

LAURO MICKERT

1.02%

not rik

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ J. LUNAZZI.

Tese apresentada ao Instituto de Física "Gleb Wataghin" como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Ciências.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE FÍSICA BIBLIOTECA Agosto de 1978.

## AGRADECIMENTOS

Aos Profs. Dr. Bruno Markus e Pe. Alcides Guareschi, Reitor e Vice-Reitor Acadêmico da UPF, pelo apoio humano e financeiro para que esse trabalho fosse realizado.

Ao Prf. Luiz E. Spalding, diretor do ICEG da UPF pelo apoio sincero e desinteressado dado a mim e a minha família durante o curso.

Aos professores que me orientaram e deram um pouco de si para a minha instrução.

Aos amigos que aqui conheci.

Ao MEC-DAU - PICD que possibilitaram este trabalho.

Em especial ao Prof. Dr. José J. Lunazzi pela orientação segura e dedicada.

# À Nilve e Ana Paula,

com amor.

## INDICE

Capítulo	3 – I	BANCO HOLOGRAFICO: SUA CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO.		
	3.1 -	- Técnica escolhida 32		
	3.2 -	- Construção do equipamento		
	· · ·	3.2.1 - Mesa holográfica 35		
. * . *	•	3.2.2 - Laser 35		
• •		3.2.3 - Espelhos e divisor de feixe 36		
		3.2.4 - Lente e filtro espacial		
	· · ·	3.2.5 - Suporte dos elementos holográficos. 37		
	•	3.2.6 - Suporte dos objetos		
•	3.3 -	- Fotômetro		
		3.3.1 - Construção e calibração 40		
	. •	3.3.2 - Medição de int. luminosas		
. · · ·	3.4 -	- Transmitômetro 44		
•				
Capítulo	4 - 1	TESTE DO EQUIPAMENTO E SEU USO		
	4.1 -	- Teste do equipamento		
		4.1.1 - Laser 46		
 		4.1.2 - Pinhole 46		
	· ·	4.1.3 - Espelhos 48		
	•	4.1.4 - Teste do equipamento 48		
1	4.2 -	Placas holográficas 50		
· · · ·		4.2.1 - Calibração das placas 51		
· · · ·	4.3 -	Revelação dos hologramas 51		
		4.3.1 - Resumo da revelação de hologramas . 52		
	· · ·	4.3.2 - Secagem de hologramas 53		
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•	4.3.3 - Branqueamento 53		
· · ·	4.4 -	· Aplicações do equipamento		
	. *	4.4.1 - Hologramas tirados 53		
· ·		4.4.2 - Interpretação das franjas 55		
Conclus	ão .			
Bibliografia				

## OBJETIVOS:

A presente tese tem os seguintes objetivos:

 Desenvolver um trabalho visando oferecer a outras instituições de pesquisa a possibilidade de contar com um equipamento holográfico, para suas experiências, que seja, ao mesmo tempo, prático e de baixo custo monetário.

2. Oferecer um guia básico para referências a quem precisar se inteirar no campo holográfico. Não existem na literatura referências apropriadas ao tratamento experimental do tema.

 Aplicar a holografia no estudo do comportamento de sementes na presença de mudanças de umidade, dando uma demonstração de sua sensibilidade e possibilidades de adaptação ao caso de espécimes biológi cos.

#### CAPITULO 1

## HOLOGRAFIA

## 1.1 - Introdução

A holografia, inventada por Dennis Gabor em 1948, é um processo pelo qual se registram imagens que se caracterizam por apresentarem, além da intensidade, a fase da onda luminosa geradora desta imagem. Assim, há condições de reproduzir o objeto em três dimensões, o que não é possível com uma fotografia convencional, que apenas reproduz a intensidade luminosa em um plano.

Gabor (1) e (2) trabalhou procurando melhorar a resolução dos microscópios eletrônicos cujas lentes das objetivas tinham um poder de resolução da ordem de 10 Å. Dentro deste trabalho inventou uma maneira para registrar diversos planos de um objeto, sem utilizar lentes na formação de imagens. Como resultado, a invenção de Gabor (a HOLOGRA -FIA) se tornou um novo princípio ótico que, por sua importância na ótica e em outros setores técnicos e científicos, deu lugar a uma nova disci plina científica.

Gabor usou, nas suas experiências, luz de lâmpadas de mercúrio, ou sódio, de comprimentos de coerência relativamente pequenos (comprimento de coerência do Hg -0.1mm). As possibilidades da técnica descoberta resultaram assim limitadas. Em 1960, com a descoberta do LASER, estes problemas de coerência foram resolvidos.

Hoje a holografia é um processo muito avançado, no qual outros problemas iniciais foram resolvidos. Atualmente o maior esforço está dirigido para a resolução do problema da medição, ponto a ponto, da deformação arbitrária de uma superfície.

Esta técnica é usada em vários tipos de ondas: acús

ticas, micro-ondas, ondas não coerentes, etc.

0 presente capítulo está voltado à análise dos pro cessos holográficos e às suas aplicações.

1.2 Tomada Holográfica.

Sejam dadas duas ondas,  $\vec{U}_1 = \vec{U}_2$ , incidindo sobre um anteparo N. Usando a notação complexa podemos escrever (Veja figura 1.1):

$$\vec{U}_1 = \vec{E}_r \cdot e^{i \cdot \theta}r$$
 e  
 $\vec{U}_2 = \vec{E}_o \cdot e^{i \cdot \theta}o$ 

Estas ondas ao atingirem simultaneamente o anteparo N interferem de tal modo que:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$$

A intensidade da luz que incide em cada ponto do anteparo é dada por:

$$I = |U_{1} + U_{2}|^{2} = E_{r}^{2} + E_{o}^{2} + E_{r} \cdot E_{o}^{*} + E_{r}^{*} \cdot E_{o}$$

$$I = E_{r}^{2} + E_{o}^{2} + E_{r} \cdot E_{o} \cdot e^{i(\vartheta_{r} - \vartheta_{o})} + E_{r} \cdot E_{o} \cdot e^{-i(\vartheta_{r} - \vartheta_{o})}$$

 $I = E_r^2 + E_o^2 + 2 \cdot E_r \cdot E_o \cdot \cos \Delta \emptyset \quad \text{com} \quad \Delta \emptyset = \emptyset_r - \emptyset_o \text{ a dife-}$ 

rença de fase com que as duas ondas atingem o anteparo. Finalmente

$$I = I_{r} + I_{o} + 2\sqrt{I_{r} \cdot I_{o}} \cos \Delta \emptyset$$
 (Eq. 1.1)

Caso o anteparo for uma chapa fotográfica, ela registrará a distribuição das intensidades dada pela equação 1.1. Se, em vez disso, colocarmos uma chapa holográfica, ela registrará esta mesma figura, porém formando uma rede de difração.

Se a interferência for realizada com luz não totalmente coerente, então:

 $I = I_{r} + I_{o} + 2\sqrt{I_{r} \cdot I_{o}} |Y_{12}| \cos \Delta \beta$  (6) onde



Figura 1.1 - Interferência de duas ondas.



Figura 1.2 - Distribuição de I para  $I_r = I_o e \frac{|\gamma_1|}{|12|}$  como parâmetro.

 $0 \leq |\gamma_2| < 1$  é denominado de "grau complexo de coerên-

cia".

Se  $|Y_{12}| = 1$  a luz é totalmente coerente Se  $|Y_{12}| = 0$  a luz é totalmente incoerente. Michelson definiu a visibilidade (7):

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad \text{donde}$$

$$V = \frac{I_{r} + I_{0} + 2\sqrt{I_{r} - I_{0}} |\gamma_{12}| \cos \Delta \theta - (I_{r} + I_{0} - 2\sqrt{I_{r} - I_{0}} |\gamma_{12}| \cos \Delta \theta)}{2.I_{r} + 2 I_{0}}$$
$$V = \frac{2\sqrt{I_{r} - I_{0}} |\gamma_{12}| \cos \Delta \theta}{V = \frac{2\sqrt{I_{r} - I_{0}} |\gamma_{12}| \cos \Delta \theta}{V + 1}}$$

$$I = \frac{I_{\gamma} I_{r} I_{o} \gamma I_{2} \cos \mu}{I_{r} + I_{o}}$$

 $V = |\gamma_{12}|$  para  $I_r = I_o$  dando que o fator de coerência, função da diferença do caminho ótico, reduz a visibilidade (vide coerência em 1.6.1)

Na figura 1.2 temos uma representação gráfica das in - tensidades I em função dos valores de  $\Delta \emptyset$  para  $|\gamma_{12}|$  como parâmetro.

1.3 - Filmes holográficos e transmitância.

Hurter e Driffield caracterizaram, em 1890, os filmes e chapas fotográficas pela curva chamada "H - D". (4) e (8)

Chamando "D" a densidade ótica e "I" a transmitância de intensidade define-se:  $D = \log 1/I \quad com \quad I = \frac{I_t}{I_1}$  int. transmitida Por sua vez a exposição do filme é definida como:  $E = I_i \cdot t_e \qquad I_i$  intensidade que atinge a placa

t<sub>a</sub> = tempo de exposição

A curva H - D é dada na figura 1.3. A emulsão holográfica

.e o processo de desenvolvimento caracterizam esta curva. A partir desta curva podemos escrever:

D =  $\log 1/1 = Y(\log E - \log K) = \log (E/K)^{Y}$ y = declividade da curva que varia normalmente entre os

valores l e 2.

Revelada a placa holográfica necessita-se uma boa transmitância em intensidade, essencial para a holografia. A transmitância em intensidade é:

$$I_{a} = \frac{I_{placa exposta}}{I_{sem placa}}$$
 chamada absoluta  
$$I_{r} = \frac{I_{placa exposta}}{I_{placa não exposta}}$$
 chamada relativa

Uma boa transmitância de intensidade é da ordem de 40%. A transmitância relativa é maior que a absoluta, já que a placa, mesmo sem exposição, reflete uma pequena percentagem de luz e absorve outra.

1.3.1 - Transmitância de amplitude.

Para iluminações coerentes interessa a transmitância de amplitude que se define:

 $\tau = \sqrt{I}$   $\tau \propto I$ 

O gráfico 1.4 representa a transmitância de amplitude versus exposição. Obtém-se dados fiéis quando se usa a região da linearidade da amplitude de transmitância em função da exposição E.

