2 - \vec{K}_1$. Então $G = \vec{K} \cdot \vec{L}$, sendo \vec{L} o vetor deslocamento de um ponto do objeto. Considera-se que o valor desta função, $G(\vec{K}, \vec{R}_p)$, lugar geométrico das franjas no ponto P sobre o objeto é conhecido. \vec{R}_p é o vetor da origem de um sistema de coordenadas ao ponto P . Então, a função lugar geométrico das franjas nas proximidades do ponto Q sobre o objeto $G(\vec{K}, \vec{R}_q)$ pode ser expressa, em termos de $G(\vec{K}, \vec{R}_p)$, por meio de uma expansão em série de Taylor. Considerando-se, somente, as variações de primeira ordem tem-se:

$$\begin{aligned}
G(\vec{K}, \vec{R}_Q) &= G(\vec{K}, \vec{R}_P + \Delta\vec{R}_{PQ}) \\
&= G(\vec{K}, \vec{R}_P) + \Delta X_{PQ} G^{XP} + \Delta Y_{PQ} G^{YP} + \Delta Z_{PQ} G^{ZP} \\
&= G(\vec{K}, \vec{R}_P) + (\Delta X_{PQ} \vec{i} + \Delta Y_{PQ} \vec{j} + \Delta Z_{PQ} \vec{k}) \cdot (G^{XP} \vec{i} + G^{YP} \vec{j} + G^{ZP} \vec{k}) \\
&= G(\vec{K}, \vec{R}_P) + \Delta\vec{R}_{PQ} \cdot \vec{K}_f, \quad (4.9)
\end{aligned}$$

onde:

G^{XP} , G^{YP} , G^{ZP} são as derivadas da função lugar geométrico das franjas em relação a X_P , Y_P , Z_P

$\Delta\vec{R}_{PQ}$ vetor do ponto P para o ponto Q

\vec{K}_f vetor franja no ponto P ;

$$\vec{K}_f = G^{XP} \vec{i} + G^{YP} \vec{j} + G^{ZP} \vec{k}, \quad (4.10)$$

onde $G(\vec{K}, \vec{R}_P)$ foi substituído por \underline{G} para simplificar.

O segundo termo do lado direito da Equação (4.9) descreve a variação da função lugar geométrico entre a observação do ponto P e a do ponto Q. Se as franjas estão, aproximadamente, igualmente espaçadas sobre esta região PQ do objeto, a variação da função lugar geométrico das franjas sobre aquela região pode ser descrita pelo produto escalar $\vec{K}_f \cdot \Delta\vec{R}_{PQ}$. Sobre a superfície do objeto, a função lugar geométrico das franjas pode ser definida pela expressão:

$$\begin{aligned}
G = \vec{K} \cdot \vec{L} &= (k_x \vec{i} + k_y \vec{j} + k_z \vec{k}) \cdot (L_x \vec{i} + L_y \vec{j} + L_z \vec{k}) \\
&= k_x L_x + k_y L_y + k_z L_z. \quad (4.11)
\end{aligned}$$

A Equação (4.11) pode ser diferenciada em relação a X_p , Y_p , Z_p , obtendo-se:

$$G^{xp} = k_x L_x x_p + k_y L_y x_p + k_z L_z x_p + k_x x_p L_x + k_y x_p L_y + k_z x_p L_z, \quad (4.12)$$

$$G^{yp} = k_x L_x y_p + k_y L_y y_p + k_z L_z y_p + k_x y_p L_x + k_y y_p L_y + k_z y_p L_z, \quad (4.13)$$

$$G^{zp} = k_x L_x z_p + k_y L_y z_p + k_z L_z z_p + k_x z_p L_x + k_y z_p L_y + k_z z_p L_z, \quad (4.14)$$

Substituindo as Equações (4.12) a (4.14) na Equação (4.10), tem-se:

$$\vec{K}_p = \{K\}[f] + \{L\}[g], \quad (4.15)$$

onde:

$\{K\}$ matriz coluna das componentes do vetor sensibilidade

$\{L\}$ matriz coluna das componentes do vetor deslocamento

$[f]$ matriz quadrada gradiente de deformação

$[g]$ matriz quadrada da variação linear do vetor sensibilidade.

Pela definição do vetor sensibilidade \vec{K} , a matriz $[g]$ pode ser subdividida em duas partes: $[g_1]$ e $[g_2]$, que descrevem a variação linear de \vec{K}_1 e \vec{K}_2 , respectivamente.

A matriz quadrada $[g_1]$ associada com o vetor de iluminação \vec{K}_1 pode ser obtida assim. Supõe-se que para uma dada geometria do sistema holográfico os vetores \vec{R}_p , \vec{R}_1 e \vec{R}_2 são conhecidos com relação à origem de um sistema de coordenadas como mostra a Figura (4.1). Sendo assim, o vetor de iluminação \vec{K}_1 pode ser expresso como:

$$\vec{K}_1 = k \frac{\vec{R}_p - \vec{R}_1}{|\vec{R}_p - \vec{R}_1|} = k \frac{(X_p - X_1)\vec{i} + (Y_p - Y_1)\vec{j} + (Z_p - Z_1)\vec{k}}{[(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2 + (Z_p - Z_1)^2]^{1/2}} = k\hat{K}_1, \quad (4.16)$$

onde:

$k = 2\pi / \lambda$ número de onda

..... comprimento de onda da luz do Laser

\hat{K}_1 vetor unitário ao longo da direção de iluminação.

O módulo do vetor entre o ponto P sobre o objeto e a fonte pontual de iluminação pode ser expresso como:

$$|\vec{R}_p - \vec{R}_1| = |\vec{R}_1| = R_1. \quad (4.17)$$

Tem-se que: $\vec{K}_1 = k_{x1}\vec{i} + k_{y1}\vec{j} + k_{z1}\vec{k}$. Então, da Equação (4.16) segue:

$$k_{x1} = k \frac{X_p - X_1}{R_1}, \quad k_{y1} = k \frac{Y_p - Y_1}{R_1}, \quad k_{z1} = k \frac{Z_p - Z_1}{R_1}. \quad (4.18)$$

Diferenciando a primeira das Equações (4.18) com relação a X_p resulta:

$$\begin{aligned} k_{x1}^{xp} &= \frac{dk_{x1}}{dX_p} = \frac{k}{R_1} - \frac{k(X_p - X_1)}{R_1^2} \frac{dR_1}{dX_p} \\ &= \frac{k}{R_1} - \frac{k(X_p - X_1)^2}{R_1^3} \\ &= \left(\frac{k}{R_1}\right) \left\{1 - \frac{1}{k^2} \left[\frac{k(X_p - X_1)}{R_1}\right]^2\right\} \\ &= \left(\frac{k}{R_1}\right) \left(\frac{1 - k_{x1}^2}{k^2}\right) = \frac{k^2 - k_{x1}^2}{kR_1}. \end{aligned} \quad (4.19)$$

O módulo de \vec{K}_1 pode ser expresso como:

$$|\vec{K}_1| = (k_{x1}^2 + k_{y1}^2 + k_{z1}^2)^{1/2} . \quad (4.20)$$

Usando-se a Equação (4.20) obtém-se, da Equação (4.19) a relação:

$$k_{x1} x_P = \frac{(k_{y1}^2 + k_{z1}^2)}{kR_1} . \quad (4.21)$$

Diferenciando as Equações (4.18) com relação a X_P , Y_P e Z_P , expressa-se da seguinte forma a matriz de variação linear do vetor \vec{K}_1 :

$$[g_1] = \frac{1}{kR_1} \begin{vmatrix} (k_{y1}^2 + k_{z1}^2) & -k_{x1}k_{y1} & -k_{x1}k_{z1} \\ -k_{y1}k_{x1} & (k_{x1}^2 + k_{z1}^2) & -k_{y1}k_{z1} \\ -k_{z1}k_{x1} & -k_{z1}k_{y1} & (k_{x1}^2 + k_{y1}^2) \end{vmatrix} . \quad (4.22)$$

De maneira análoga, a matriz de variação linear do vetor \vec{K}_2 pode ser avaliada como:

$$[g_2] = \frac{1}{kR_0} \begin{vmatrix} (k_{y2}^2 + k_{z2}^2) & -k_{x2}k_{y2} & -k_{x2}k_{z2} \\ -k_{y2}k_{x2} & (k_{x2}^2 + k_{z2}^2) & -k_{y2}k_{z2} \\ -k_{z2}k_{x2} & -k_{z2}k_{y2} & (k_{x2}^2 + k_{y2}^2) \end{vmatrix} . \quad (4.23)$$

onde:

$R_0 = |\vec{R}_2 - \vec{R}_P|$ módulo do vetor do ponto P ao ponto de observação.

Logo a matriz de variação do vetor sensibilidade \vec{K} é dada por:

$$[g] = [g_2] - [g_1] . \quad (4.24)$$

O vetor franja \vec{K}_r pode ser calculado a partir dos dados experimentais obtidos pela observação do holograma

[24] ou pela aplicação do método dos mínimos quadrados, que gera resultados mais precisos [28].

A função lugar geométrico das franjas pode ser definida pela Equação:

$$G(\vec{K}, \vec{R}_p) = \vec{K}_f \cdot \vec{R}_p + \vec{K} \cdot \vec{L}_t, \quad (4.25)$$

onde:

\vec{L}_t vetor de translação do objeto como corpo rígido.

O produto $\vec{K} \cdot \vec{L}$ é o deslocamento do objeto devido à sua deformação.

O vetor franja \vec{K}_f é perpendicular às laminas das franjas. Sendo o produto $\vec{K} \cdot \vec{L}$ uma constante, a Equação (4.25) expressa que as laminas das franjas serão planos paralelos equidistantes na região considerada.

Pode-se reescrever a equação acima para um número n de observações da seguinte forma:

$$G_m(\vec{K}, \vec{R}_p) = \vec{K}_f \cdot \vec{R}_{p_m} + N, \quad m = 1, 2, \dots, n, \quad (4.26)$$

onde:

$G_m(\vec{K}, \vec{R}_p)$ valor da função lugar geométrico das franjas do ponto P_m sobre o objeto

N número de franjas (devido ao movimento de corpo rígido) que teria sido avaliado se a franja de ordem zero pudesse ser identificada.

Obviamente, sempre haverá erros inerentes às medidas. Eles podem ser avaliados por:

$$E_m = (\vec{K}_f \cdot \vec{R}_{p_m} + N) - G_m, \quad (4.27)$$

onde:

E_m mede o erro entre o valor real e o valor medido da função lugar geométrico das franjas do m-ésimo ponto sobre o objeto.

