

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AUTOMATIZAÇÃO DA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS
PELA HOLOGRAFIA INTERFEROMÉTRICA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

ARMANDO ALBERTAZZI GONÇALVES JÚNIOR

FLORIANÓPOLIS, MAIO DE 1984.

AUTOMATIZAÇÃO DA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS
PELA HOLOGRAFIA INTERFEROMÉTRICA

ARMANDO ALBERTAZZI GONÇALVES JÚNIOR

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de:

"MESTRE EM ENGENHARIA"

Especialidade ENGENHARIA MECÂNICA - área de concentração PROJETO e
aprovada em sua forma final pelo
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
da Universidade Federal de Santa Catarina.

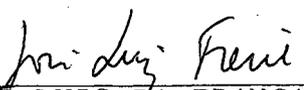


PROF. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr.-Ing.
Orientador

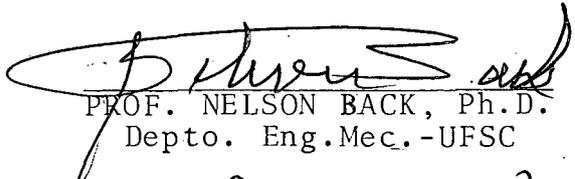


PROF. ARNO BLASS, Ph. D.
Coordenador do Curso

Apresentada perante a banca examinadora composta por:



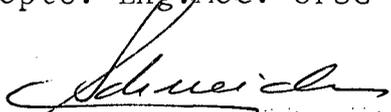
PROF. JOSÉ LUIS DA FRANÇA FREIRE, Ph.D.
Depto. Eng.Mec.-PUC-RJ



PROF. NELSON BACK, Ph.D.
Depto. Eng.Mec.-UFSC



PROF. CARLOS ALBERTO FLESCHE, M.Eng.
Depto. Eng.Mec.-UFSC



PROF. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr.-Ing.
Depto. Eng.Mec.-UFSC

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Alberto Schneider pela orientação e dedicação na realização deste trabalho;

Aos funcionários, estagiários e bolsistas do LABMETRO, que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho;

Ao acadêmico Fábio da Purificação de Bastos pela valiosa ajuda na parte experimental;

À Srt^a Suêd Nazaré dos Santos pela datilografia e montagem deste trabalho;

À Comissão Nacional de Energia Nuclear CNEN, pela concessão da bolsa.

ÍNDICE

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
RESUMO	iii
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Holografia Interferométrica	1
1.2 - Diretrizes do Trabalho	3
2 - PRINCÍPIOS DA HOLOGRAFIA	5
2.1 - Introdução	5
2.2 - Método Geométrico	5
2.2.1 - Reprodução de uma Onda Plana	5
2.2.2 - Reprodução de uma Onda Esférica	13
2.2.3 - Reprodução de uma Onda Qualquer	13
2.3 - Método Analítico	14
2.3.1 - Caracterização de uma Onda pela Notação Complexa	14
2.3.2 - Geração do Holograma	16
2.3.3 - Reconstrução	17
3 - HOLOGRAFIA INTERFEROMÉTRICA	19
3.1 - Holografia Interferométrica de Dupla Exposição	19
3.2 - Holografia Interferométrica em Tempo Real	20
3.3 - Holografia Interferométrica em Tempo Médio	21

3.4	-	Formação e Interpretação das Franjas de Interferência	21
3.4.1	-	Formação das Franjas de Interferência	22
3.4.2	-	Ordens de Franja	24
3.4.3	-	Sensibilidade e Resolução	25
3.4.4	-	Determinação dos Deslocamentos	28
3.5	-	Método para Deslocamento Unidirecional (1-D)	28
3.6	-	Método para Deslocamento Bidirecional (2-D)	31
3.7	-	Método para Deslocamento Tridirecional (3-D)	34
3.8	-	Método Diferencial	35
4	-	DIGITALIZAÇÃO DE UM MAPA DE FRANJAS	37
4.1	-	Métodos Convencionais para Determinar a OF	37
4.2	-	Importância da Automatização	41
4.3	-	Método Desenvolvido	41
4.3.1	-	Viabilidade	41
4.3.2	-	Instrumentação	44
4.3.3	-	Programação	47
4.3.4	-	Aspectos Operacionais	52
4.3.5	-	Fontes de Erros	52
4.4	-	Aplicabilidade	53
5	-	TRATAMENTO DE DADOS	54
5.1	-	O Programa de Processamento e Documentação	54
5.2	-	Entrada de Dados	54
5.2.1	-	Observação do Corpo Via Espelhos Planos ..	56
5.3	-	Processamento de Dados Brutos	57
5.3.1	-	Método Unidirecional	57
5.3.2	-	Método Bidirecional	57
5.3.3	-	Método Tridirecional	59
5.4	-	Processamentos Especiais	59
5.4.1	-	Teste Unidirecional	59
5.4.2	-	Eliminação do Deslocamento de Corpo Rígido	60
5.4.3	-	Deslocamento Teórico	60
5.5	-	Documentação dos Resultados	61
5.5.1	-	Tabelas	61
5.5.2	-	Gráficos das Componentes	61