A partir da figura 1.3 e tomando o ponto D<sub>o</sub> correspondente ao ponto médio da parte linear da curva H - D podemos escrever:

$$\Upsilon = \frac{-2.\log_{\tau} + 2.\log_{\tau_0}}{\log E - \log E_0}$$

$$\log \frac{\tau}{\tau_0} = -\frac{\gamma}{2} \cdot \log \frac{\Delta E}{E} \quad ou$$

 $\log(1 + \frac{\Delta \tau}{\tau_{o}}) = -\frac{\gamma}{2} \cdot \log \cdot (1 + \frac{\Delta E}{E_{o}})$ 

Considerando um acréscimo infinitesimal em E temos  $\Delta E + 0$  e



Figura 1.3 - Curva H - D



Figura 1.4 - Transmitância de amplitude versus exposição.

então pode-se aplicar:  $\log (1 + x) = x - x^2/2$ . Desprezando o termo em  $x^2$ , por ser muito pequeno, vem:

$$\frac{\Delta \tau}{\tau_0} = -\frac{\gamma}{2} \cdot \frac{\Delta E}{E_0}$$

$$\frac{\tau - \tau_0}{\tau} = -\frac{\gamma}{2} \cdot \frac{\Delta E}{E_0}$$

$$\frac{\tau - \tau}{\tau_0} = -\frac{\gamma}{2} \cdot \frac{\Delta E}{E_0}$$

$$\tau = \tau_0 (1 - \frac{\gamma}{2} \cdot \frac{\Delta E}{E_0})$$
Esta equação fornece o valor

da transmitância para acréscimos pequenos no valor da exposição E.

1.4 - Reconstrução de hologramas

Analisando a transmitância de amplitude, vista no subtítulo anterior, conclui-se que:

$$\tau \propto I$$
Iluminando o holograma com uma onda  $E_c \cdot e^{i \cdot \theta_c}$  a onda transmitida será  $\tau \cdot E_c \cdot e^{-c}$ . Então:  

$$\tau \cdot E_c \cdot e^{-c} \propto (I_r + I_o) \cdot E_c \cdot e^{-c} + \sqrt{I_r \cdot I_o} e^{i(\theta_c + \theta_r - \theta_o)} + (i) \qquad (i) \qquad$$

Exemplos particulares:

a) Se  $\emptyset_c = \emptyset_r$  (a onda reconstruída é igual a onda referência de tomada) então o 3º termo será: i. $\emptyset_o$  i $\emptyset_o$  $\Im = \sqrt{I_r} \cdot I_o \cdot E_c \cdot e^{-\alpha} \in E_o \cdot e^{-\alpha}$  (que é a onda objeto)

b) Se  $\emptyset_c = - \emptyset_r$  ( a onda de reconstrução é a onda conjugada) então o 29 termo será.

$$\widehat{\mathcal{D}} = \sqrt{I_{r}} \cdot I_{o} \cdot E_{c} \cdot e^{-i\emptyset} \quad (que \, \check{e} \, a \, onda \, objeto \, con - iugada)$$

jugađa).

c) Se tomarmos as três ondas como esféricas e centradas sobre a mesma linha temos:

e os termos da fórmula geral resultam:

termo 1: onda de reconstrução transmitida termo 2:  $\sqrt{I_r \cdot I_o} \cdot E_c \cdot e^{\frac{i \cdot k \cdot x^2}{2}} (\frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_r} - \frac{1}{Z_o})$ termo 3:  $\sqrt{I_r \cdot I_o} \cdot E_c \cdot e^{\frac{i \cdot k \cdot x^2}{2}} (\frac{1}{Z_c} - \frac{1}{Z_r} + \frac{1}{Z_o})$ 

Se pretendemos que os termos 2 e 3 representem ondas também esféricas estas deverão ter a forma:

$$E_{i} e^{\frac{i \cdot k \cdot x^2}{2 \cdot 2}}$$
 sub-indice i = imagem

então:

$$\frac{1}{Z_{i}} = \frac{1}{Z_{c}} \pm \frac{1}{Z_{r}} - \frac{1}{Z_{o}}$$
 que fornece a localização das imagens.

Se  $Z_c = Z_r$  então  $1/Z_i = 1/Z_o$  ou  $2/Z_r - 1/Z_o$ . Para ob termos uma imagem real  $Z_i$  deve ser menor que zero e para imagem virtual  $Z_i$  sera maior que zero.

d) Consideremos agora as ondas como sendo planas (fig. 1.1) então:  $\theta_r = k.x.sen \theta_r$  $\theta_o = k.x.sen \theta_o$  $\theta_c = k.x.sen \theta_c$ 

onde k.sen  $\theta = v$  é a frequência espacial. A frequência espacial constitui a densidade de franjas. (5) Se o ângulo  $\theta$  é pequeno a frequência espacial será grande. Além disso, um fundo existe, chamado ruído intermodulação, devido às franjas produzidas pela luz proveniente das várias partes do objeto.

Usando-se ângulos maiores este efeito pode ser eliminado,

10

mas a densidade espacial alta requer maior resolução do filme, e um cuidado especial é preciso para evitar movimentos relativos do sistema ótico durante a exposição.

Utilizando a expressão geral:  
termo 1 = onda transmitida sem difração  
termo 2 = 
$$\sqrt{I_r} \cdot I_o \cdot E_c \cdot e^{i \cdot k \cdot x(sen \theta_c + sen \theta_r - sen \theta_o)}$$
  
termo 3 =  $\sqrt{I_r} \cdot I_o \cdot E_c \cdot e^{i \cdot k \cdot x(sen \theta_c - sen \theta_r + sen \theta_o)}$ 

Se pretendemos que estes termos representem ondas planas, saindo do holograma, então devemos ter a forma:

$$E_{i} \cdot e^{1 \cdot k \cdot x} \frac{\sin \theta_{i}}{\cos \theta_{i}} = \sin \theta_{c} \pm (\sin \theta_{r} - \sin \theta_{o})$$

o que equivale a equação da rede de difração de espaçamentos

$$d = \frac{\lambda}{\operatorname{sen} \theta_{r} - \operatorname{sen} \theta_{o}}$$

Na aproximação paraxial:

$$\theta_i = \theta_c \pm (\theta_r - \theta_o)$$

Se  $\theta_r = \theta_c$  então  $\theta_i = \theta_o$  ou  $2.\theta_c - \theta_o$  que fornecem as imagens.

1.4.1 - Interpretação física da reconstrução.

A reconstrução da onda pode ser realizada por dois mêtodos: (3) e (8)

No primeiro, ilumina-se o holograma com o feixe referência original e a imagem virtual fica na mesma posição que o objeto e está livre de aberrações. A imagem real não. Neste caso ilumina-se o holograma num ângulo -  $\theta$  em relação ao eixo z (veja figura 1.5). Iluminando-se o holograma num ângulo +  $\theta$  o caso corresponde a multiplicar a transmitância por r.e<sup>-2πiξ</sup><sub>r</sub> com  $\xi_r$  = sen  $\theta/\lambda$ . A imagem real produzida localiza-se no lado oposto mas simetricamente em relação à posição original do objeto. Colocando-se uma chapa fotográfica no plano imagem pode-se fotografar esta imagem sem necessitar o uso de lentes.

As imagens real e virtual são formadas pelos raios difratados de ordens -l e +l respectivamente. No caso mais frequente, a imagem virtual está atrãs do holograma em relação ao observador enquanto a imagem real à frente do mesmo. Porém, ambos estão no mesmo lado do feixe incidente (fig. 1.5).

Um holograma é denominado sobre o eixo ("on axis") quando a fonte luminosa, o objeto e o centro da placa holográfica encontram-se sobre o mesmo eixo. Caso contrário o holograma será chamado fora do eixo.

No segundo método, usa-se o feixe conjugado do feixe de referência usado na tomada holográfica. Ele é formado de raios antiparalelos com os raios originais do feixe (figura 1.6).

O feixe conjugado tem o mesmo trajeto que o feixe de referência, porém em sentido contrário. Desta maneira, obtém-se uma imagem localizada no mesmo plano e local que o objeto. O feixe conjugado obtém-se focalizando um feixe de luz sobre o ponto R mediante uma lente. Este ponto R corresponde à posição da fonte luminosa quando se fez a tomada holográfica.

Ao projetar-se esta imagem sobre um plano teremos em foco apenas a parte correspondente ao objeto contido neste plano. Assim como em lentes, diminuindo-se a abertura do feixe, obtém-se maior profundidade de campo e a imagem é melhor focada para os outros planos.

As fotografias tiradas neste trabalho foram tiradas através deste segundo método.

Quando se constroem as imagens reais de hologramas finos, qualquer dos dois métodos satisfaz. Se o holograma é grosso (volumétrico) o segundo método é melhor, pois satisfaz melhor a lei de difração de Bragg.

O efeito de rede volumétrica aparece mais nos hologramas tipo Denysuk (veja figura 1.9) quando o ângulo entre o feixe referência e o feixe objeto é próximo de 180<sup>0</sup>.

Na observação da imagem virtual é preferível usar o feixe de reconstrução que coincide com a direção e o sentido do feixe de referência



Figura 1.5 - Formação das imagens real e virtual num holograma iluminado com luz colimada.



Figura 1.6 - Obtenção da imagem real usando-se o feixe conjugado.

na construção (0 positivo).

 1.5 - Caractenísticas de diversas técnicas usadas em holografia.

1.5.1 - "Gabor fora do eixo" (16):

Esta técnica é a mais simples para a obtenção de hologramas. Usa apenas um Laser, uma lente para expandir o feixe e uma placa hologra fica. Os feixes referência e de iluminação do objeto são provenientes de um único feixe. Foi a primeira técnica usada em holografia por Gabor.

Caracteriza-se por uma grande estabilidade e uma maior qualidade do holograma, visto que tudo pode ser montado num mesmo sistema rígido (figura 1.7).

Porém, apresenta algumas desvantagens:

a) não é possível controlar individualmente os feixes referência e objeto;
b) o ângulo entre a direção de iluminação e observação é limitado;
c) a sombra do objeto prejudica a iluminação da placa pelo feixe de referência.

1.5.2 - Separação por amplitude.

A divisão do feixe luminoso em dois é feita por uma lâmina de vidro, onde o feixe refletido passa a funcionar como referência e o transmitido como feixe objeto.