Um conjunto de quatro equações do tipo da Equação (4.26) seria suficiente para determinar N e as componentes do vetor \vec{K}_r . Contudo, o valor do determinante do sistema de equações é pequeno, devido ao tamanho limitado da chapa holográfica e, conseqüentemente, isso faz com que ocorram erros de grande magnitude. Uma alternativa para se diminuir os erros é gerar um sistema sobredeterminado de equações e obter o resultado pela aplicação da teoria dos mínimos quadrados, o que resulta em:

$$\sum E_m^2 = \sum (k_{fx} X_{pm} + k_{fy} Y_{pm} + k_{fz} Z_{pm} + N - G_m)^2, \quad (4.28)$$

sendo:

$$\vec{K}_r = k_{fx} \vec{i} + k_{fy} \vec{j} + k_{fz} \vec{k} \quad (4.30)$$

e

$$\vec{R}_{pm} = X_{pm} \vec{i} + Y_{pm} \vec{j} + Z_{pm} \vec{k}.$$

Sendo $\sum E_m^2$ mínima, a derivada parcial da Equação (4.18) com relação a k_{fx} , k_{fy} , k_{fz} e N precisa ser zero, resultando na seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} k_{fx} \\ k_{fy} \\ k_{fz} \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum X_{pm}^2 & \sum X_{pm} Y_{pm} & \sum X_{pm} Z_{pm} & \sum X_{pm} \\ \sum Y_{pm} X_{pm} & \sum Y_{pm}^2 & \sum Y_{pm} Z_{pm} & \sum Y_{pm} \\ \sum Z_{pm} X_{pm} & \sum Z_{pm} Y_{pm} & \sum Z_{pm}^2 & \sum Z_{pm} \\ \sum X_{pm} & \sum Y_{pm} & \sum Z_{pm} & \sum 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sum G_m X_{pm} \\ \sum G_m Y_{pm} \\ \sum G_m Z_{pm} \\ \sum G_m \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

Rearranjando a Equação (4.15) tem-se :

$$\{K\}[f] = [K_f] - \{L\}[g] , \quad (4.30)$$

ou

$$\{K\}[f] = [K_{fc}] .$$

Como a matriz do vetor sensibilidade $\{K\}$, também tem valor pequeno para o determinante, é desejável usar o método dos mínimos quadrados e fazer-se mais do que três observações para se reduzir os efeitos de tais erros. Considera-se que várias observações foram feitas e que se determinou o vetor franja de um vetor de sensibilidade conhecido. Sabe-se que há uma diferença entre o vetor franja, determinado pela observação das franjas e o vetor franja como resultado da transformação do vetor sensibilidade. Chama-se o quadrado desta diferença de quadrado do erro E . Então:

$$\sum_m E^2 = \sum_m |[K_{fc}] - \{K\}[f]|^2 \quad (4.31)$$

onde \sum_m indica a somatória sobre o índice m , que por sua vez indica o número de observações. Observa-se que a matriz de transformação para a qual E é mínimo é dada por:

$$\partial E / \partial f_{ij} = 0 \quad (4.32)$$

donde resulta:

$$[f_{ij}] = [\sum_m K_{im} K_{jm}]^{-1} [\sum_m K_{im} K_{fcjm}] . \quad (4.33)$$

4.2 CALCULO DAS TENSÕES

Para que haja deformação de um objeto é necessário que se aplique uma tensão ao mesmo.

A elasticidade é o fenómeno que relaciona as deformações estáticas e elásticas, simultaneamente, com as tensões correspondentes. As primeiras permanecem constantes ao longo do tempo se as tensões correspondentes também permanecem constantes, desaparecendo integralmente no descarregamento.

Dependendo do tipo de material, a elasticidade pode ser linear e não linear. É vantajosa a utilização do método de interferometria holográfica na avaliação do módulo de elasticidade de materiais compostos [31].

O material que será utilizado na parte experimental deste trabalho apresenta isotropia elástica, isto é, os coeficientes que relacionam as deformações com as tensões não variam quando se muda o sistema de referência. Assim, todos os planos são planos de simetria. Neste caso, as constantes elásticas são duas e as relações tensão-deformação (S_{xx}) são as seguintes :

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \frac{E}{1+n} \left[e_{xx} + \frac{n}{1-2n} I \right] , \\ S_{yy} &= \frac{E}{1+n} \left[e_{yy} + \frac{n}{1-2n} I \right] , \\ S_{zz} &= \frac{E}{1+n} \left[e_{zz} + \frac{n}{1-2n} I \right] , \\ S_{xy} &= e_{xy} G , \\ S_{yz} &= e_{yz} G , \\ S_{zx} &= e_{zx} G , \end{aligned} \quad (4.34)$$

onde:

E módulo de elasticidade do material

n coeficiente de Poisson

G módulo de elasticidade transversal

I primeiro invariante do tensor das deformações.

S tensão no ponto.

e deformação no ponto.

CAPÍTULO V

ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES

Uma das mais interessantes aplicações da interferometria holográfica é a visualização e avaliação das vibrações mecânicas de um objeto. O desenvolvimento de métodos holográficos para o estudo de vibrações foi iniciado por Powell e Stetson em 1965 [2] [32] [33]. Eles mostraram que o holograma da exposição de uma superfície que vibra produz a imagem da superfície modulada por um sistema de franjas de interferência. As franjas mais claras coincidem com a região nodal, isto é, a porção do objeto que permanece estacionária durante a vibração. As outras franjas são contornos de amplitude de vibração constante.

A técnica para produzir um interferograma pela exposição de um holograma por um período de tempo durante o qual o objeto executa um movimento é denominada interferometria holográfica de tempo médio (item 2.3). O holograma grava, essencialmente, o tempo médio da amplitude complexa da luz espalhada pelo objeto no plano do holograma.

Considere-se uma barra engastada com uma de suas extremidades fixada em um bloco rígido. A barra é iluminada com uma onda plana movendo-se na direção $-z$, Figura 5.1. Se a barra está vibrando senoidalmente sobre uma posição de equilíbrio, o deslocamento de cada ponto é dado por:

$$z(x,t) = Z(x)\text{sen}\omega t, \quad (5.1)$$

onde:

$Z(x)$ a amplitude complexa de vibração no ponto x

ω frequência angular da vibração.

$U_{es}(x,y)$ representa a amplitude complexa da luz, no plano do holograma, que é espalhada pela barra engastada quando estacionária na sua posição de equilíbrio, ou seja:

$$U_{es}(x,y) = a(x,y)\exp[i\phi(x,y)] . \quad (5.2)$$

A luz percorre uma distância l_0 da fonte para um ponto estático sobre o objeto e daí ao observador. Ela percorrerá uma distância $(l_0 - 2Z(x)\text{sen}\omega t)$ enquanto o objeto estiver vibrando. A correspondente mudança de fase óptica é $\Delta\phi(x,y,t) = (2\pi/\lambda)2Z(x)\text{sen}\omega t$. Então, em qualquer instante de tempo, a amplitude complexa da luz no plano do holograma será:

$$U_o(x,y,t) = a(x,y)\exp\{i[\phi(x,y) + (4\pi/\lambda)Z(x)\text{sen}\omega t]\} . \quad (5.3)$$

Um holograma de tempo médio de um objeto vibrando é exposto por um período de tempo T . Quando este holograma é revelado e iluminado pelo raio de referência, a onda reconstruída terá uma amplitude complexa que é proporcional à média no tempo de $U_o(x,y,t)$, no período de exposição T , ou seja:

$$\begin{aligned} U_o(x,y,t) &= \frac{1}{T} \int_0^T a(x,y)\exp\{i[\phi(x,y) + (4\pi/\lambda)Z(x)\text{sen}\omega t]\} dt \\ &= U_{es}(x,y) \frac{1}{T} \int_0^T \exp[i(4\pi/\lambda)Z(x)\text{sen}\omega t] dt . \end{aligned} \quad (5.4)$$

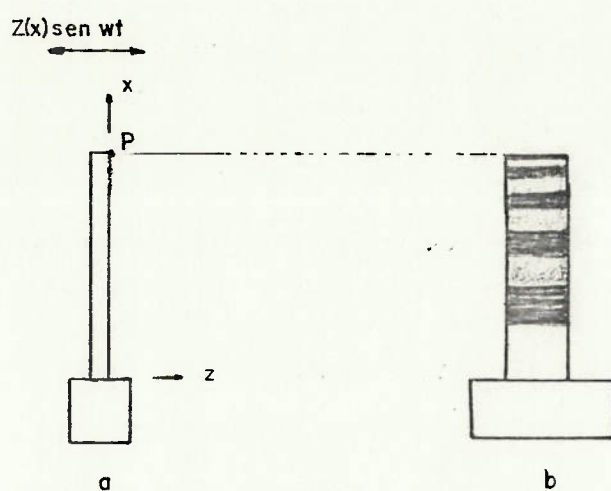


Figura 5.1 - Vibração de uma barra engastada: a) Vista lateral da barra; deslocamento na direção z e iluminação na direção $-z$, b) Padrão de franjas observado na superfície frontal da barra.

A integral de tempo médio na Equação (5.4) é chamada de FUNÇÃO CARACTERÍSTICA para vibração senoidal e é indicada por M_t . Então, a amplitude complexa da onda reconstruída é proporcional a $U_0(x,y)$. A irradiância e M_t são proporcionais a:

$$I(x,y) = |U_0|^2 |M_t|^2 = a^2(x,y) |M_t|^2. \quad (5.5)$$

A função característica para movimento senoidal pode ser facilmente avaliada. Se o tempo de exposição do holograma é comparativamente maior do que o período de vibração, $T \gg 1/\omega$, tem-se:

$$M_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \exp[i(4\pi/\lambda)Z(x)\sin\omega t] dt,$$

portanto

$$M_t = J_0[(4\pi/\lambda)Z(x)], \quad (5.6)$$

onde:

J_0 função de Bessel de primeiro tipo e ordem zero.

A correspondente irradiância é proporcional a:

$$I(x,y) = a^2(x,y) J_0^2[(4\pi/\lambda)Z(x)]. \quad (5.7)$$

A Equação (5.7) mostra que a imagem virtual é modulada por um sistema de franjas descrito pelo quadrado da função de Bessel de ordem zero. O quadrado dessa função é mostrado na Figura 5.2. As franjas escuras estarão centradas em cada ponto sobre o objeto, onde a amplitude de vibração $Z(x)$ é tal que a função de Bessel na Equação (5.7) é zero. A

Tabela 5.1 inclui os primeiros valores de J_0 para os quais $J_0(\xi)=0$.

A Figura 5.1b mostra o padrão de franjas obtido pela holografia de tempo médio da barra engastada. O ponto P , Figura 5.1a e 5.1b, está no centro da quinta franja escura. A amplitude de vibração no ponto P é dada por:

$$(4\pi/\lambda)Z(P) = J_0(5) = 14,9309 ,$$

assim

$$Z(P) = 1.188 \lambda .$$

Tabela 5.1 - Zeros da função de Bessel.

n	ξ_n	n	ξ_n
1	2,4048	11	33,7758
2	5,5200	12	36,9170
3	8,6537	13	40,0584
4	11,7915	14	43,1997
* 5	14,9305	15	46,3411
6	18,0710	16	49,4826
7	21,2166	17	52,6240
8	24,3524	18	55,7655
9	27,4934	19	58,9069
10	30,6346	20	62,0484

As experiências e as análises dos hologramas de tempo médio de uma barra engastada vibrando senoidalmente serão descritos no Capítulo VI.