5.5.3 - Gráficos em Perspectiva	61
5.5.4 - Curvas de Nível	62
5.6 - Aspectos Gerais	62
6 - DESEMPENHO DO SISTEMA DESENVOLVIDO	63
6.1 - Deformações em uma Viga Engastada	63
6.1.1 - Especificação do Corpo de Prova	63
6.1.2 - Montagem Experimental	64
6.1.3 - Medição do Deslocamento com Recursos Conven cionais	67
6.1.4 - Resultados Experimentais	69
6.1.5 - Análise dos Resultados	76
6.2 - Movimentos Especiais de um Corpo	79
6.2.1 - Montagem do Experimento	79
6.2.2 - Campo de Deslocamento Teórico	81
6.2.3 - Resultados Experimentais	83
6.2.4 - Análise do Desempenho	89
7 - APLICAÇÕES GERAIS DO SISTEMA	92
7.1 - Flexão de uma Viga Engastada	92
7.2 - Flexão de uma Placa Biengastada	93
7.3 - Flexão de uma Placa Apoiada em Três Pontos	95
7.4 - Modo de Vibração de uma Viga	97
8 - CONCLUSÃO	100
9 - REFERÊNCIAS	102

RESUMO

Por meio do desenvolvimento de uma metodologia automatizada, viabilizou-se a utilização da holografia interferométrica como uma prática ferramenta para a medição de campos de deslocamentos/deformações.

Um sistema automatizado para a aquisição dos dados oriundos das franjas de interferência foi desenvolvido e testado. Os dados são obtidos a partir de uma holografia de dupla exposição a través da qual, por meio de uma técnica especial, obtém-se uma imagem real do mapa das franjas de interferência. Esta é digitalizada segundo uma malha e são obtidas as respectivas ordens de franja. Utilizou-se um microcomputador e uma plotadora basicamente.

Baseados nas teorias clássicas, foram formulados e adaptados algoritmos para a quantificação de campos de deslocamentos a partir dos dados obtidos dos mapas de franjas. Por meio de recursos matemáticos, computacionais e gráficos, foram introduzidos recursos especiais de processamento dos dados e de apresentação de resultados, permitindo, com os documentos gerados, uma ampla análise dos aspectos qualitativos e quantitativos dos mesmos.

Aplicações práticas do sistema desenvolvido são apresentadas como forma de avaliar o seu desempenho metrológico e as vantagens da automatização.

ABSTRACT

An automatic methodology has been developed to use holographic interferometry as a practical tool in the microdisplacement /deformation field measurements.

An automatic data acquisition system, using for data obtained from the interference fringe pattern, is developed and tested. All data are obtained from a real image of the interference fringe pattern generated from a specially illuminated double exposure hologram. This real image is digitalised according to a grid and the fringe orders are obtained. A microcomputer and a plotter were utilised.

Based on classical theories, algorithms are formulated and adapted to quantify displacement fields from fringe pattern digitalisation data. Using mathematical, computational and graphical means, special data manipulation and result presentation were introduced, the generated documents allowing for a full and thorough analysis of the qualitative and quantitative aspects.

Practical applications of the developed system are presented in order to evaluate its metrological performance and the automation's advantages.

RESUMO

Per la kreskiĝo de aŭtomatigita metodologio, vivipoviĝis la utiligo de la interferometra holografio kiel praktika mezuraparato de kampoj de mikrotranslokigoj/deformoj.

Unu aŭtomatigitan sistemon por la akirado de la elementoj devenaj el la interferaj franĝoj estas disvolvita kaj testita. La elementojn estas havigitaj ekde unu duoblekspona holografio, tra la incidenceco de unu lumfasko, kiu produktas realan bildon de la mapo de la interferaj franĝoj. Ĉi tiu estas nombrita laŭretere kaj oni havigas la franĝordojn. Oni utiligis unu mikrokomputilon kaj unu desegno-aŭtomaton baze.

Surbaziĝe en la klasikaj teorioj, estas formulitaj kaj adaptitaj algoritmojn por la kvantumigo de la translokiĝaj kampoj ekde la elementojn havigitaj el la franĝo-mapo. Pere de matematikaj, komputigaj kaj grafikaj rimedoj, oni enmetis specialajn rimedojn de procesado de la elementoj kaj de prezentado de la rezultoj, permesante, kun la produktitaj dokumentoj, vastan analizon de ilia kvalitaj kaj kvantaj aspektoj.