Esta montagem evita alguns incovenientes dos processos anteriores, mas introduz mais elementos, o que pode diminuir a estabilidade do sis tema. Por outro lado é necessário uma limpeza muito boa nos componentes trans parentes para evitar distorções nos feixes luminosos. As lentes devem ser de boa qualidade, usando-se geralmente lentes de microscópio de distância focal



Figura 1.7 - "Gabor fora do eixo".



Figura 1.8 - Separação por amplitude.

pequena.

Permanece o problema do controle das intensidades dos feixes referência e objeto. Existe à possibilidade de introduzir no caminho ótico um filtro variável (polarizador) para este controle.

1.5.3 - Hologramas volumétricos ou "Denysuk".

O elemento essencial desta técnica é o efeito de rede volumétrica da placa e o feixe de referência atinge a placa holográfica por trás, formando um ângulo próximo a 180<sup>°</sup> com o feixe objeto. (figura 1.9).

Neste tipo de holograma, formam-se planos quase paralelos à superfície da emulsão para os máximos de interferência (17).

Pode-se observá-los com luz branca que produz as interferências com franjas coloridas. Este colorido, na observação, depende do ângulo, visto que o holograma é uma rede de difração.

1.5.4 - Hologramas imagem.

Estes hologramas são obtidos focando-se sobre a placa holográfica a imagem real do objeto mediante o uso de uma lente (figura 1.10). Diferencia-se da fotografia convencional pela introdução do feixe de referência. Holograficamente seria semelhante a colocar o objeto muito próximo da placa e os hologramas tornam-se muito nítidos que, reconstruídos com luz coerente, possuem todos os planos focais do objeto. . Este processo tem muito interesse na microscopia. Quando reconstruídos com luz branca apresentam pouca distorção cromática, sendo, por isso, nítidos para todo o espectro visível. Existe uma limitação que é determinada pela restrição

angular correspondente à margem angular permitida pela lente.



Figura 1.9 - Holograma volumêtrico (Denysuk).



Figura 1.10 - Hologramas imagem.

1.6 - Condições de estabilidade e coerência.

1.6.1 - Coerência.

Na construção de hologramas, é necessário considerar dois tipos de coerência do laser (4): a transversal e a longitudinal. Ambas são necessárias para a construção de um holograma de boa qualidade.

A coerência transversal consiste na estabilidade das fases em A e B da onda (figura 1.11) com o tempo. É necessário que  $\emptyset_A - \emptyset_B$ seja um valor bem definido e que não sofra flutuações em função do tempo . Não é necessário que as fases em A e B sejam definidas, mas sim a sua diferença. Na holografia precisa-se coerência transversal na região do plano da placa holográfica.

Obtêm-se estas coerências mediante o uso de um laser que funciona com modos de uma só fase.

Como em holografia usam-se, em muitas técnicas, dois feixes de luz provenientes do mesmo laser, é preciso considerar o "Compri mento de coerência" já que os feixes objeto e referência geralmente descrevem trajetórias diferentes.

O comprimento de coerência é definido (8) como:

 $x = \frac{c}{\Delta v}$   $\Delta v$  é a faixa de frequências da emissão do laser.

$$\frac{1}{\Delta v} = \Delta t$$
  $\Delta t$  é o tempo de coerência  
 $\Delta v$ 

A diferença entre os caminhos óticos seguidos pelos dois feixes não pode ser superior a este comprimento de coerência para qualquer pon-



Figura 1.11 - Coerência longitudinal e transversal.

to do objeto, por isso, a profundidade da cena a ser holografada deve satisfazer esta condição.

Experimentalmente determina-se o comprimento de coerência determinando, para diversas diferenças das trajetórias dos feixes luminosos, o contraste ou visibilidade:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

Quando V = 1/72 a diferença das trajetórias fornece o valor do "comprimento de coerência". Este processo tem a vantagem de servir para qualquer nº de modos de emissão do laser.

Para determinar o comprimento de coerência de um laser a partir do comprimento da cavidade ressonante procede-se como está indicado no capítulo 7 de (8).

1.6.2 - Estabilidade do banco holográfico (19):

A estabilidade do sistema deve ser tal que durante a exposição não haja vibrações ou deslocamentos que ultrapassem 10% do comprimento de onda. Não inclui nisto a holografia interferométrica, onde o holograma vai registrar as vibrações ou pequenos deslocamentos de objetos.

0 ângulo máximo (2.0) entre o feixe objeto e o feixe referência deve satisfazer à condição (19):

k.sen 2.8 < v\_r onde v\_r é a frequência espacial e k é o número de onda.

Para determinar o valor de  $v_{ri}$  usa-se a fórmula:

2.d.sen  $\theta_{p} = \lambda$  onde "d" é a característica dada pelo

filme, i.é, a distância entre duas linhas ou dois grãos da emulsão,  $\lambda$  o comprimento da onda usada. Tendo o valor de  $\theta_n$  determina-se:

$$v_r = k.sen 2.\theta_r$$

Conhecendo-se "d" (poder resolvente) do filme pode-se escrever a condição do ângulo:

$$\sin \theta \leqslant \frac{\lambda}{2.d}$$

Uma curva típica de resposta à frequência espacial de uma placa holográfica é dada na figura 1.12.

Na vizinhança da frequência espacial encontra-se a resolução do filme em linhas (ou grãos) por milímetro.

1.6.4 - Comprimento de onda (19):

O comprimento de onda do laser deve ter uma estabilidade tal que as fases relativas das ondas incidentes no holo grama não variem mais do que  $1/2\pi$ .

1.6.5 - Relação das intensidades.

A relação das intensidades dos feixes objeto e referência deve satisfazer à condição:

$$2 < \frac{I_r}{I_o} < 10$$

Geralmente a razão igual a 3 é escolhida como sendo a melhor entre a eficiência da difração e a qualidade da imagem.

A eficiência de reconstrução é definida como a razão en tre a irradiação da imagem do holograma e a irradiação incidente (18). Corresponde à região linear da curva da transmitância de amplitude em função da ex posição (veja figura 1.4).



Figura 1.12 - Curva de resposta da frequência espacial de uma emulsão fotográfica típica.

## CAPITULO 2

#### HOLOGRAFIA INFERFERCMETRICA OU HOLOINTERFEROMETRIA.

2.1 - Generalidades.

Os hologramas tem a capacidade de armazenar mais do que uma onda, e, quando são iluminados, as ondas reconstruídas podem interferir entre si ou com outras provenientes da fonte iluminadora (8).

Uma onda registrada num holograma pode ser reconstruída e usada a qualquer momento.

Este fato levou a holografia a sua aplicação mais importante: a HOLOINTERFEROMETRIA ou holografia interferométrica.

A holointerferometria estuda a formação e a interpretação das franjas de interferência que aparecem quando uma onda reconstruída é feita interferir com outra.

Na holointerferometria registram-se, além das intensidades, as fases das ondas que interferem permitindo a reconstrução integral das ondas registradas e sua interferência.

Pelo fato de a holografia armazenar ondas faz com que a holointerferometria ofereça maiores possibilidades que a interferometria convencional.

Os hologramas que serão analisados no capítulo 4 são interferométricos (veja figuras 4.2 e 4.3). Nestes hologramas veremos que as superfícies deformadas podem ser comparadas com a superfície original, com precisão interferométrica.

O deslocamento diferencial da superfície, na direção da normal à mesma, é aproximadamente  $\lambda/2$ , para espaço inter franjas, quando as direções de iluminação e observação forem nor mais. Se o deslocamento da superfície é "x" a diferença de caminho ótico é "2.x". Logo para duas franjas vizinhas, x =  $\lambda/2$ . As franjas de pequenos deslocamentos de objetos têm frequências espaciais relativamente baixas (chamamos simplesmente de franjas) enquanto que as frequências altas produzem interferências aleatórias (os "speckles") devido à luz dispersada difusamente.

A frequência espacial é igual a  $1/d = k.sen \theta$ . Se as frequências forem altas "d" tende a zero.

A resolução do filme é dada pela frequência espacial máxima (as fábricas fornecem o número de linhas resolvíveis por mm) enquanto que a resolução da abertura do holograma é A/λZ e a do observador é dada pela mesma fórmula, onde A é a abertura (do holograma ou do olho do observador) e Z a distância ao holograma. Quando se faz uma análise de um holograma, predomina a resolução de menor valor.

Analisaremos aqui dois tipos de holointerferometria: a simultânea ("real time") e a dupla-exposição ("time lapse"). Os outros tipos são usados somente no estudo de vibrações e ficaremos apenas com as referências bibliográficas (Veja (8) na bibliografia). No presente trabalho usare mos a dupla-exposição.

## 2.2 - Holointerferometria simultânea.

Un holograma, corretamente obtido, pode reconstruir uma onda cuja amplitude complexa é linearmente proporcional à do campo elétrico da luz que provém do objeto real. A reconstrução de um holograma é ótima se o colocarmos nas mesmas condições da tomada e o iluminarmos com a onda de referência. Se isto for feito com exatidão, a onda reconstruída será uma réplica fiel da onda objeto a menos de um fator de fase constante. A relação de intensidades entre ambos pode ser ajustada por intermédio do feixe de luz de reconstrução.

Suponhamos que, durante o tempo de exposição, de revelação e recolocação do holograma, o objeto permaneceu fixo e iluminado com luz de laser. Então, as frentes da onda reconstruída cancelarão a onda objeto original em todo o holograma. Isto acontece porque, ao revelar o holograma, após a primeira tomada, os pontos correspondentes aos máximos ficarão escuros e apenas nos pontos de mínima a onda terá condições de ser transmitida. Mas isto implica na mudança de fase da onda transmitida. Logo, esta onda atinge o ponto de observação com uma fase acrescida de 180<sup>°</sup> enquanto que a onda objeto permanece com a mesma fase. A soma destas ondas defasadas de 180<sup>°</sup> resulta numa anulação. Portanto para o observador o objeto seria invisível se não fosse a distorção da emulsão e ele observa uma grande franja brilhante. Mas isto só é possível se a revelação do holograma não distorce a emulsão, a recolocação for exata e a iluminação for ajustada de modo a igualar a intensidade da onda reconstruída com a original.