Tendo-se introduzido o conceito de holografia de tempo médio em termos de vibração senoidal, pode-se definir de forma mais geral a função característica M_t . Os movimentos a serem considerados são aqueles para os quais o vetor deslocamento de cada ponto sobre a superfície do objeto pode ser expresso como produto do vetor deslocamento L com a função de tempo $f(t)$.

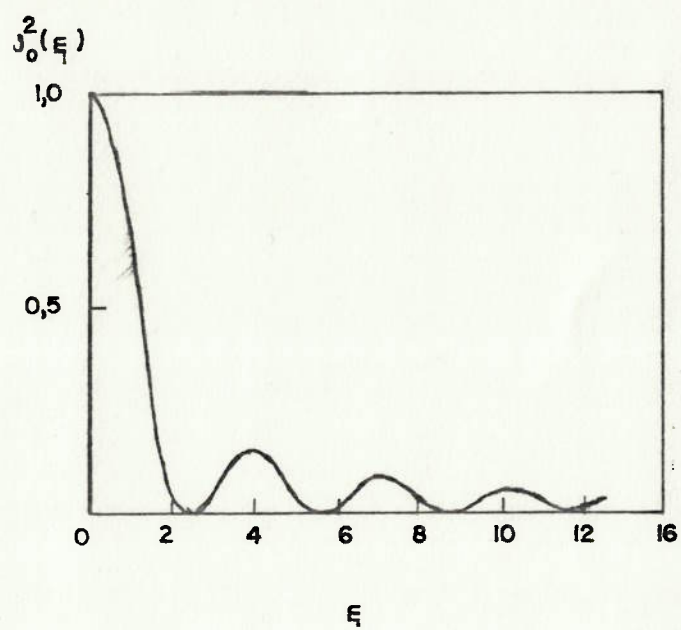


Figura 5.2 - Gráfico de $J_0^2(\xi)$, que é a função de franja para holografia de tempo médio para vibrações senoidais.

Se todos os pontos sobre a superfície do objeto movem-se de acordo com uma única função de tempo $f(t)$, a função característica pode ser escrita como:

$$M_t(\Delta\phi_m) = \frac{1}{T} \int \exp\{i[\Delta\phi_m(x,y) \cdot f(t)]\} dt, \quad (5.8)$$

onde:

ϕ_m mudança na fase óptica no plano do holograma correspondente à amplitude do deslocamento do objeto.

O padrão de franja observado quando qualquer ponto sobre a superfície do objeto é visto na imagem holográfica virtual é dado por:

$$I = |M_t(\vec{K} \cdot \vec{A})|^2 = \left| \frac{1}{T} \int \exp[i\vec{K} \cdot \vec{A} f(t)] dt \right|^2, \quad (5.9)$$

onde:

\vec{K} vetor sensibilidade

\vec{A} vetor amplitude de movimento no ponto considerado.

A Equação (5.9) é geral e pode ser aplicada a qualquer função do tempo, periódica ou não, como por exemplo, velocidade constante, aceleração constante, vibração harmônica, vibração harmônica amortecida, vibração não linear, etc..

Portanto, a determinação das componentes de deformação é feita de modo similar à do item 4.1, levando-se em conta que a função lugar geométrico das franjas não é mais cossenoidal e que o vetor deslocamento é função do tempo.

CAPÍTULO VI

ANALISE EXPERIMENTAL DE BARRAS ENGASTADAS

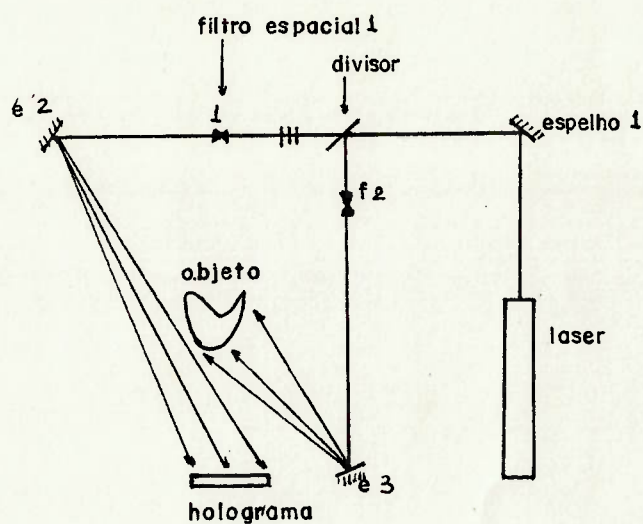
6.1 DESCRIÇÃO DO ARRANJO HOLOGRAFICO. PROCEDIMENTO PARA A FORMAÇÃO DE UM HOLOGRAMA.

O arranjo básico utilizado para a realização dos ensaios é mostrado na Figura 6.1. Os componentes ópticos são de fabricação da Rottenkolber G.M.B.H., Munique, Alemanha. O Laser emite o raio de luz em direção ao espelho (1) que o reflete ao divisor de feixe. O divisor de feixe divide o raio em feixe de referência e feixe objeto. Ambos os feixes são filtrados espacialmente e expandidos pelo filtro espacial (1), feixe de referência, e pelo filtro espacial (2), feixe objeto. Os feixes filtrados e expandidos são direcionados à chapa holográfica pelo espelho (2) e ao objeto pelo espelho (3). Entre o divisor de feixe e o filtro espacial do feixe de referência é colocado um atenuador, com atenuações de 95%, 50% e 25%. Combinações destes valores também podem ser utilizadas.

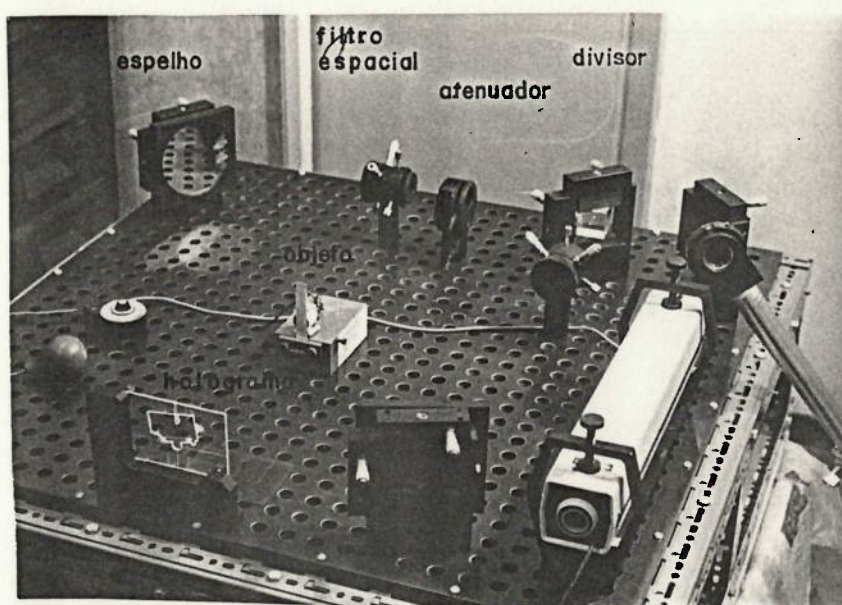
O Laser de He-Ne é de fabricação Spectra-Physics, modelo 120, que emite um feixe com comprimento de onda de 632,8 nm, linearmente polarizado no plano vertical com aproximadamente 2mm de diâmetro e potência nominal de 5 mW.

Para se controlar o tempo de exposição da chapa holográfica utiliza-se um obturador com controle eletrônico de exposição, Figura 6.1.

Para a obtenção de um holograma, a estabilidade mecânica da mesa é de importância fundamental. Isto é evidente pelo fato da holografia ser um registro de franjas de interferência. Se a fase relativa $\Delta\phi$ entre o feixe objeto e o feixe de referência mudar de apenas durante a exposição, haverá superposição das franjas de interferência destruindo-se a figura de interferência.



(a)



(b)

Figura 6.1 - Arranjo básico utilizado nesta tese: a) Esquema, b) Foto do arranjo.

Consequentemente, movimentos da ordem de um quarto do comprimento de onda e maiores devem ser evitados ($0,15 \times 10^{-4}$ cm).

Um sistema de isolamento de vibrações para a mesa de holografia foi projetado utilizando-se fibra de lã de vidro (em substituição ao sistema pneumático que anteriormente existia, e que não isolava de forma adequada) sendo que os resultados obtidos com o novo sistema satisfizeram plenamente, conforme foi constatado experimentalmente [36]:

Na realização de um holograma em tempo real, um porta chapa estável deve garantir a mesma posição da chapa na exposição e na reconstrução.

Durante o trabalho experimental a técnica de holografia de tempo real foi bastante utilizada. Devido à necessidade de economia de chapas holográficas, que possuem um tamanho padrão de 9×12 cm, elas foram cortadas em 8 pedaços menores ($1,5 \times 4,5$ cm) e um suporte de três pontos foi utilizado, Figura 6.2.

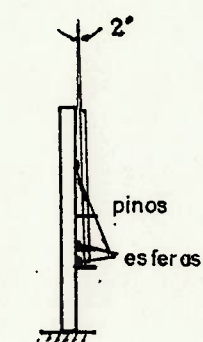
A escolha do filme para se obter holograma, também é muito importante. Uma das principais características do filme deve ser a sua resolução na frequência espacial do holograma. Um arranjo típico, como é mostrado na Figura 6.1, no qual o feixe de referência está inclinado de 30° em relação ao holograma (para comprimento da luz do Laser de He-Ne, $632,8$ nm) a frequência espacial é:

$$f = \frac{\sin \theta}{\lambda} = \frac{\sin 30^\circ}{632,8 \times 10^{-9}} = 790 \text{ linhas/mm}.$$

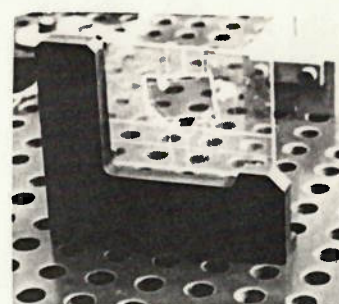
Este valor representa a mínima resolução possível para um sistema holográfico com $\theta = 30^\circ$.

A chapa utilizada para a realização dos ensaios holográficos foi a AGFA-GEVAERT tipo 10E75. Na Tabela 6.1 são dadas as características básicas de algumas emulsões.

Uma vez exposto o filme, o mesmo foi revelado com o seguinte procedimento :



(a)



(b)

Figura 6.2 - Suporte de três pontos para a realização de holografia de tempo real: (a) Esquema. (b) Foto do dispositivo.

Tabela 6.1 - Características principais de algumas emulsões fotográficas para holografia.

TIPO	Espessura (μm)	Resolução (linhas/mm)	Sensibilidade ($\mu\text{J}/\text{cm}^2$)	Comp.de Onda (nm)
KODAK				
649 F	17	2.000	70	632,8
120-02	6	2.000	30	632,8
AGFA GEVAERT				
8E75	7	5.000	10	632,8
10E75	7	2.800	5	632,8
8E56	7	5.000	15	478,0

(a) Revelação por 5 minutos em revelador Kodak D-19, com pequena agitação intermitente e lavagem em água corrente por 30 seg. a 20°C,

(b) Fixação de 5 minutos com fixador Kodak F-7,

(c) Lavagem por 10 minutos em água corrente,

(d) Secagem vagarosa na temperatura ambiente.

A distância percorrida pelo feixe de referência e a distância percorrida pelo feixe objeto a partir do filtro espacial devem ser as mesmas. A diferença entre elas não deve exceder o comprimento de coerência do Laser utilizado, que no caso é de aproximadamente 30 cm.

A relação de intensidades no plano do holograma entre o feixe de referência e o feixe objeto, dependendo do ensaio a ser realizado, deve estar compreendida entre 1:1 a 10:1.

Detalhes práticos sobre as aplicações rotineiras da holografia e da interferometria holográfica podem ser obtidos nas referências [37] [38] [39] [40].

6.2 ANALISE DOS DESLOCAMENTOS DE UMA BARRA ENGASTADA.

A teoria descrita no Capítulo III no que se refere à determinação dos deslocamentos estáticos é, neste capítulo, verificada experimentalmente utilizando-se uma barra engastada submetida inicialmente a um deslocamento unidirecional e a seguir a um deslocamento bidirecional.

6.2.1 ANALISE DE UMA BARRA ENGASTADA SUBMETIDA A UM DESLOCAMENTO UNIDIRECIONAL.

O dispositivo para se realizar a experiência de flexão da barra com o carregamento unidirecional é mostrado na Figura 6.3 e as dimensões principais da barra são dadas na Figura 6.4.

Aplica-se uma carga de 100g na extremidade oposta ao engastamento, Figura 6.3, e analisa-se o padrão de franjas.

Para a realização da experiência utilizou-se a técnica de exposição dupla. Expos-se uma chapa holográfica durante 3seg. com a barra em sua posição natural (sem carga) seguida de outra exposição de 3seg. com a barra carregada com a carga P de 100g. A relação de intensidade entre o feixe de referência e o feixe objeto foi de 5:1.

A chapa revelada foi recolocada em seu suporte e iluminada com o feixe de referência. Formou-se um padrão de franjas sobre a imagem virtual do objeto como mostra a Figura 6.5.

Como a superfície da barra é plana e paralela ao plano do holograma e a direção dos deslocamentos é normal a este plano, a interpretação das franjas é simples. Ela é descrita pela Equação (3.9).

$$d = 2kL\cos\theta\cos\gamma$$

onde $d=2\pi N$ e N é o número de franjas contado a partir do engastamento até o ponto considerado.

Logo, o deslocamento na direção (z) é dado por:

$$L_z(x) = \frac{N\lambda}{2\cos\theta\cos\gamma}$$

Os dados da experiência, na extremidade livre da barra, são:

$$x = 100,0 \text{ mm}$$

$$N = 24 \text{ franjas}$$

$$\theta = 22.5^\circ$$

$$\gamma = 22.5^\circ$$

$$\lambda = 632.8 \text{ nm,}$$

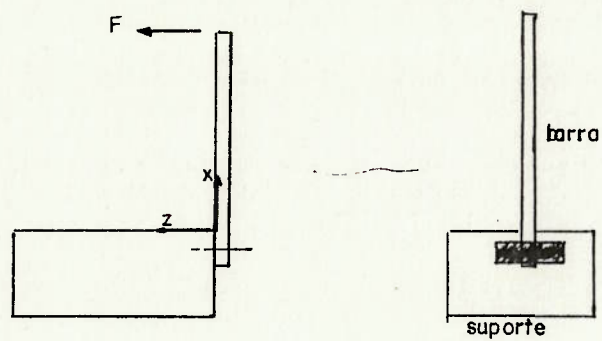


Figura 6.3 - Esquema do dispositivo utilizado para se realizar o estudo de flexão.

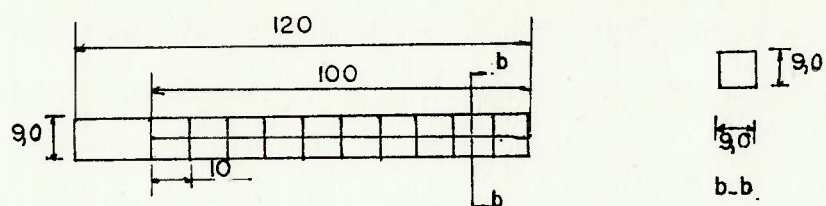


Figura 6.4 - Dimensões da barra utilizada neste estudo (mm).

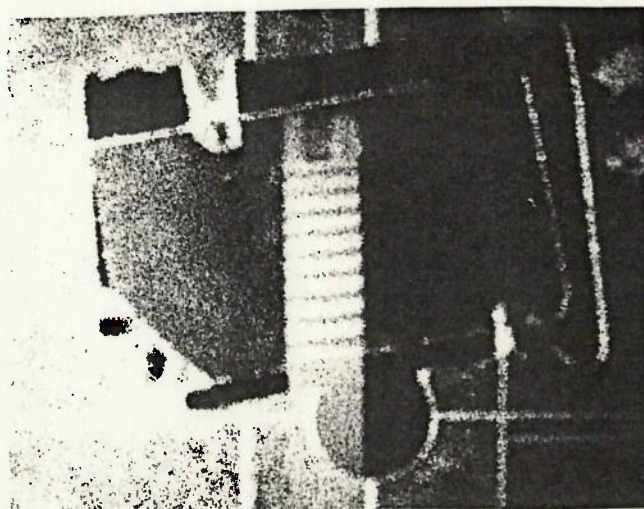


Figura 6.5 - Holograma de dupla exposição da barra engastada

Então; $L_{zt}(100,0) = 8,896E-3 \text{ mm}$.

Por outro lado, sabe-se da teoria da resistência dos materiais que o deslocamento teórico L_{zt} ao longo de uma barra como descrito anteriormente, é dado por:

$$L_{zt} = P. \frac{(x^3 - 2L^2x + 2L^3)}{3EI},$$

para a extremidade, $x=L$, tem-se:

$$L_{zt} = \frac{P.L^3}{3EI} .$$

onde:

E módulo de elasticidade

I momento de inércia.

Para o caso em questão tem-se:

$$P = 100,0 \text{ g}$$

$$E = 7000 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (material---> Alumínio)}$$

$$I = 546.8 \text{ mm}^4 .$$

$$L = 100 \text{ mm}$$

Logo: $L_{zt}(100) = 8.709E-3 \text{ mm}$.

Os resultados experimental e teórico diferem de 2,1%. Tal diferença pode ser devido a dois fatores básicos: a) a dificuldade para se avaliar os ângulos entre as direções de observação e iluminação e a não avaliação da fração de franja, b) a simplificação matemática na avaliação do cálculo teórico do deslocamento. Mesmo assim, pode-se observar que o processo holográfico apresenta bons resultados.

6.2.2 ANÁLISE DE UMA BARRA ENGASTADA SUBMETIDA A UM CARREGAMENTO BIDIRECIONAL.

Para o estudo da flexão bidirecional utilizou-se a mesma barra do experimento anterior, Figura 6.4. Para se fazer o ensaio montou-se o dispositivo que é mostrado na Figura 6.6. Há duas cargas aplicadas na barra, uma na direção z e outra na direção y . As cargas tem valores de 120,0g e 70,0g, respectivamente. Adotando-se o sistema de referência como mostrado na Figura 6.6, os pontos sobre o objeto e os pontos sobre o holograma possuem as coordenadas dadas nas Tabelas 6.2 e 6.3.

Primeiramente, fez-se o experimento em tempo real para se estudar a posição do objeto no que se refere à maximização da sensibilidade do vetor sensibilidade ao deslocamento imposto à barra.

As coordenadas dos pontos sobre o holograma e sobre o objeto foram determinadas em uma mesa de coordenadas tridimensional de medição XYZ, marca Mitutoyo modelo 231B.

A fotografia apresentada na Figura 6.7 mostra o arranjo holográfico e a Figura 6.8 mostra um holograma de dupla exposição da barra após a mesma ter sido carregada com cargas na direção z de 120 g e na direção y de 70 g.

Foi feita uma análise do holograma como mostra a Figura 3.6, utilizando-se uma máscara como na Figura 6.6. A barra engastada foi marcada longitudinalmente e transversalmente de 10 em 10 mm, com um risco preto, formando um padrão de quadros.

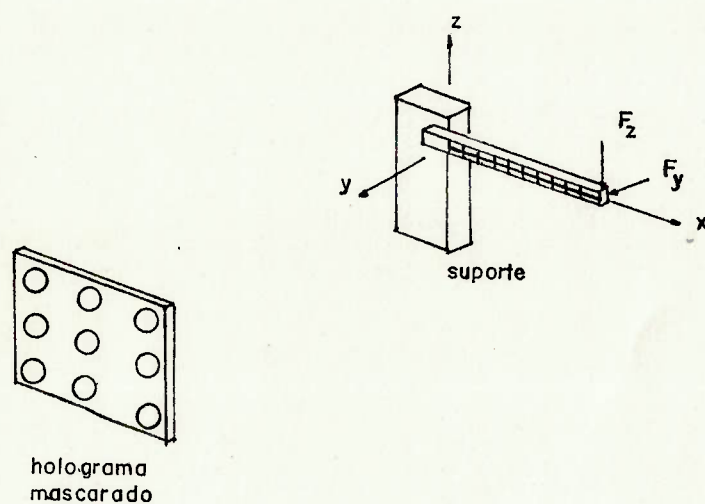


Figura 6.6 - Esquema do arranjo para se realizar o estudo de dupla flexão da barra engastada.