Se o objeto modificar levemente a sua posição ou forma, por qualquer causa, teremos uma defasagem e uma consequente adição, ou subtração, de amplitudes que leva à figura de interferência característica da deformação da superfície do objeto. Toda a vez que ocorra esta modificação ocorrera uma mudança na figura interferométrica, donde o nome de holointerferometria simultânea.

É assumido o fato de que as deformações não alteram substancialmente a micro-estrutura superficial. Se considerarmos uma deformação significativa na superfície, teremos uma nova e aleatória distribuição de fases da luz dispersada do objeto. A onda objeto e a reconstruída formariam uma figura interferométrica de alta frequência espacial que não poderia ser resolvida.

A holointerferometria simultânea é dificultada por vários fatores: - A posição do objeto e sua iluminação, no momento em que o holograma é recolocado, devem ser idênticas àquelas da tomada. Isto implica que o objeto e os elementos óticos requeridos para formar o holograma devem manter-se fixos durante um bom tempo ou devem poder ser recolocados com excepcional precisão, pois o erro não pode ultrapassar uma fração de franja. A tarefa é mais fácil quando o ângulo entre os feixes objeto - refe-

rência é pequeno, já que, neste caso a frequência espacial diminui e a distância entre as franjas aumenta. Como consequência o erro percentual na recolocação dos elementos é menor.

- O encolhimento da emulsão fotográfica durante a revelação. Isto causa distorções na frante da onda reconstruída afetando o formato e a disposição das franjas.

Porém, apesar destes incovenientes é possível obter-se franjas de alto contraste.

A holointerferometria simultânea oferece assim a vantagem de sua capacidade para controlar continuamente os deslocamentos (ou deforma ções) de uma superfície rugosa sem tocá-la nem marcá-la.

Outra vantagem exclusiva é a de permitir pequenos ajus tes da placa holográfica que pode otimizar as franjas para a sua interpreta ção quantitativa. Quando o número de franjas começa a ser muito grande é conveniente diminui-las , por pequenos ajustes, de tal maneira que se tenha me lhores condições de trabalho.

Para evitar o problema do posicionamento exato do holo grama, após a revelação usa-se um processo de revelação, sem tirar o holograma do lugar. É o processo do gotejo. Derramam-se lentamente os elementos de revelação sobre a emulsão do holograma obedecendo ao método que será abordado no capítulo 4.

2.3 - Holografia por dupla-exposição.

A comparação continua do deslocamento de uma superfície em relação à sua posição original pode fornecer mais informações do que o necessário. Se apenas interessa analisar um registro permanente após um certo tempo, faz-se uma tomada do estado inicial e outra do estado final com a mesma onda de referência. Após estas tomadas não interessam mais o objeto e os elementos requeridos para iluminá-lo, precindindo-se destes na reconstrução.

A onda de comparação, característica do estado inicial,

e a que representa um estado alterado, são reconstruídos iluminando-se o holograma com uma onda semelhante à de referência (veja reconstrução de hologramas em 1.4). Não há necessidade de ajustar a iluminação e o encolhimento da emulsão afeta igualmente as ondas reconstruídas não modificando o espaçamento das franjas.

A reconstrução do holograma por dupla-exposição é simultânea para as duas ondas registradas em momentos diferentes. Quando se faz a tomada o holograma registra em tempos diferentes as informações dadas. Assim, na tomada inicial temos:

$$W_{1} \propto I_{1} = I_{r} + I_{o} + \sqrt{I_{r} \cdot I_{o}} \cdot e^{i \cdot \theta_{r} - i \cdot \theta_{1}} + \sqrt{I_{r} \cdot I_{o}} \cdot e^{-i \cdot \theta_{r} + i \cdot \theta_{1}}$$

e na tomada final:

$$W_2 \propto I_2 = I_r + I_0 + \sqrt{I_r \cdot I_0} \cdot e^{i \cdot \theta_r} - i \cdot \theta_2 + \sqrt{I_r \cdot I_0} \cdot e^{-i \cdot \theta_r} + i \cdot \theta_2$$

Logo a energia armazenada será:

$$W \propto I_{1} + I_{2} = 2.I_{r} + 2.I_{o} + \sqrt{I_{r} \cdot I_{o}} \cdot e^{i.\theta_{r}} (e^{-i.\theta_{1} - i.\theta_{2}}) + \sqrt{I_{r} \cdot I_{o}} \cdot e^{-i.\theta_{r}} (e^{i.\theta_{1} + i.\theta_{2}})$$

Na reconstrução resulta, com  $E_c = e^{i \cdot \theta_r}$  e lembrando que  $\tau \propto I = I_1 + I_2$ :

$$I_{t} = \tau \cdot e^{i \cdot \theta_{r}} = 2 \cdot e^{i \cdot \theta_{r}} (I_{r} + I_{0}) + \sqrt{I_{r} \cdot I_{0}} \cdot e^{2 \cdot i \cdot \theta_{r}} (e^{-i \cdot \theta_{1} - i \cdot \theta_{2}}) + \sqrt{I_{r} \cdot I_{0}} \cdot e^{i (\theta_{1} + \theta_{2})}$$

No último termo temos:

$$E_o(e^{1.\theta_1} + e^{1.\theta_2})$$
 ou seja, a soma

coerente das ondas armazenadas nos tempos 1 e 2.

As ondas têm a mesma eficiência de difração e suas intensidades são iguais, provocando o máximo contraste das franjas obtidas.

Uma diferença que surge com respeito a holointerferome tria simultânea é que ambas as ondas reconstruídas são negativas em relação ao objeto, pelo qual formam uma imagem brilhante do mesmo, quando este permanece inalterado. Isto se deve ao fato de que em ambas as tomadas os máximos coincidirem e as ondas, na reconstrução, têm as mesmac fases, porém acrescidas de 180<sup>0</sup>.

A holografia por dupla-exposição elimina os problemas surgidos na simultânea. Tem a desvantagem de registrar dois únicos instantes do fenômeno e de não permitir analisar a figura de interferência por modificação da posição relativa de ambas as ondas.

2.4 - Aplicações da holointerferometria:

Nos ensaios não destrutivos, ou na inspeção, pode-se requerer apenas informações qualitativas das franjas de interferência. Assim, na análise de materiais, conexões inadequadas, termoelementos, semi condutores ou sumidores de calor basta a inspeção visual das distorções da figura interferométrica que deve ser simétrica.

Para outras aplicações relacionadas com a análise quantitativa de deslocamentos, deformações ou tensões, é desejável obter diretamente da figura um mapa do deslocamento ponto a ponto. Esta tarefa é complicada pelo fato de as franjas geradas por deformação não se localizarem unicamente sobre a superfície do objeto.

> 2.5 - Localização e interpretação das franjas de in terferência.

No estudo da holografia interferométrica requer-se, em muitos casos, uma informação quantitativa enquanto em outros casos apenas interessam informações qualitativas. No presente trabalho ambos serão considerados.

Consideremos um deslocamento qualquer de uma superfície originado por uma causa qualquer (aquecimento, torsão, mudanças de umidade, esforços...). A diferença de fase entre a onda original e a onda do corpo deformado é dado por (veja figuras 2.1 e 2.2):  $\delta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \vec{r} \cdot (\vec{n}_0 - \vec{n}_1) \text{ onde:}$   $\Delta \vec{r} \in \text{ o vetor deslocamento de un ponto qualquer do objeto$  $<math display="block">\vec{n}_0 \in \text{ o vetor unitário na direção de observação}$  $\vec{n}_1 \in \text{ o vetor unitário na direção de iluminação}$ 

As franjas de interferência na holografía não se localizam necessariamente sobre a superfície do objeto, mas em outros planos que correspondem ao lugar geométrico onde o contraste ou a visibilidade é máxima. Estas superfícies de localização dependem de diversos fatores, como: as direções de iluminação e de observação, a natureza do objeto em análise. Esta localização obtém-se analisando os raios de luz provenientes das posições antes e depois das deformações.

Tomando como base uma variação nula de  $\delta$ , quando se varia o ângulo de observação permitido pelo detector, pode-se localizar as franjas de interferência. Caso isto não se verifique sabe-se que as franjas não estão localizadas na posição do detector.

Seja o deslocamento considerado na figura 2.1 onde os pontos A, B, ... representam a posição original do objeto, i.é, antes de sofrer qualquer deslocamento, e os pontos A', B', ... os mesmos pontos, porém deslocados de uma distância  $\Delta r$ . Nos pontos A, B,... teremos ondas do tipo  $i.\emptyset_A$ ,  $i.\emptyset_B$ , etc. e nos pontos A', B',... e  $i(\emptyset_A + \delta_A)$ ,  $i(\emptyset_B + \delta_B)$ e , e , etc. e nos pontos A', B',... e , e , e , onde  $\emptyset_A$ ,  $\emptyset_B$ ,... são as fases aleatórias correspondentes à estrutura aleatória da su perfície do corpo e  $\delta_A$ ,  $\delta_B$ ,... são as diferenças de fase devido ao desloca mento dos pontos da superfície.

O detector colocado num certo ponto de observação registrará a intensidade proveniente destes diversos pontos. Apenas as intensida des provenientes dos pontos A e A' ou B e B' ... são detectadas, visto que as interferências ocasionadas pelos pontos cruzados possui uma frequência espa cial muito elevada e o mesmo não consegue detectá-las. Logo, considerando-se as amplitudes iguais à unidade, teremos para a intensidade detectada:

$$I_{D} = (e^{i.\theta_{A}} + e^{i(\theta_{A} + \delta_{A})}) \times (e^{-i.\theta_{A}} + e^{-i(\theta_{A} + \delta_{A})})$$
$$I_{D} = 1 + e^{-i.\delta_{A}} + e^{i.\delta_{A}} + 1$$

Finalmente

 $I_{\rm D}=2(1+\cos\,\delta_{\rm A})$ 

l + cos δ<sub>A</sub> representa fenômenos de interferência devidos exclusivamente à deformação da onda, independente de sua microestrutura. Daí que a holointerferometria pode-se aplicar a objetos quaisquer.