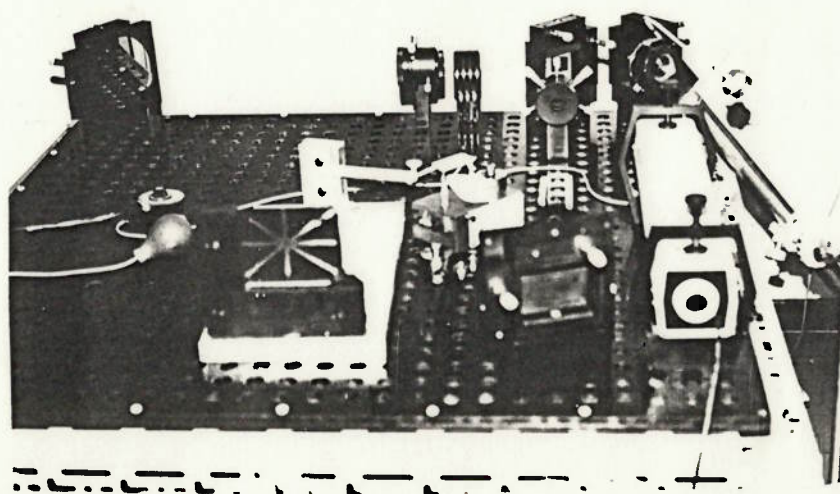


Figura 6.7 - Foto do arranjo holográfico.

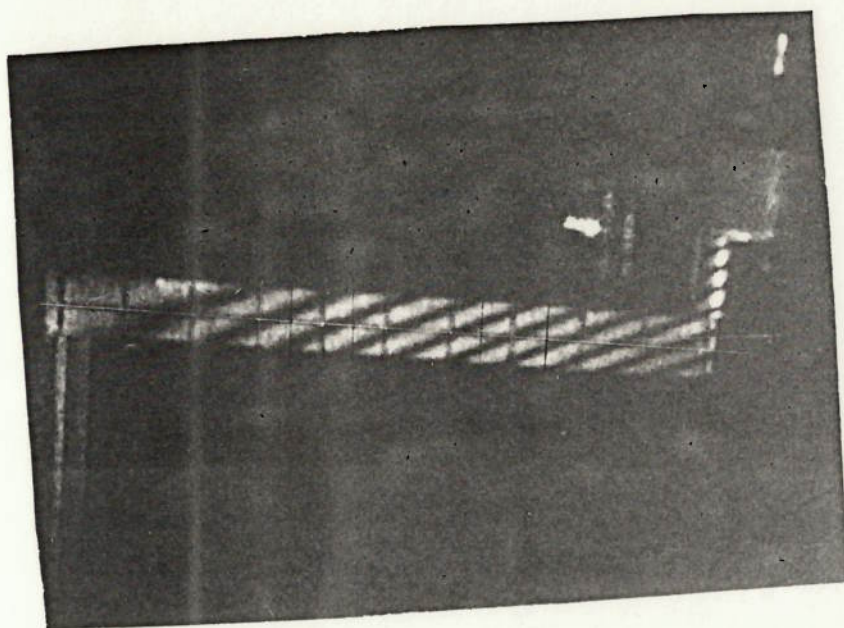


Figura 6.8 - Foto do holograma de dupla exposição.

Tabela 6.2 - Coordenadas dos pontos sobre o objeto (mm):

0	=	(	0,0	,	0	,	0)
1	=	(	10,0	,	0	,	0)
2	=	(	20,7	,	0	,	0)
3	=	(	31,2	,	0	,	0)
4	=	(	41,2	,	0	,	0)
5	=	(	51,4	,	0	,	0)
6	=	(	61,5	,	0	,	0)
7	=	(	71,2	,	0	,	0)
8	=	(	81,7	,	0	,	0)
9	=	(	91,4	,	0	,	0)
10	=	(	101,4	,	0	,	0)

Tabela 6.3 - Coordenadas dos pontos sobre o holograma (mm):

1	=	(	55,9	,	278,2	,	24,4)
2	=	(	12,7	,	291,9	,	61,1)
3	=	(	56,3	,	279,1	,	61,4)
4	=	(	105,4	,	265,1	,	60,7)
5	=	(	103,6	,	264,3	,	24,6)
6	=	(	97,9	,	266,0	,	- 5,9)
7	=	(	54,8	,	278,8	,	-11,8)
8	=	(	11,6	,	291,4	,	-11,8)
9	=	(	13,6	,	291,3	,	25,3)

Determinou-se o valor da função lugar geométrico das franjas sobre os pontos do objeto, Figura 6.6, tomando-se como referência a primeira franja do ponto de observação 1 sobre o holograma, como tendo valor 2, Figura 6.9a. Os valores da função lugar geométrico das franjas para os pontos 4, 6, 8 e 10 sobre o objeto em função dos pontos de observação de 1 a 9 sobre o holograma são dados na Tabela 6.4, os quais foram determinados através das Figuras 6.9a a 6.9i. A Tabela 6.5 apresenta o valor da variação da função lugar geométrico das franjas com relação a direção de observação 1.

Tabela 6.4 - Função Lugar Geométrico das Franjas

ponto objeto	Função Lugar Geométrico das Franjas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	3.54	4.45	4.39	4.33	3.39	3.25	2.96	3.25	3.69
6	5.55	6.98	6.93	6.95	5.44	5.10	4.49	4.75	5.75
8	7.91	9.70	9.67	9.93	7.96	7.39	6.41	6.47	8.19
10	10.3	12.5	13.6	12.7	10.1	9.40	8.29	8.35	10.4

Tabela 6.5 - Variação da Função Lugar Geométrico das Franjas com Relação à Direção de Observação 1

ponto objeto	Variação da Função Lugar Geométrico das Franjas							
	N_{12}	N_{13}	N_{14}	N_{15}	N_{16}	N_{17}	N_{18}	N_{19}
4	-0.91	-0.85	-0.79	+0.15	+0.29	+0.58	+0.29	-0.15
6	-1.43	-1.38	-1.40	+0.11	+0.45	+1.06	+0.80	-0.20
8	-1.79	-1.76	-2.02	-0.05	+0.52	+1.50	+1.44	-0.28
10	-2.20	-3.20	-2.40	+0.20	+0.90	+2.01	+1.95	-0.10

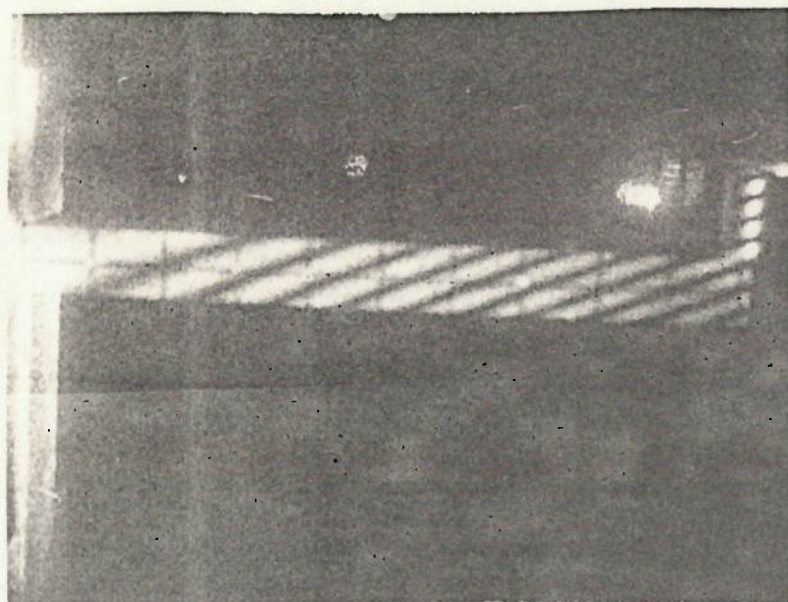


Figura 6.9a - Posição das franjas para a direção de observação 1.

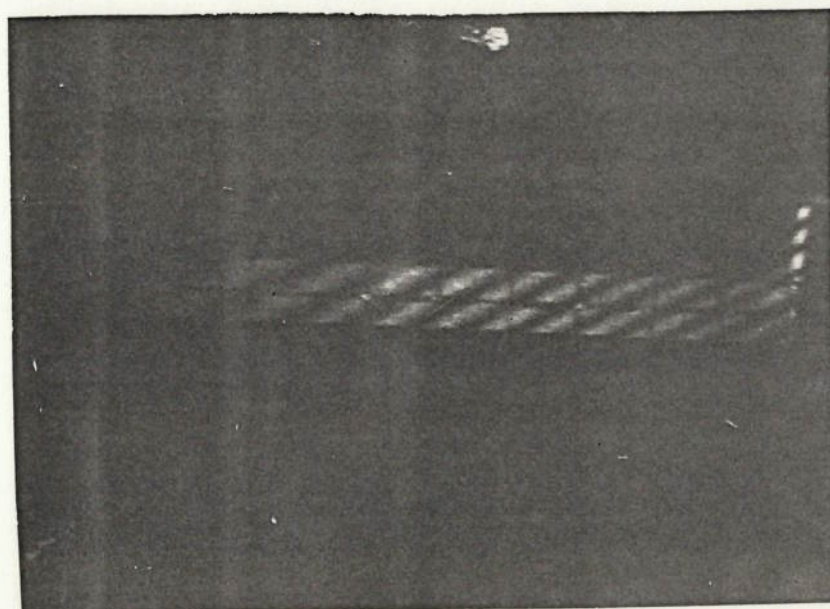


Figura 6.9b - Posição das franjas para a direção de observação 2.

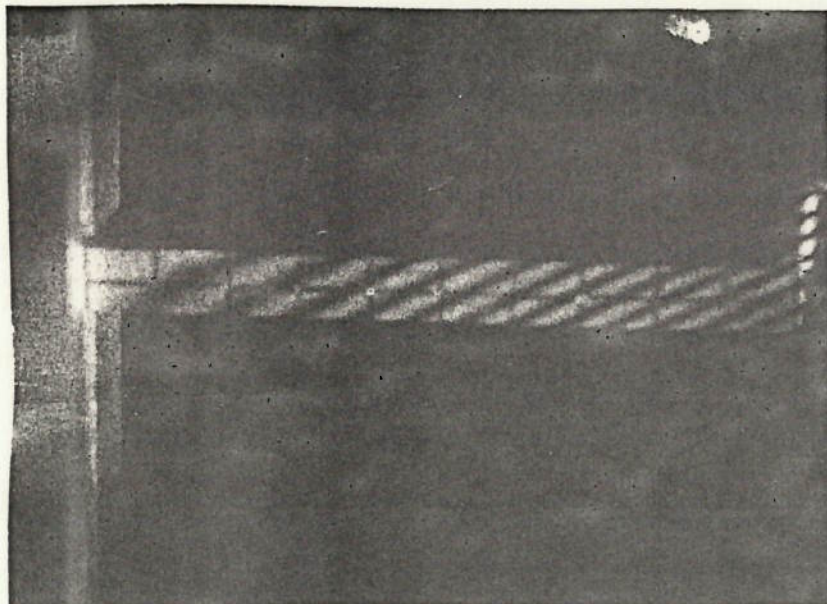


Figura 6.9c - Posição das franjas para a direção de observação 3.

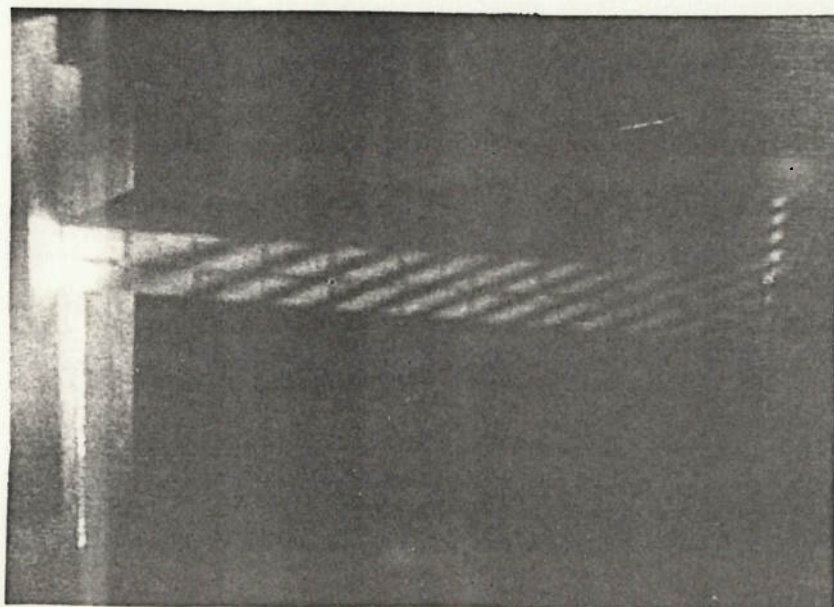


Figura 6.9d - Posição das franjas para a direção de observação 4.

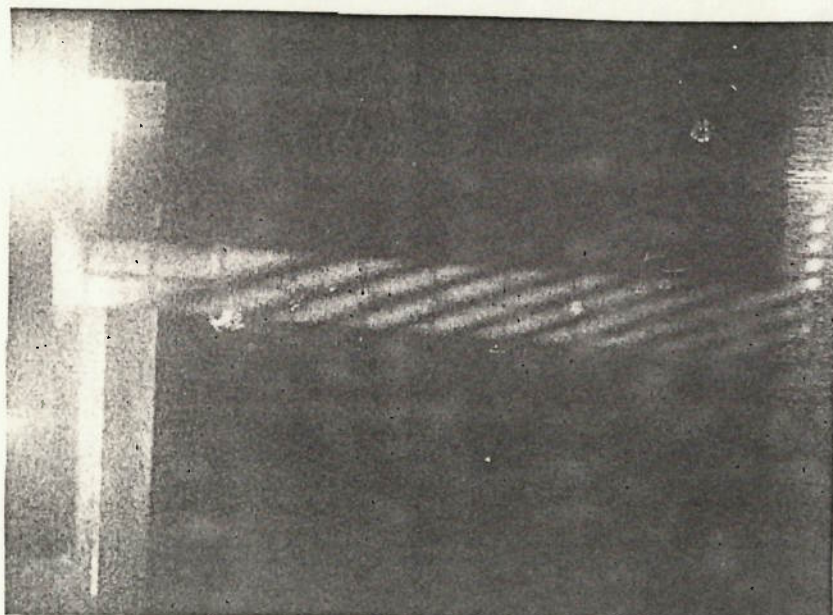


Figura 6.9e - Posição das franjas para a direção de observação 5.

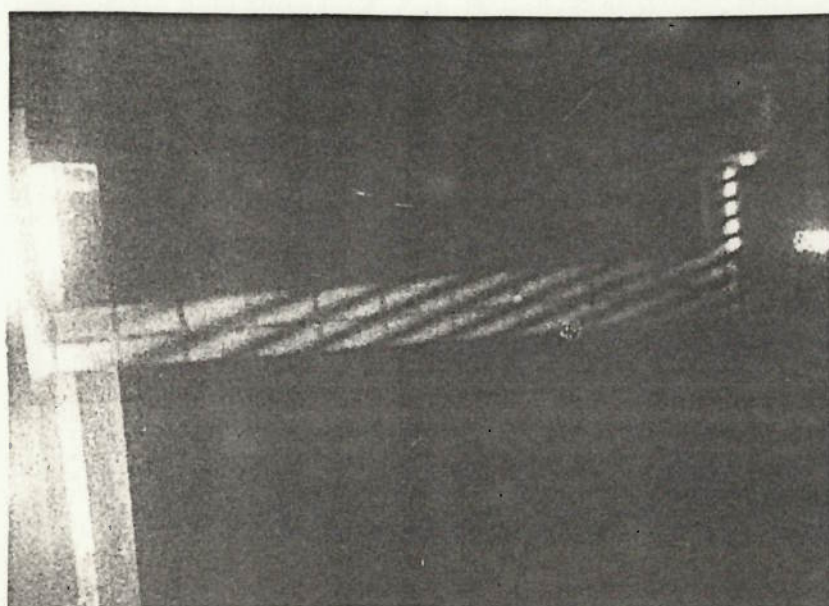


Figura 6.9f - Posição das franjas para a direção de observação 6.



Figura 6.9g - Posição das franjas para a direção de observação 7.

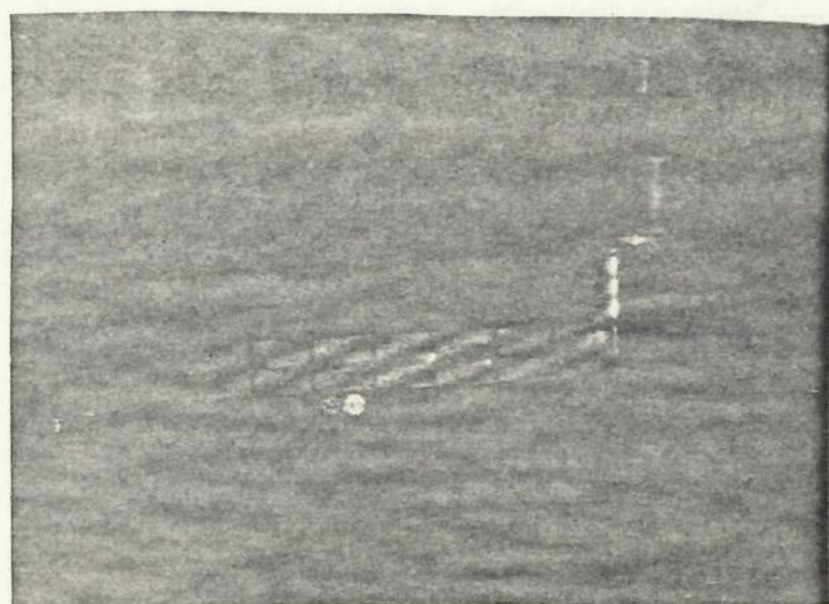


Figura 6.9h - Posição das franjas para a direção de observação 8.

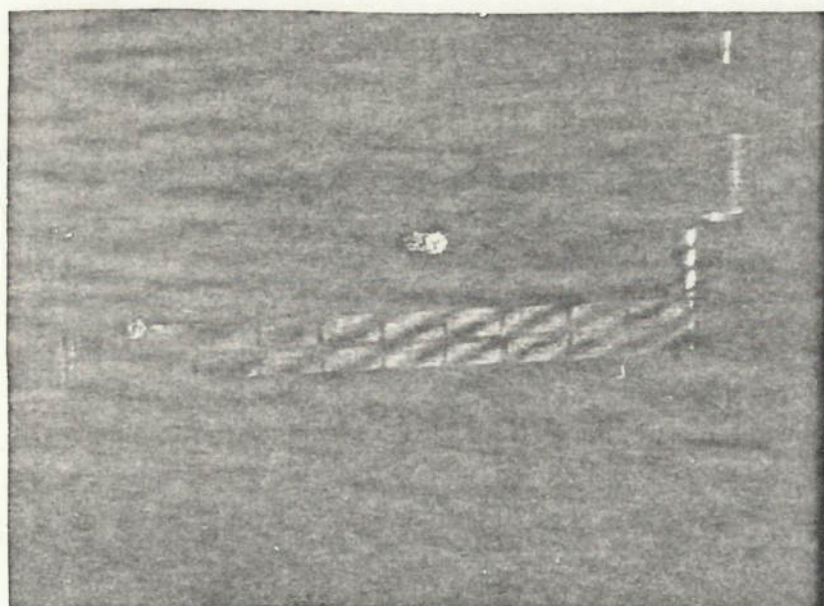


Figura 6.9i - Posição das franjas para a direção de observação 9.

Os dados da Tabela 6.5 foram computados para se resolver a Equação (3.18), obtendo-se para os pontos 4, 6, 8 e 10 do objeto, Figura 6.4, os deslocamentos nas direções y e z, dados na Tabela 6.6 :

Tabela 6.6 - Deslocamentos obtidos experimentalmente.

ponto objeto	Deslocamento (mm)	
	Y	Z
4	1,261E-3	2,546E-3
6	2,497E-3	4,867E-3
8	4,481E-3	6,865E-3
10	6,623E-3	9,997E-3

Analiticamente, temos para os pontos 4, 6, 8 e 10 do objeto os deslocamentos da Tabela 6.7:

Tabela 6.7 - Deslocamentos obtidos analiticamente.

ponto objeto	Deslocamento (mm)	
	Y	Z
4	1,330E-3	2,369E-3
6	2,273E-3	4,823E-3
8	4,428E-3	7,684E-3
10	6,273E-3	1,100E-2

Pode-se constatar que a variação entre o valor obtido pelo ensaio e o determinado analiticamente situa-se entre 10% e 0,1%.

Para se obter resultados significativos precisou-se levar em conta o deslocamento do suporte considerando a estrutura como um pórtico. A leitura das frações de franja foi feita com a ajuda de uma lupa graduada que permitiu a leitura de décimos de milímetro. Portanto, tomando-se alguns cuidados pode-se obter bons resultados com método.

6.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES SENOIDAIS DE UMA BARRA ENGASTADA.

A interferometria holográfica foi aplicada pela primeira vez ao estudo de superfícies vibrantes em 1965 quando Powell e Stetson [32] [33] fizeram uma série de hologramas de uma chapa fina em vibração. Esses autores, desenvolveram as técnicas de holografia de tempo médio e de determinação de frequências naturais utilizando a holografia de tempo real. Em 1968, Archbold e Ennos [41] introduziram a utilização de um estroboscópio na holografia em tempo real, permitindo o estudo de qualquer ponto de interesse durante o ciclo de vibração bem como possibilitando o estudo de maiores amplitudes de vibração.