Quando há apenas translação os valores de  $\delta$  são praticamente iguais para os diversos pares de pontos, donde:

 $I_D = 2 (1 + \cos \delta)$  para uma determinada posição de ob servação, n<sub>o</sub>. Se esta posição for modificada, então se passará a observar franjas claras e escuras pois os valores de  $\delta$  são dependentes da direção de observação. Isto é verificado pela equação:

 $\delta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta \vec{r} \cdot (\vec{n}_0 - \vec{n}_1)$  que fornece a diferença de fase entre os pares de pontos considerados. Nesta equação estamos considerando uma luz incidente colimada e uma luz refletida também colimada. Como  $\Delta \vec{r}$  é um vetor constante para todos os pontos na translação pode-se escrever:

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta \vec{r} \cdot \vec{n}_{0} - c \qquad \text{com } \vec{n}_{i} \text{ constante}$$

O esquema da figura 2.1 permite calcular a diferença de caminho entre os raios de luz que parecem provir do mesmo ponto do objeto em ambas as situações. Esta diferença de caminho é dada por:

 $\Delta s = \Delta r \{\cos (\alpha + \varphi) + \cos (\alpha - \varphi)\} = 2.\Delta r \cos \alpha . \cos \varphi$ 

 $\Delta s = 2.\Delta r_s \cos \alpha \qquad \cos \Delta r_s = \Delta r \cos \varphi$ 

0 vetor Δr<sub>s</sub> representa o deslocamento da superfície na direção da bissetriz do ângulo formado pelas direções de incidência e de observação. Esta direção da a localização do vetor sensibilidade (n<sub>s</sub>) e Δr<sub>s</sub> = Δr.n<sub>s</sub>.

Portanto na translação podemos determinar diretamente o valor do  $\Delta r$  projetado sobre a direção de  $\vec{n}_s$  e não o seu valor real.

Para cada franja brilhante temos o valor de  $\Delta$ s igual a um número inteiro de comprimentos de onda. Donde:

 $\Delta s = n. \lambda \qquad e \quad \delta = 2.\pi.n$   $2.\Delta r_s.\cos \alpha = n. \lambda$   $\Delta r_s = n. \frac{\lambda}{2.\cos \alpha}$ 

Dasta última equação conclui-se que o sistema de franjas observado depende do deslocamento, de sua direção, mas não do seu sentido, e das direções de iluminação e de observação. Se o ângulo entre as direções de iluminação e de observação for pequeno, então a distância entre duas franjas vizinhas fornece um deslocamento correspondente do objeto na direção de sensibilidade da ordem de meio comprimento de onda, i.é, 0,3 µm.

É possível determinar o módulo do deslocamento sofrido pelo corpo tirando-se três hologramas em posições diferentes, de preferência nas direções dos eixos cartesianos. Neste caso  $\Delta r = \sqrt{\Delta r_s^2}_x + \Delta r_s^2_y + \Delta r_s^2_z$ . Com isso, não se determina o sentido do deslocamento que é ainda um problema em aberto.

Seja A um ponto de um objeto que sofre uma rotação pura em torno do eixo, perpendicular à página, conforme figura 2.2 (8) e (9). En-



Figura 2.1 - Translação pura de um objeto.



Figura 2.2 - Rotação pura de um objeto.

tão a diferença de caminho entre os dois raios será dada por:

$$\Delta s = A'F + A'G$$

Para um ângulo de rotação a pequeno:

$$\Delta s \simeq \Delta r (sen \emptyset_i + sen \emptyset_i) com \Delta r = x.\alpha$$

As franjas brilhantes (máximos) acontecerão para

Logo:  $\Delta s = n \cdot \lambda$   $\Delta r = n \cdot \frac{\lambda}{\operatorname{sen} \mathcal{I}_{i} + \operatorname{sen} \mathcal{I}_{o}}$ 

Conclui-se que, na rotação pura, a distância entre duas franjas claras adjacentes corresponde a uma rotação de  $\lambda$ /sen  $\emptyset_i$  + sen  $\emptyset_o$  e se  $\emptyset_i$  e  $\emptyset_o$  forem próximos de 90<sup>o</sup> esta rotação será da ordem de  $\lambda$ /2.

Continua o problema do sentido de deslocamento.

0 estudo matemático do movimento com translações e rotações é bastante complicado. Haines e Hildebrand (10), entre outros, apresen tam um modelo matemático para esta interpretação.

Modelos interferométricos para casos particulares de rotação e translação foram feitos por (11) a (15) entre outros.

#### CAPITULO 3

#### BANCO HOLOGRAFICO: SUA CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO.

3.1 - Técnica escolhida.

Para desenvolver o trabalho prático de holografia, escolheu-se a técnica da divisão de feixe por intensidade.

Esta técnica consiste essencialmente na de número 2 de senvolvida anteriormente por Stetson (20),(21). Em vez de usar como divisor de feixe uma lâmina de faces paralelas e transparentes, usou-se um espelho conforme mostra a figura 3.1. No foco da lente colocou-se um filtro espacial.

O esquema completo da técnica como foi desenvolvida no laboratório está representado na figura 3.2. Uma fotografia do esquema montado está na figura 3.3.

A escolha desta técnica deveu-se a duas razões:

a) Os elementos que prejudicam a estabilidade são minimos (o objeto e o holograma foram montados no mesmo suporte), constando apenas dos dois suportes, um do espelho  $E_1$  e o outro do conjunto objeto-holograma. Dependendo das circunstâncias, pode-se montar tudo num suporte só e obter estabilidade maior ainda.

b) O fato de se necessitar apenas um filtro espacial e uma única lente procurando-se, naturalmente, atingir ao máximo o primeiro objetivo deste trabalho.

. Diversos esforços jã foram realizados, antes, no sentido de simplificar os sistemas óticos usados em holografia. Veja (25),(26) e (27) na bibliografia.



Figura 1.3 - Divisor de feixe.



Figura 3.2 - Esquema da técnica usada em laboratório.



## 3.2 - Construção do equipamento

3.2.1 - Mesa holográfica

A mesa usada para a montagen é de madeira com l0cm de espessura e colocada sobre placas de cortiça (pode-se usar mesas de granito). Sobre a mesa foram colocadas duas camadas, uma de papelão e outra de plás tico com bolhas de ar. Sobre estas camadas, quantro câmaras de ar e, finalmente, a caixa contendo areia até uma altura de 20cm. Dentro desta caixa foi montado o banco holográfico, como se pode ver na fotografia mostrada na figura 3.3.

O uso da areia fina de construção traz uma série de vantagens sobre os suportes mecânicos. Além de aumentar a inércia do banco ótico, presta-se muito bem para ajustes finos no alinhamento ótico do sistema.

Para suportes dos espelhos, laser e divisor de feixe, foram utilizados tubos de plástico aos quais colou-se os diversos elementos. Quando possível, procurou-se fazer um encaixe destes elementos nos suportes para evitar ao máximo qualquer problema de estabilidade que pudesse surgir por uma colagem defeituosa ou deslocamento dos mesmos por motivos de batidas. Os tubos enchidos de areia foram afundados uns 10 a 15 cm. A cola usada deve ser apropriada para colagens de metais e vidros. Não convém usar colas plásticas. Elas podem ser dissolvidas em água.

Estas precauções são necessárias para satisfazer as con dições de estabilidade do sistema mecânico <del>descrito</del> descritas no primeiro ca pítulo deste trabalho.

O objeto e a placa holográfica montados sobre um bloco maciço de ferro formam um conjunto único.

3.2.2 - Laser

Nesta montagem, usaram-se lasors de He-Ne padronizados

de potência da ordem de 1 mW. O primeiro usado fornecia uma potência de saída de 0,35 mW (Spectra Physics Model 155). Substituiu-se este por outro de mais potência e mais estabilidade na intensidade de emissão da luz (Jodon Model HN-2SP: 2mW).

Os lasers de pouca potência criam problemas, pois o aumento do tempo de exposição exige maior estabilidade temporal. No entanto estes lasers possuem a vantagem de terem maior comprimento de coerência e serem mais econômicos, fatos estes relevantes no trabalho.

3,2,3 - Espelhos e Divisor de Feixe.

A escolha dos vidros para a construção dos espelhos e do divisor de feixe foi realizada pelo prof. Dr. Carlos Arguello (22). O es pelhamento do vidro foi realizado por aluminização no laboratório da profa. Dra. Zoraide Arguello (22). O tamanho dos espelhos é de 4 cm de diâmetro.

O divisor de feixe é um espelho cuja face espelhada é a posterior. Aproveitando-se o feixe refletido na face anterior, tem-se o feixe referência. E a primeira reflexão na face espelhada fornece o feixe objeto. Os outros feixes são eliminados por um anteparo.

A relação entre as intensidades dos feixes referência e o que ilumina o objeto é aproximadamente de 1:8 (figura 3.1) para um ângulo de incidência de 45<sup>0</sup> para o feixe incidente no divisor.

3.2.4 - Lente e filtro espacial.

A lente do banco holográfico é uma objetiva de microscópio de 10 aumentos (pode-se usar outros aumentos) embutida numa perfuração da parede do suporte do filtro espacial. No plano focal desta lente colocouse o "pinhole" (abertura circular) de 25 <sup>°</sup>m de diâmetro. A função do "pinhole" é eliminar as frequências espaciais, exceto a de ordem zero. Não foi tentado fabricá-lo na UNICAMP por problemas técnicos, apesar de que é possível

fazer furos desta ordem, usando-se lasers de alta energía ou processos químicos (23). Alguns destes furos foram examinados, mas existe o problema das rebarbas, altamente prejudiciais para a função de filtragem espacial.

O pinhole foi colado sobre uma pequena placa metálica de 30 mm de diâmetro e 2 mm de espessura. O conjunto colado no começo da mola do sistema, que funciona como posicionador x-y. A posição da mola é controlada por dois parafusos (45 voltas por polegada) que ajustam a posição do pinhole no eixo ótico (figura 3.3).

A posição do pinhole, no plano focal da lente, fez-se por processo mecânico, antes de prender a lente ao corpo do suporte do filtro espacial.

A mola é colocada dentro de um tubo plástico, revestido internamente por borracha leve para amortecer as frequências naturais de vibração.

Os elementos mecânicos do filtro espacial (figura 3.4), exceto o pinhole, foram fabricados na oficina mecânica do Instituto de Física Gleb Wataghin da UNICAMP (Campinas, SP).

De todos os elementos usados no banco holográfico em referência, apenas a lente (U\$ 22), o pinhole (U\$ 25) e o laser (U\$ 120) são importados.

3.2.5 - Suporte dos elementos holográficos.

Para suporte dos filmes holográficos e placas plásticas foi desenhado um de acrílico. Este suporte é preso fortemente a um imã colocadosobre um bloco de ferro maciço (veja fotografia 3.5).