Quando se usa a interferometria holográfica de tempo real, aparecerão inevitavelmente entre a exposição e a reconstrução franjas de interferência devidas a movimentos relativos entre o objeto e a chapa fotográfica. Ao invés de se tentar anular estas franjas iniciais, como usualmente é feito, pode-se tirar vantagens desta situação. Uma rotação mecânica da imagem virtual forma um conjunto de franjas paralelas. Se o objeto está vibrando numa frequência de ressonância, as franjas geradas permanecerão inicialmente estacionárias e visíveis nas linhas nodais, enquanto que, no restante, o padrão se apresentará "lavado". As linhas nodais, então, são visíveis e consistem de pequenos segmentos do padrão inicial de franjas. Desta forma, determina-se as frequências de ressonância e um holograma de tempo médio pode ser gravado para se ter noção do modo de vibração [42] [43] [44] [45].

O arranjo usado nesta tese para o estudo qualitativo de uma barra engastada vibrando senoidalmente é mostrado na Figura 6.10. A barra utilizada é uma chapa fina de aço excitada por uma bobina acoplada a um gerador de frequências, através de um amplificador Figura 6.11 e Figura 6.12. Um frequencímetro é ligado ao gerador.

Foi feito um holograma do objeto em repouso. Após revelado o holograma foi recolocado em sua posição original. Iluminando-se, simultaneamente, o objeto e o holograma deslocou-se levemente o espelho do feixe de referência para produzir um padrão de franjas sobre a barra, Figura 6.13. Colocou-se o objeto para vibrar e conforme a variação da frequência de ressonância observava-se o comportamento do padrão de franjas iniciais. Foram notadas frequências naturais devido à possibilidade de visualizar as linhas nodais, Figura 6.14. Posteriormente, foram feitos hologramas de tempo médio Figura 6.15, onde se pode visualizar as frequências de ressonância da barra engastada.

Para a análise dinâmica foi feita apenas uma avaliação qualitativa das frequências naturais. A principal dificuldade residiu na obtenção de um gerador de frequências adequado. Devido a baixa potência do Laser, houve dificuldade para a visualização das regiões nodais em tempo real para posterior execução de um holograma de tempo médio.

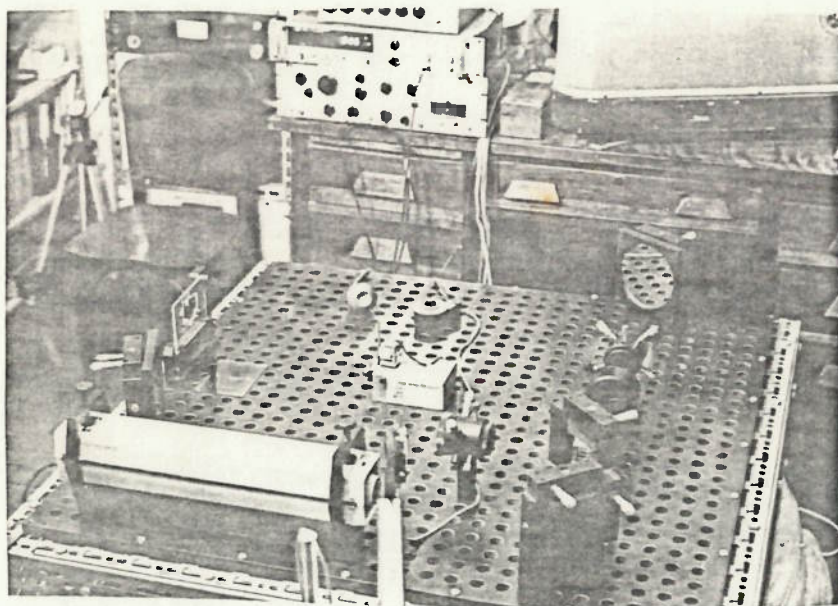


Figura 6.10 - Arranjo Experimental.

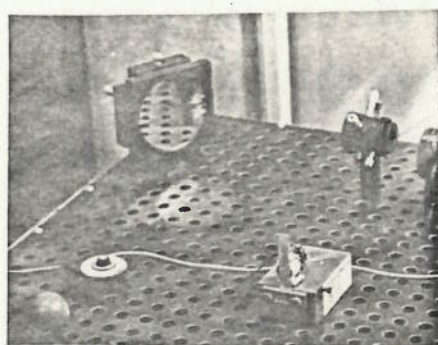
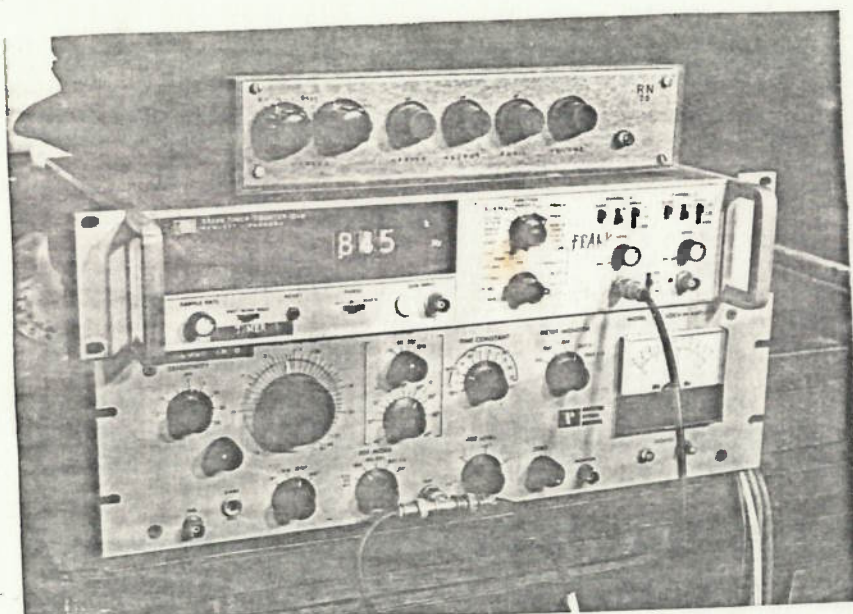


Figura 6.11 - Barra e suporte utilizado para o ensaio.



amplificador

leitor

gerador

Figura 6.12 - Equipamento gerador, leitor e amplificador de sinais.

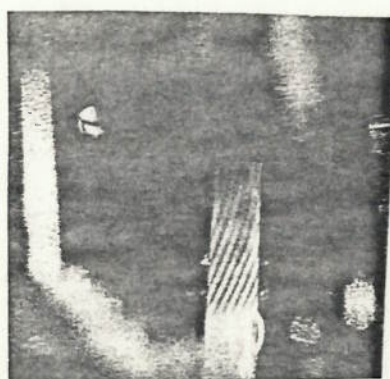
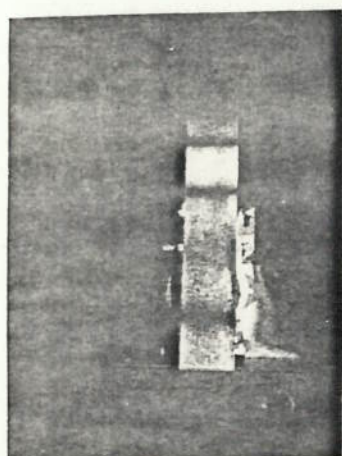


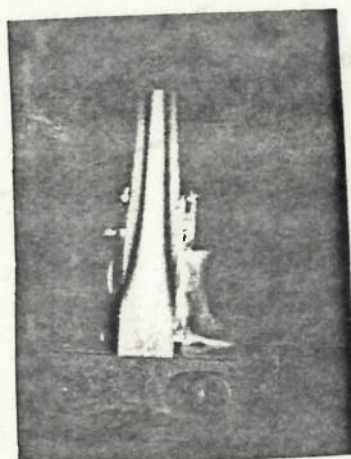
Figura 6.13 - Padrão de franjas gerado sobre a barra.



Figura 6.14 - Visualização de uma linha nodal.



(a)



(b)

Figura 6.15 - Hologramas de tempo médio: (a) 54 hz, (b) 255 hz.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTUDO REALIZADO.

A avaliação quantitativa dos hologramas pelo padrão de franjas formado na sua reconstrução é um problema de considerável interesse no campo da interferometria holográfica e foi resolvido de diversos modos.

Neste trabalho, utilizou-se para a determinação dos deslocamentos o método desenvolvido por Aleksandrov e Bruewich [16] e aprimorado por Dhir e Sikora [18]. Este método segundo os resultados publicados por Pryputniewicz e Bowley [7] é o que apresenta os melhores resultados, além de poder ser aplicado sem grandes dificuldades. Pode-se observar pelos resultados obtidos no item 6.2 que o método apresenta resultados muito bons quando comparado com a teoria.

Para a determinação das componentes de deformação sobre um ponto na superfície de um objeto utiliza-se a teoria desenvolvida por Stetson [23]. Esta teoria baseia-se no conceito do vetor franja que permite a obtenção de bons resultados quando a deformação pode ser suposta como homogênea sobre uma região suficientemente grande do objeto. Esta técnica é chamada de método do vetor franja na análise de deformações por reconhecer que qualquer combinação de deformação e rotação homogênea gera um padrão de franjas sobre a superfície do objeto, que pode ser descrito por um simples vetor.

Se o objeto sofre uma deformação e/ou uma rotação homogênea durante a obtenção do holograma, então, na sua reconstrução, o objeto estará coberto por um padrão de franjas que parecerá ter sido gerado por um conjunto de planos paralelos equidistantes, intersectando a superfície

do objeto. O vetor franja é definido como um vetor que tem a direção normal ao lugar geométrico dos planos, o sentido do número crescente de franjas e o módulo inversamente proporcional ao espaçamento entre estes planos.

Esta técnica permite a determinação das componentes de deformação, não importando se o objeto a ser estudado é uma simples barra ou uma complicada palneta de uma turbina construída com um material exótico.

A única restrição da teoria do vetor franja é que, no seu atual estágio de desenvolvimento, ela manipula somente as franjas moduladas por variações lineares das geometrias de observação e de iluminação. Para contornar essa restrição é necessário estender-se a teoria para incluir variações de segunda ordem da função lugar geométrico das franjas. Isto é, deve-se levar em conta a curvatura das superfícies do lugar geométrico das franjas e as variações nos seus espaçamentos, Figura 7.1. Objetos deformados de maneira não homogênea podem então ser estudados e, ao invés de se obter a média das deformações em uma dada região do objeto, obtém-se uma média do valor do vetor franja e o valor da deformação no ponto em estudo.