3.2.6 - Suporte dos objetos.

Quando se usou objetos metálicos o suporte era simples:



Figura 3.4 - Planta do filtro espacial.

÷ . .



Figura 3.5 - Fotografia do suporte holográfico.



um imã. As vantagens deste procedimento são a grande estabilidade na posição do objeto e a extrema simplicidade de posicionamento.

Para sementes, usou-se vidro colado sobre um imã pequeno e as sementes coladas sobre este vidro (figura 3.6). O uso do vidro para prender as sementes traz a vantagem de se poder usar um ponto fixo de referência pois a cola também é transparente. Para facilitar a verificação da estabilidade do sistema colocou-se junto com o objeto em análise um fundo branco para constatar a existência ou não de franjas indesejáveis. Este fundo tanto pode ser um imã como uma placa metálica rigidamente colocada sobre o suporte.

3.3 - Fotômetro.

3.3.1 - Construção e calibração.

O fotômetro foi construído com um foto-resistor de CdS RCA-SQ 2520 conectado a um multitester do tipo US-110 ou AF-105 (16). Quais quer elementos semelhantes a estes resultam equivalentes para o caso.

A calibração e aferição foram realizadas usando-se um medidor de densidade de potência em W/cm<sup>2</sup> marca JODON ES-100. Construiu-se um gráfico da densidade do potência versus resistência do foto-resistor (veja gráfico 3.7).

Caso não se tenha à mão um medidor de potência ou densi dade de potência, a aferição do aparelho far-se-á através da lei de Malus (5). O esquema experimental para o uso desta lei corresponde à figura 3.8.

Como as radiações expontâneas estão sempre presentes e afetam a calibração para densidades de potências baixas, é preciso eliminá-las. Un filtro vermelho (tipo Corning 2408) elimina estas radiações sem prejuízo à luz do laser.

O foto-resistor não possui um comportamento isotrópico na sua superfície e não possui simetria, que é explicável pelo alto grau de





Figura 3.8 - Montagem para a calibração do fotômetro usando a lei de Malus.



Figura 3.9 - Iluminação oblíqua sobre o foto-resistor.

inércia do material fotossensível e pela geometria do filamento do mesmo. Por isso a calibração deve ser feita variando-se lentamente as condições de iluminação do mesmo. A célula foto-resistor tem um tempo de uso relativamente pequeno (de dois a três anos). Diodos de silício, de maior duração podem ser usados (31).

Para usar a lei de Malus procura-se saber a variação  $I_{\theta}$ da intensidade que emerge do polarizador quando este faz um ângulo  $\theta$  com a posição cruzada do polarizador. Elege-se esta posição como referência, pois é a mais exata em determinar-se, já que as variações ao redor desta posição de transmissão nula são fáceis de detectar.

A lei de Malus expressa I<sub>e</sub> em função de I<sub>máx</sub> (a intensidade máxima quando o eixo do polarizador coincide com o eixo de polarização da luz empregada):

$$\frac{I_{\theta}}{I_{\max}} = \sin^2 \theta$$

Assim é possível calibrar o fotômetro dando valores ao  $^{2}$  angulo  $\theta$  e fazendo o gráfico de sen $^{2}$   $\theta$  como função da leitura do fotômetro.

3.3.2 - Medição de intensidades luminosas com o fotômetro (16):

Quando a luz incidente não for normal, verificar-se-á uma diminuição da intensidade verificada pelo aumento da resistência do foto-resistor. Neste caso  $I_{max}$  deve ser multiplicado por cos  $\emptyset$  onde  $\emptyset$  está ilustrado na figura 8.9.

Para verificar o estado em que se encontra a foto-célula, é conveniente contar com uma iluminação padrão em unidades arbitrárias , colocando a foto-célula a uma distância fixa da lâmpada elétrica destinada a este fim. Colocando-a perpendicularmente ao feixe de luz, teremos a leitura

máxima em I e portanto um R mínimo na foto-célula, o R<sub>o</sub>.

É evidente que, como a foto-célula tem um diâmetro de 2 cm e a distribuição espacial do feixe é gaussiano, se o laser oscila no modo TEM<sub>00</sub>; e ainda mais desparelha nos outros modos, as áreas iluminadas não podem ser consideradas de iluminação constante para este diâmetro de 2 cm. Por outro lado, deve-se tomar em conta a grande inércia da foto-célula em responder às variações de intensidade luminosa. Por isso, deve-se concentrar ao máximo na foto-célula a distribuição luminosa com a simetria circular sobre ela e aguardar ao menos cinco segundos antes de fazer qualquer leitura.

É importante nunca iluminar a foto-célula sem antes expandir o feixe luminoso mediante uma lente. Isto evita excessos de intensidade luminosa em região muito pequena da mesma e sua consequente danificação.

3.4 - Transmitômetro.

Considerando-se que a qualidade do holograma está em função de sua transmitância, montou-se um aparelho para medir esta transmi tância: o transmitômetro. O esquema deste aparelho está na figura 3.10.



Figura 3.10 - Transmitômetro.

Uma lampadinha de filamento de 6 watts foi a fonte luminosa utilizada. Um foto-reisitor, Philips Model, funciona como elemento de medição da intensidade transmitida pelo holograma e o mesmo gráfico considerado no estudo do fotômetro (gráfico 3.7) fornece as leituras, sendo  $I = I_t/I_i$  a transmitância de intensidade luminosa.

Como a transmitância de 40% (18) é considerada como excelente basta que  $I_t/I_i = 0,4$  para que se chegue a um bom resultado. Este valor corresponde ao centro da região linear da curva de transmitância versus exposição, para o filme utilizado (figura 1.3). No transmitômetro montado obtevese  $R_i = 3.10^4$ ohms para o  $I_i$  e  $R_t = 3.10^5$ ohms para o  $I_t$ , o que resulta em 0,4 de transmitância. Analizando um holograma, assim obtido, verifica-se isto, pois a maior qualidade corresponde a estes valores.

A distância entre a lâmpada e a posição do holograma no transmitômetro montado é de 50 cm. E a distância entre o holograma e o fotoresistor de 6,5 cm. O cilindro escuro montado entre a posição do holograma e a posição do foto-resistor não deixa que iluminações indesejáveis atinjam o medidor.

#### CAPITULO 4

#### TESTE DO EQUIPAMENTO E SEU USO.

4.1 - Teste do equipamento.

4.1.1 - Laser.

A estabilidade do laser é verificada pelo fotômetro. O laser deve emitir uma luz cuja intensidade seja estável. Num dos lasers ocupados durante o trabalho, houve um problema bastante grande de estabilidade, impedindo que se obtivesse um padrão bom para a transmitância dos hologramas. Foi substituído por outro e o problema desapareceu.

Se o laser usado for desconhecido quanto às suas características, é preciso testar sua coerência espacial e determinar o seu comprimento de coerência, condições necessárias para a construção de hologramas de boa qualidade. A coerência espacial do laser usado no trabalho vale 60cm (se ele emitir no maior número possível de frequências; geralmente seu comprimento de coerência é aproximadamente 1 km).

4.1.2 - Pinhole.

A sensibilidade do posicionamento x-y do pinhole foi testada pelo método da difração. Para isto fez-se a montagem da figura 4.1 onde:

y = 16 mmdiâmetro da mola = 1,4 cmR = 422 cmcomprimento da mola = 4,1 cm $\lambda = 630 \text{ nm}$ h = 0,6 cmb = abertura da fenda.

Como a gillette e a espira da mola formam aproximadamente

uma fenda, pode-se usar a expressão (24):



a) Disposição da mola, gillette e parafuso



b) Esquema completo da difração

Fig. 4.1— Teste da sensibilidade do posicionamento x-y do pinhole.

$$\beta = \frac{k \cdot b}{2} \cdot \operatorname{sen} \theta \qquad \operatorname{com sen} \theta \qquad \frac{y}{R} \quad e \quad k = 2\pi/\lambda$$
0 primeiro minimo acontece para  $\beta = \pi$ . Logo:  
2. $\pi = k \cdot b \cdot \frac{y}{R} = \frac{2 \cdot \pi \cdot b \cdot y}{\lambda \cdot R}$   
 $b = \frac{\lambda \cdot R}{y} = 0,17 \text{ mm}$ 

Para três voltas do parafuso de passo 1 mm, houve um deslocamento de 0,085 mm da mola no ponto X. Isto corresponde a uma variação igual no valor de "b" (abertura da fenda). Logo, para 1/10 de volta do parafuso teremos aproximadamente 3 µm de variação na abertura da fenda. Esta sensibilidade é excelente para o movimento do pinhole colocado no ponto X da mola para a construção do filtro espacial.

Os vidros dos espelhos utilizados na montagem foram testados pelo prof. Dr. Carlos Arguello apresentando no máximo duas franjas de interferência no campo visual. Como este vidro é do tipo comercial de fabricação horizontal a sua planidade é da ordem do comprimento da onda usada tomando-se uma superfície de 1 cm de dimensão.

4.1.4 - Teste do equipamento.

Naturalmente, todo trabalho experimental desenvolvido so tem valor se com ele se pode realizar um trabalho de confiança científica. Assim, se o nosso equipamento não tivesse condições suficientes de estabilidade para fazer holografia nenhum valor científico teria.

Foram feitos diversos testes para verificar a sua estabilidade mecânica. Quase todos os testes durante o expediente normal diurno, enquanto funcionavam nas proximidades uma oficina mecânica e uma oficina de crio-

genia, assim como grandes máquinas frigoríficas de ar e água, resultaram negativos, levando a crer que o equipamento teria problemas graves com a sua estabilidade. Lembramos que tudo foi montado numa caixa de madeira que sofre deformações com variações de temperatura e umidade como pode facilmente entrar em ressonância com ruídos contínuos.

Fazendo os mesmos testes quando o complexo de máquinas estava desligado obteve-se resultados bastante satisfatórios. Assim, verificou-se que, num espaço de tempo de duas horas, pode-se obter hologramas sem campo espúrio de franjas de interferência.

Obteve-se hologramas, a primeira vista muito bonitos e aparentemente bons, mas com campos de franjas, resultantes da instabilidade do filme holográfico. Porém, estes hologramas não levam a resultados de confiança, pois as franjas indesejáveis deformam as franjas em estudo e as conclusões seriam altamente duvidosas.

Nos testes realizados com placas de vidro, observou-se que as franjas parasitas surgiam em hologramas tirados em intervalos maiores que duas horas sendo quase horizontais. Isso levou a pensar que elas fossem devidas à flexão da base da caixa de madeira.

Outro teste importante realizado foi o relativo ao uso de filmes e placas plásticas. Isto foi feito tomando-se como objetivo desenvolver uma montagem holográfica de baixo custo, visto que os filmes e as placas são muito mais econômicas que as placas de vidro. Porém, os suportes destes materiais tiveram que ser modificados diversas vezes para que se evitas sem as deformações destes durante as tomadas holográficas. Estas deformações acontecem facilmente quando se trabalha com mudanças de umidade e nos filmes acresce ainda o fato de eles serem enrolados. Estas deformações foram supe riores ao que se exige de estabilidade.

Para corrigir estas falhas, montou-se um suporte de acrílico inteiriço, com fundo preto (veja figura 3.5). Com isto prejudicou-se um pouco a intensidade luminosa pela reflexão na primeira face. Mas este pro-

blema é menor, pois se pode calibrar as intensidades que atingem o elemento holográfico, antepondo-se ao fotômetro, uma placa de acrílico, idêntica à usada no suporte e na mesma posição daquele. Alguns hologramas continuaram a ter franjas parasitas. O uso do suporte plástico não ofereceu resultados de confiança.

Por outro lado, o uso de placas de vidro é muito mais simples e seguro, pois, estas não sofrem quase deformações devidas a variações do meio ambiente.

Outro elemento que pode trazer instabilidades em tomadas holográficas é o próprio suporte de acrílico. Na figura 3.5 pode-se verificar que foram tomadas todas as precauções para que isto não acontecesse.

4.2 - Placas holográficas.

Existem três tipos de lementos que podem servir para se obter hologramas: filmes, placas plásticas e placas de vidro.

Os resultados crescem relativamente à qualidade dos filmes para as placas de vidro devido ao aumento de rigidez que facilita a estabilidade durante as tomadas, principalmente as de dupla-exposição.

Durante o trabalho teve-se à disposição:

- filmes da Kodak (S0-173) com  $E = 40 \ \mu J/cm^2$ - placas plásticas da Agfa Gevaert  $E = 20 \ \mu J/cm^2$ - placas de vidro da Kodak (120-02)  $E = 40 \ \mu J/cm^2$ 

Estes elementos têm uma resolução próxima a 1800 linhas por mm, permitindo que se trabalhasse com ângulos de até 70<sup>0</sup> entre os feixes objeto e referência (2.d.sen  $\theta = \lambda$ ).

### 4.2.1 - Calibração das placas.

Se tivermos as características das placas ou filmes e o fotômetro calibrado em unidades de potência é simples calcular o tempo de exposi ção para se obter uma boa transmitância de intensidade:

E = I.t I = intensidade incidente

E = característica do filme ou placa.

Caso contrário, teremos que determinar previamente o valor ideal do tempo de exposição a partir dos elementos fornecidos pela placa ou filme e pelo fotômetro calibrado em unidades arbitrárias pela lei de Malus. Isto se consegue verificando-se, em cada tomada holográfica, o valor da transmitân cia até atingir um valor próximo de 40%, o valor central da região linear de resposta do filme. No ponto seguinte analisaremos a influência da revelação no valor da transmitância já que o tempo de revelação também tem influência no valor desta transmitância.

4.3 - Revelação dos Hologramas.

O método usado no processamento das placas determina características muito importantes no holograma. A curva de resposta depende do tempo de revelação, da temperatura e da natureza do revelador. No trabalho, u-sou-se o D-19 da Kodak, bom para grãos finos e ultra-finos. A temperatura de-ve estar entre  $19^{0}$ C e  $20^{0}$ C.

O revelador age sobre os grãos de prata atingidos pela luz tornando-os escuros. Para interromper a revelação põe-se o holograma 30 segundos em água corrente ou em banho ácido. Após isto, fixa-se em Kodak Rapid Fixer cuja função é dissolver os grãos não revelados.

Com um eliminador (marca Majestic) retira-se o hipossulfito residual do fixador reduzindo o tempo de lavar.

É conveniente um banho de 5 minutos en metanol para eli-

minar o agente sésibilizador das placas. Com isto elas ficam mais claras e estáveis.

A secagem da placa pode ser feita mediante um enxágue de água destilada com álcool desnaturalizado (3 em 1), mas é preferível fazer a secagem I, que será explicada a seguir, que permite a observação imediata do holograma.

Um segundo processo de secagem de hologramas tem por objetivo compensar a contração da placa que ocorre na gelatina devido à retirada dos grãos de prata não revelados. Um cuidado nesse sentido é importante para a reconstrução fiel dos hologramas, principalmente o tipo "Denysuk", onde a reconstrução pode ser feita no verde (530 nm), em vez de ser na faixa do vermelho (630 nm). Este tipo de secagem é muito útil nos hologramas do tipo simultâneo ("real time").

O branqueamento de hologramas é usado para melhorar a eficiência de difração, que assim pode chegar a 70%. O inconveniente do bran queamento é a introdução de ruídos pelo aumento de dispersão da luz e o au mento da instabilidade do mesmo. O tipo mais comum de branqueador é o Fe CNK a 5%.

4.3.1 - Resumo da revelação de hologramas.

a) Revelar 5 minutos em D-19 da Kodak com agitação contínua a 20<sup>0</sup>C. Enxaguar 30 segundos;

 b) Fixar 5 minutos em Kodak Rapid Fixer em agitação contínua. Enxaguar 30 segundos;

c) Limpar um minuto e meio em eiliminador Hipo, quantidade mínima e jogar fora o líquido. Lavar 5 minutos em água corrente;

d) Remover o sensibilizador cinco minutos em metanol. Enxaguar um minuto;

e) Secar ou branquear e secar.

- 4.3.2 Secagen para evitar encolhimento da emulsão.
- Tipo I: um minuto e meio em álcool desnaturalizado com agitação contínua; um minuto e meio em isopropanol, tirar e secar num jato de ar.
- Tipo II: Fazer diversas tentativas com trietanolamina diluída em água. A proporção requerida depende da transmitância, por exemplo 6%. O tempo de dura ção depende do holograma.

4.3.3 - Branqueamento.

a) 3 minutos em solução de Fe CNK a 5%;

b) 5 minutos de lavada em água corrente;

c) secar.

4.4 - Aplicações do equipamento.

4.4.1 - Hologramas tirados.

O projeto elaborado e desenvolvido até aqui foi utilizado para tirar uma série de hologramas de sementes (feijão e milho). Um dos primeiros hologramas interferométricos de feijão está na figura 4.2 que foi obtida por dupla-exposição na presença de variações de umidade. Esta variação de umidade foi provocada por uma simples expiração sobre a semente. Observando-se esta fotografia verifica-se que, além de existirem as franjas que correspondem a uma deformação da semente como um todo, existem as franjas locais de muito interesse.



Figura 4.2 - Holograma de sementes de feijão sob efeito de ar expirado sobre eles.



Figura 4.3 - Holograma de sementes de feijão em presença de evaporação de água.

Ja em 1867 Williams (28) e Fox - Puffer em 1975 (29) e 1976 (30) aplicaram a holointerferometria em fisiologia de plantas e no estudo de coleópteros.

Para analisar melhor o comportamento da semente na presença de variações de umidade fez-se uma série de tomadas com dupla-exposição, com intervalos regulares de tempo. Escolheu-se uma destas tomadas para uma análise mais específica. A fotografia do holograma mostrado na figura 4.3 foi escolhido para isto. A variação da umidade foi produzida por um recipiente circular de 2 cm de diâmetro colocado a 3 cm abaixo das sementes. As características desta tomada foram:

	Intensidade de referência :	: 1.3 µW/cm <sup>2</sup>
-	Intensidade objeto:	0.5 µW/cm <sup>2</sup>
-	Tempo de exposição:	10s + 10s
-	Intervalo das exposições:	5 minutos
-	Temperatura ambiente:	23 <sup>0</sup> C

- A tomada foi iniciada 10 minutos após a colocação do recipiente com água.

A série de hologramas tirados, à qual pertence a figura 4.3, apresentam todos um conjunto de franjas parecidas. Desde a primeira tomada o corpo das franjas tem conservado um formato parecido, isto que a tomada iniciou quando se colocou a água debaixo das sementes.

4.4.2 - Interpretação das franjas de sementes.

Na fotografia da figura 4.4 observam-se as mesmas semen tes, porém, antes de serem holografadas. Nesta fotografia constata-se mais claramente o local onde as sementes foram fixadas no vidro. Na interpretação das franjas de interferência é importante a localização dos pontos fixos do objeto, pois a partir deles é possível enumerar as franjas e consequentemente





Figura 4.4 - Fotografia dos feijões antes de serem holografados.

determinar a componente na direção da sensibilidade dos deslocamentos havidos no objeto.

Algumas considerações da fisiologia da semente são importantes serem consideradas aqui.

Tanto nas células vivas como nas mortas encontrase uma quantidade considerável de substâncias coloidais. As pro teínas e os polipéptidos são coloidais hidrófilos dotados de uma grande atração pela água. Além disso as células vegetais possuem uma considerável quantidade de glucídios, em forma de celulose e amido, nos quais a água está fortemente retida. A absorção da água,pela superfície destes coloides hidrófilos, é de importância fundamental no processo chamado de "imbibicão". As sementes, que tem um conteúdo, em substâncias coloidais, bastante elevado, sofrem uma absorção considerável. Claro está, gracas a isto, a principal entrada de água no interior da semente em germinação se realiza pelo processo de imbibição. Como a variação de umidade, durante as tomadas holográficas feitas, foi pequena e o tempo de ação relativa mente rápido é prefeitamente concebível admitir a figura 4.5 onde a região hachuriada representa a parte da semente não afetada pelo aumento de água dentro da mesma. Conclui-se desta maneira que o centro do corpo permaneceu rígido e pode-se observar os deslocamentos locais que a semente sofreu na sua super fície e a região logo abaixo dela.



Figura 4.5 - Semente afetada por pequenas umidades.