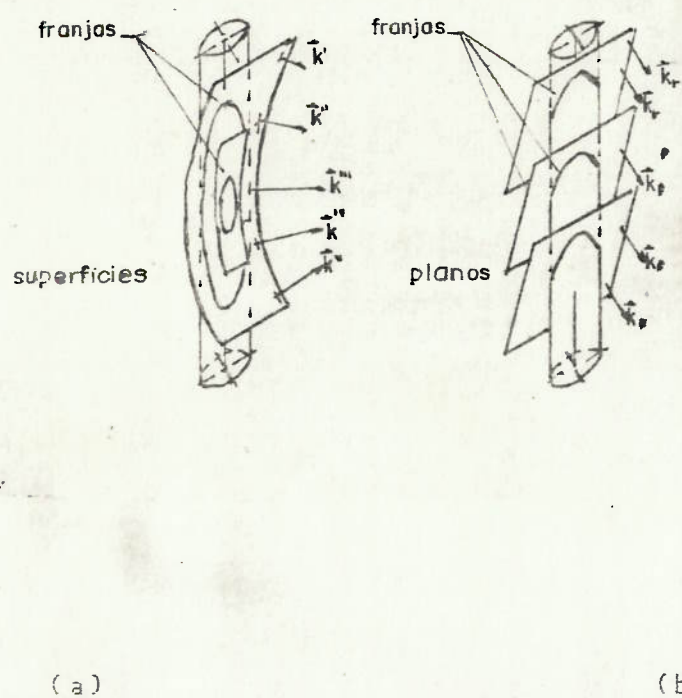


Figura 7.1 - Formação das franjas em holografia interferométrica: (a) Superfície do objeto intersectada por um conjunto de franjas curvas não equidistantes (representadas espacialmente pela variação dos vetores franja \vec{K}). (b) Superfície do objeto intersectada por um conjunto de franjas paralelas equidistantes (representadas espacialmente pela constante \vec{K}_f).

Na análise dinâmica foi feita apenas uma avaliação qualitativa das frequências naturais de uma lamina em vibração. A principal dificuldade desse estudo residiu na obtenção de um gerador de frequências adequado. Devido a baixa sensibilidade do seletor de frequências, só foi possível analisar as frequências de mais baixo ciclo. Devido a baixa potência do Laser, houve grande dificuldade para a visualização das regiões nodais em tempo real para posterior execução de um holograma de tempo medio.

Infelizmente, no que diz respeito aos ensaios, os modestos recursos do equipamento disponível não permitiram ir além daquilo que foi descrito no Capítulo VI. Mesmo assim, muitas foram as dificuldades encontradas para a adaptação do arranjo às necessidades dos ensaios de avaliação utilizados. Embora obtendo resultados significativos, poder-se-ia com um equipamento moderno obter resultados muito melhores em intervalos de tempo muito mais curtos.

Concluindo, embora tendo recursos limitados, observou-se no presente trabalho que o método de interferometria holográfica é mais uma ferramenta com grande potencial de utilização para o estudo do comportamento dos diversos componentes, tanto estruturais como mecânicos, bem como de materiais de forma qualitativa ou quantitativa.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Para se realizar a interferometria holográfica, os hologramas a serem formados devem possuir uma qualidade muito boa, para que uma correta interpretação das franjas seja possível. Consequentemente, além da prática na realização da holografia são necessários os conhecimentos físicos do processo.

O arranjo holográfico utilizado neste estudo é um arranjo simples o que dificulta a realização dos ensaios quantitativos. Para tanto, aconselha-se a aquisição de um equipamento mais moderno que possibilitara a melhoria dos resultados, além da possibilidade de se realizarem ensaios mais complexos, como por exemplo, o estudo do problema de concentração de tensão em uma barra entalhada [46] [47] [48], o estudo do comportamento dinâmico de uma hélice de navio [49] ou de uma palheta de turbina [50] além de estudos de impacto [51], fadiga [52], comportamento de materiais compostos [53] e no controle de qualidade e ensaios não destrutivos [53].

Caberia, ainda, ressaltar a importância do estudo dos efeitos de segunda ordem na teoria desenvolvida por Stetson [23] do vetor franja, a fim de se poder analisar as deformações não homogêneas.

Espera-se que este trabalho tenha elucidado os conceitos básicos e as principais aplicações do método bem como mostrado a enorme capacidade que o método possui para o estudo e visualização do comportamento de um objeto sobre uma certa gama de condições de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - D. Gabor, "Microscopy by reconstruction wavefronts", Proc. Roy. Soc., A197, 454, 1949.
- 2 - C. Vest, "Holographic Interferometry", John Wiley and Sons, N. Y., 1979.
- 3 - J. Caulfield, "Handbook of Holography", Academic Press, N. Y., 1979.
- 4 - Ostrovsk, Butosov e Ostavskaya, "Interferometry by Holography", Springer Series, N. Y., 1980.
- 5 - L. Taylor, "Optical Holography", Academic Press, N. Y., 1969.
- 6 - Haines e Hildebrand, "Surface deformation measurements using wavefront reconstruction", Appl. Optics, 5, 595, 1966.
- 7 - R. Pryputniewicz e W. Bowley, "Techniques of holographic displacement measurement: an experimental comparison", Appl. Optics, 17, 1748, 1978.
- 8 - N. Abramson, "Making and Evaluation Holograms", Academic Press, N. Y., 1979.
- 9 - N. Abramson, "The holodiagram: a practical device", Appl. Optics, 8, 1235, 1969.
- 10 - C. Sciammarella e J. Gilbert, "A holographic-moiré technique", Exp. Mech., 6, 215, 1976.
- 11 - J. Toni, R. Jimenez e J. Astigueta, "Fundamentos de la interferometria holografica", CITEFA, Argentina, 1975.
- 12 - Chandra e Sirohi, "Holomoiré interferometry", Appl. Optics, 17, 3700, 1978.
- 13 - Matsumoto, Iwata e Nagata, "Measuring accuracy of 3-D displacements in holographic interferometry", Appl. Optics, 12, 961, 1973.
- 14 - Matsumoto, Iwata e Nagata, "Measurement of deformation in a cylindrical shell by holographic interferometry", Appl. Optics, 13, 1080, 1974.

- 15 - D. Axelrad e K. Rezai, "Determination of surface displacement by holographic electro-optical processing", Appl. Optics, 21, 2001, 1982.
- 16 - Aleksandrov e Bonch-Bruewich, "Investigation of surface strains by the hologram technique", Sov. Phys. Tech., 12, 258, 1967.
- 17 - J. E. Sollid, "Holographic interferometry applied to measurement of small static displacements", Appl. Optics, 8, 1587, 1969.
- 18 - Dhir e Sikora, "An improved method for obtaining the general displacement field", Exp. Mech., 12, 323, 1972.
- 19 - Sciammarella e Gilbert, "Strain analysis of a disk subjected to a diametral compression", Appl. Optics, 12, 1951, 1973.
- 20 - G. Golub e C. Reinch, "Singular value decomposition and least-squares solution", Numer. Math., 14, 403, 1970.
- 21 - L. Taylor e G. Brandt, "An error analysis of holographic strains determined by cubic splines", Exp. Mech., 12, 543, 1972.
- 22 - W. Schumann, "Some aspects of the optical techniques for strain determination", Exp. Mech., 13, 225, 1973.
- 23 - K. Stetson, "Fringe localization and homogenous deformation", J. Opt. Soc. Am., 64, 1, 1974.
- 24 - K. Stetson, "Fringe vector and observed fringe vector in hologram interferometry", Appl. Optics, 14, 272, 1975.
- 25 - R. Pryputniewicz e K. Stetson, "Holographic strain analysis: extension of fringe vector method to include perspective", Appl. Optics, 15, 725, 1976.
- 26 - R. Pryputniewicz, "Holographic strain analysis: an experimental implementation", Appl. Optics, 17, 3613, 1978.

- 27 - K. Stetson, "Homogenous deformation", Appl. Optc, 14, 2256, 1975.
- 28 - R. Pryputniewicz e K. Stetson, "Determination of sensitivity vectors in hologram interferometry from two known rotations", Appl. Optics, 19, 2201, 1980.
- 29 - K. Stetson, "Use of fringe vectors in hologram interferometry to determine fringe localization", J. Opt. Soc. Am., 66, 626, 1976.
- 30 - K. Stetson, "holographic strain analysis by fringe localization planes", J. Opt. Soc. Am., 66, 627, 1976.
- 31 - Hazzel, Liem e Olsen, "Real time holographic vibration analysis", Seminar Proceedings Boston, Massachusetts, April 14-15, 1971.
- 32 - K. Stetson e R. Powell, "Interferometric analysis by wavefront reconstruction", J. Opt. Soc. Am., 55, 1593, 1965.
- 33 - K. Stetson e R. Powell, "Interferometric hologram evaluation and real time vibration analysis", J. Opt. Soc. Am., 55, 1694, 1965.
- 34 - Hokley e Butters, "Holographic as a routine method of vibration analysis", J. Mech. Eng. Sc., 12, 37, 1970.
- 35 - R. Aprahaman e D. Eversen, "Applications of holography to dynamics", J. Appl. Mech., 37, 287, 1970.
- 36 - Ricardo Forneris Jr, 1º Relatório Semestral FAPESP, 1984.
- 37 - K. Wanders, "Holographic Interferometry", Third workshop DFVLR-CTA on lasers and holography, São José dos Campos, 1977.
- 38 - H. Stenbichler, "Time average holography", Third workshop DFVLR-CTA on lasers and holography, São José dos Campos, 1977.

- 39 - K. Wanders, "Holography", Third workshop DFVLR-CTA on lasers and holography, São José dos Capos, 1977.
- 40 - Graube, "Advances in bleaching methods for photographically recorded holograms", Appl. Optics, 13, 2942, 1974.
- 41 - Wilson e Strobe, "Time average holographic interferometry of a circular plate", J. Opt. Soc. Am., 60, 1162, 1970.
- 42 - Wilson, "Characteristic function for time average holography", J. Opt. Soc. Am., 60, 1068, 1970.
- 43 - P. Tuschak e R. Allaine, "Axisymmetric vibrations of a cylindrical resonator measured by holographic interferometry", Exp. Mech., 15, 81, 1975.
- 44 - K. Maruyama e O. Ichinimya, "Experimental determination of transverse vibration modes", Exp Mech., 19, 271, 1979.
- 45 - Lashkari e Weingarten, "Vibrations of segmented shells", Exp. Mech, 12, 120, 1973.
- 46 - Dudderar e Regan, "Measurement of strain field near a crack tip in polythymethacrylate by holographic interferometry", Exp. Mech., 11, 49, 1971.
- 47 - Dudderar e Doerries, "A study of effective crack length using holographic interferometry", Exp. Mech., 16, 300, 1976.
- 48 - Dudderar e Gorman, "The determination of mode I stress-intensity factors by holographic interferometry", Exp. Mech., 13, 145, 1973.
- 49 - J. Sikora e F. Mendenhall, "Holographic vibration study of a rotating propeller blade", Exp. Mech., 14, 230, 1974.
- 50 - K. Stetson, "Method of structural design relevant to holographic vibration analysis", AIAAJ, 13, 457, 1975.

- 51 - Perry e Mix, "Applications of holographic interferometry to shock waves in solids", Appl. Phys. Lett., 24, 624, 1974.
- 52 - Sampson, "Holographic interferometry applications in experimental mechanics", Exp. Mech., 10, 313, 1970.
- 53 - R. Erf, "Holographic Non Destructive Testing", Academic Press, N. Y., 1974.