Analizando a semente, fixa e absorvendo umidade, tudo leva a crer que a mesma sofra principalmente deslocamentos superficiais e apenas no sentido de aumento de volume. Por outro lado, verificando como as mesmas estão fixas ao suporte (figura 4.4), dificilmente os últimos serão detectados. Então pode-se aplicar a teoria da parte 2.5 e escrever que:

 $\Delta r_s = n \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \cos \alpha}$  onde  $\Delta r_s$  é o deslocamento na direção da sensibilidade, i.é,  $\Delta r_s = \vec{r} \cdot \vec{n}_s \mod \Delta r$  sendo o deslocamento real.

Para um ângulo fixo entre  $\vec{n}_i \in \vec{n}_o$  podemos con siderar que  $\Delta r_s = n.u_{d.s.}$ , com  $u_{d.s.} = \frac{\lambda}{2.\cos \alpha}$  uma unidade arbitrária de deslocamento na direção da sensibilidade.

Seja a figura 4.6 onde se considera um deslocamento qualquer. Estes deslocamentos são indicados em unidades  $u_{d.s.}$ . Cada unidade corresponde a uma franja clara de interferência. Assim, partindo do ponto fixo sobre o plano P, podemos concluir que em "1" houve um deslocamento de  $\Delta r_s = 1 u_{d.s}$ , em "2" duas unidades, etc. No esquema considerado vê-se que  $\Delta r_s$ em "2" é igual a  $\Delta r_s$  em "4", correspondendo a um mesmo deslo camento. Logo, analisando o feijão do meio da figura 4.4 e,fazendo um diagrama da primeira linha escura (figura 4.7) a partir do plano fixo, conclui-se que esta linha representa um des locamento  $\Delta r_s = \frac{1}{2} u_{d.s.}$  na região registrada. Não se sabe , a priori, se ela representa um aumento ou uma diminuição de vo lume, como jã foi frisado.

Ainda com relação à figura 4.4 verifica-se uma simetria bastante grande na distribuição das franjas que perm<u>i</u> te afirmar que a semente sofreu mudanças simétricas em relação ao seu plano de simetria.

A região de observação, que pode ser interpreta da diretamente, é aquela que está na nossa frente, ao redor da valvula. Ela pode ser assumida, com mínimo erro, como sendo plana para efeitos de interpretação de franjas. Assumindo, tam bém que as deformações são do mesmo tipo dentro dessa região, os locais de maior concentração de linhas indicam diretamente onde há maior deformação.

Como já foi ressaltado, não se sabe, por uma simples observação, se as franjas correspondem a um ou outro sentido de deslocamento. Existe, porém, uma maneira para se ter certeza se as franjas correspondem todas a um mesmo sentido de deslocamento ou não. A figura 4.8 ajuda a esclarecer isto. As franjas claras do objeto holografado são indicadas pe-



Figura 4.6 - Deslocamento hipotético numa semente.



Figura 4.7 - Diagrama da primeira franja escura da semente da figura 4.4.



Figura 4.8 - Deformação de uma superfície medida em unidades u<sub>d.s</sub>.

los vetores sensibilidade. Se, ocasionalmente, se tem uma deformação do tipo indicada na figura pode-se verificar que a franja clara de nº 4 permanecerá fixa ao ser modificada a posição de observação, pois ela se encontra sobre a superfície do objeto correspondendo a um deslocamento nulo e, portanto, a um ponto fixo, e a franja será de ordem zero.

Sabendo-se o sentido de deslocamento havido sabese perfeitamente, neste caso, o comportamento do corpo. O pro  $\pm i$ blema se torna, novamente, insolúvel se tivermos muitas franjas quando, então, teremos apenas certeza das duas primeiras franjas que correspondem a n = 1 e 2 ou 1 e 0, enquanto que a terceira podera ter n = 3 ou 1, e assim por diante.

Observando-se os hologramas com luz de laser pode-se observar claramente que a região da válvula é atuante e sofre deslocamentos que se apresentam muito simétricos.

<u>OBSERVAÇÃO</u>: Várias outras técnicas da ótica coerente, particularmente a holointerferometria simultânea, a interferometria e o "speckle", poderiam auxiliar numa pescuisa que tivesse como finalidade a determinação completa do deslocamento da superfície. Os próprios hologramas por dupla-exposição podem dar uma informação mais completa se analisados segundo as técnicas das referências (11) e (13). Em etapas intermediárias é possível que a determinação do tipo de deslocamento caracte rístico do processo viesse a ajudar muito na interpretação rá pida dos deslocamentos.

#### CONCLUSÕES:

- O banco holográfico, montado e descrito neste trabalho, é de muita utilidade na aplicação da holografia. Com ele se pode desenvolver uma série de trabalhos no campo da ótica. Foram fabricados com ele redes de difração, estudadas co lagens de papel que monstram outras utilidades, além do estudo de sementes.

- Este banco holográfico é muito simples, estável e de baixo custo monetário sendo, por isso, possível de ser reproduzido e utilizado em qualquer Universidade ou Instituto do país.

- No trabalho realizado com sementes verificouse a grande sensibilidade na observação dos deslocamentos superficiais da semente podendo se constituir em um grande subs<u>í</u> dio para os estudos de fisiologia vegetal.

- A presente tese aporta um conhecimento mais direto da holografia para os pesquisadores que desejarem se in troduzir nesse campo.

BIBLIOGRAFIA

- 1. Lunazzi J.J. DENIS GABOR PREMIO NOBEL DE FISICA Ciência Nueva, nº 14
  pp 7 a =2 1972
- 2. Gabor D. A NEW MICROSCOPE PRINCIPLE Nature (Londres), nº 161 pp 771 (1948)
- 3. Lunazzi J.J. CURSO SOBRE HOLOGRAFIA Campinas São Paulo Brasil 1974
- 4. Klein Miles V. OPTICS John Wiley e Sows, INC (New York) 1970
- 5. Jenkins Francis A. and White Harvey E. FUNDAMENTALS OF OPTICS McGraw Hill Book Company - 1976
- 6. Parrent George B. and Thompson Bian J, PHYSICAL OPTICS NOTEBOOK Society of Photo-optical Inst. Engineers - California - 1971
- Hecht Eugene and Zajac Alfred OPTICS Addison-Wesley Publishing Company - Massachusetts - 1974
- Collier Robert J. Burckhardt Christoph B. and Lin Lawrence OPTICAL HOLO\_ GRAPHY - Academic Press (New York) - 1971
- 9. Calatroni J.A.E., Lunazzi J.J., Rabal H.J. e Garavaglia M. ALGUMAS APLI -CACIONES DEL LASER: FOTOELASTICIMETRIA, INTERFEROMETRIA Y HOLOGRAFIA - Anales del LIMIT - Argentina - 1976
- 10. Haines K. A. and Hildebrand B.P. SURFACE DEFORMATION MEASUREMENT USING THE WAVEFRONT RECONSTRUCTION TECHNIQUE - Applied Optics - Vol 5, nº 4 pp 995 - 602
- 11. Bellani V. Fossati and Sona A. MEASUREMENT OF THREE-DIMENSIONAL DISPLA-CEMENT BY SCANNING A DOUBLE-EXPOSURE HOLOGRAM - Applied Optics - Vol 13, nº 6, pp 1337 - 1341
- 12. Abramson Niels THE HOLO-DIAGRAM Applied Optics: Vol 8, nº 6, pp 1235 - 1240 Vol 9, nº 1, pp 97 - 101

Vol. 9, nº 10, pp 2311 - 2320 Vol. 11, nº 5, pp 1143 - 1147

- 13. Aleksandrov E.B. and Bonch-Bruevich A.M. INVESTIGATION OF SURFACE ATRAINS BY THE HOLOGRAM TECHNIQUE - Soviet Physics - Technical Physics - Vol. 12 nº 2, pp 258 - 265
- 14. Janta J. and Miler M. MODEL INTERFEROGRAM AS AND AID FOR HOLOGRAPHIC IN-TERFEROMETRY - J. Optics (Paris) Vol 8, nº 5, pp 301 - 307
- 15. Hecht Norman L., Minardi John E., Lawis David and Fusek Richard L. QUAN-TITATIVE THEORY FOR PREDICTING FRINGR PATTERN FORMATION IN HOLOGRAPHIC IN-TERFEROMETRY - Applied Optics - Vol. 12, nº 11, pp 2665 - 2676
- Lunazzi J.J. TRABAJO DE INVESTIGACION II, APRESENTADO NO DEPARIAMENTO DE FISICA - Universidad Nacional de La Plata, La Plata - Argentina - 1974
- 17. Caulfield H.J. and Lu Sun THE APPLICATIONS OF HOLOGRAPHY Wiley-Interscience - New York - 1970
- 18. Yu Francis T.S. INTRODUCTION TO DIFFRATION, INFORMATION PROCESSING AND HOLOGRAPHY - The MIT Press - Cambridge - 1973
- 19. Lipson, Stefen G. OPTICAL PHYSICS- Cambridge University Press - 1969.
- 20. Stetson Karl A. and Powel Robert L. HOLOGRAM INTERFEROMETRY The Optical Society of America - Vol. 56, nº 9 - pp 1161 - 1166 (1966)
- 21. Jodon Engineering Association HOLOGRAM CATALOGUES
- 22. Arguello Carlos e Zoraide PROFESSORES DA UNICAMP Departamento de Fisica Aplicada
- Pinhole pode ser construído seguindo o processo de Young M. American J. Physics - nº 40, pp 715 (1972)

- 24. Halliday Resnick FISICA II VOL. 2 Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. - Brasil - 1976
- 25. Taylor C. E. American Journal of Physics- Nº 39, pp 417 (1971)
- 26. Wise J. American Journal of Physics nº 40, pp 1866 (1972)
- 27. Pater A. G. and George S. A. \_ American J. Physics Nº 43, pp 954 (1975)
- 28. Williams G. T. HOLOGRAPHIC VISUALIZATION OF PLANT MOVEMENT Nature, Vol. 215, pp 490 - 491 (1976)
- 29. Fox M. D. and Puffer L. G. ANALYSIS OF TRANSIENT PLANT MOVEMENTS BY HO-LOGRAPHIC INTERFEROMETRY - Nature - Vol. 261, pp 488 - 490 (1976)
- 30. Fox M. D. and Puffer L. G. HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRIC MEASUREMENTS OF MOTIONS IN NATURE PLANTS - Plant Physiol. Vol. 60 - pp 30 - 33 (1977)
- 31. American J. of Physics, nº 44 pp 399 (1976)