Praktikajn aplikadojn de la disvolvita sistemo estas prezentitaj kiel maniero de taksigi ĝian metrologikan plenumon kaj la profitojn de la aŭtomatigo.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - A HOLOGRAFIA INTERFEROMÉTRICA

Em 1948 o cientista inglês Dennis Gabor publicou um trabalho no qual apresentava a formulação de um novo princípio, o "princípio da reconstrução da frente de onda", posteriormente denominado holografia. (do grego, holos = todo). |1 e 2|

Somente a partir de 1963, após o advento do LASER, os primeiros trabalhos práticos envolvendo aplicações da holografia começaram a surgir |3 a 6|. Desde então, a holografia interferométrica tem sido usada como uma importante ferramenta em vários campos da mecânica experimental:

- medição de microdeslocamentos |7 a 13|
- medição de deformações mecânicas |14 a 19|
- análise experimental de tensões |20 a 22|
- determinação do fator de intensificação de tensões |15 e 24|
- determinação de propriedades dos materiais |25 e 26|
- mecânica da fratura |26 a 28|
- determinação de modos e amplitudes de vibrações |29 a 31|

- controle de qualidade |22 e 26|

A análise de um problema por meio da holografia interferométrica consiste na interpretação do mapa de franjas resultante da interferência entre duas particulares frentes de onda. Ambas as frentes de onda originam-se de um mesmo corpo, porém a cada uma corresponde um estado de deformação e/ou posicionamento geométrico distinto. Como resultado da holografia interferométrica, almeja-se determinar o campo de deslocamentos sofrido pelo corpo quando este passa de um estado ao outro.

Qualitativamente, a interpretação do mapa de franjas é relativamente simples e direta. Por ser uma técnica de campo completo - caracterizada por reunir informações acerca do comportamento de todos os pontos contidos dentro do campo visual - é muito utilizada e difundida.

A análise quantitativa não é tão direta. Em geral, envolve o levantamento de um grande volume de dados experimentais e exige processamento por sofisticadas rotinas de cálculo.

A complexidade dos métodos de quantificação pela holografia interferométrica varia com a natureza do problema enfrentado. Quando a direção do deslocamento é conhecida em todo o campo visual, o tratamento matemático dos dados experimentais é relativamente simples. A complexidade aumenta consideravelmente quando se trata de determinar a natureza tridirecional do campo de deslocamentos, bem como aumenta o montante de dados experimentais, que no mínimo triplica. Alguns métodos específicos foram formulados e têm sido usados. |7 a 10, 12, 13, 18 a 21, 32, 33|.

A forma clássica de abordar um problema genérico por meio da holografia interferométrica consiste em discretizar a região estudada com auxílio de uma malha desenhada "in loco". A seguir, uma fotografia é obtida da imagem reconstruída pela holografia, na qual aparecem as franjas de interferência. A ordem de franja absoluta para cada ponto da malha é determinada. Este processo é repetido para mais dois ângulos de observação distintos. Com base ainda em parâmetros ligados à disposição geométrica dos componentes ópticos, as três componentes do deslocamento são calculadas. Os resultados estão sujeitos a erros oriundos principalmente da imprecisa atribuição visual da ordem de franja. O mon-

tante de operações envolvidas na aquisição visual dos dados e seu processamento tornam esta técnica bastante morosa e enfadonha, limitando em muito suas aplicações.

1.2 - DIRETRIZES DO TRABALHO

Almejou-se, através da automatização das etapas de aquisição e processamento de dados holograficamente gerados e da documentação dos resultados, viabilizar a holografia interferométrica como uma ferramenta prática para a medição de campo de microdeslocamentos/deformações, reduzindo-se o número de fatores responsáveis pela morosidade e complexidade. Por meio de recursos adicionais procurou-se aumentar a versatilidade das aplicações e as potencialidades da análise, interpretação e documentação dos resultados. Para atingir tais objetivos o plano de trabalho constou das seguintes etapas, que formam, igualmente, a estrutura desta dissertação:

a) Estudo dos métodos de quantificação do deslocamento a partir do mapa de franjas:

Após um estudo detalhado dos princípios da holografia e da holografia interferométrica, estabeleceu-se reunir as principais formulações e teorias classicamente aceitas para o tratamento de dados de origem holográfica, bem como a forma de processamento adequada, como apresentado nos capítulos 2 e 3.

b) Automatização da aquisição de dados:

Por meio de testes e experiências com equipamento auxiliar, foi avaliada a possibilidade da automatização da etapa de aquisição de dados e, se possível, desenvolvida. Deste estudo, e da descrição da instrumentação desenvolvida consta o capítulo 4.

c) Automatização do processamento e da documentação:

As diversas rotinas de processamento foram reunidas em um único programa para computador, bem como a documentação e análise foram aprimoradas por meio de recursos matemáticos e gráficos.

Adotou-se como desejável que a metodologia usada para o tratamento matemático dos dados holograficamente obtidos deveria

englobar os seguintes casos:

- determinação do campo de deslocamentos segundo uma direção prefixada;
- determinação do campo de deslocamentos contido em um plano conhecido;
- determinação de um campo de deslocamentos genérico espacial.

A apresentação e documentação de dados e resultados deveria possibilitar tanto a análise do ponto de vista qualitativo, como quantitativo. Para tal, seria conveniente a apresentação de resultados na forma de gráficos (planos e em perspectiva) e de tabelas.

Alguns tratamentos matemáticos, como por exemplo a eliminação do movimento de corpo rígido, nos resultados são de especial interesse na análise e determinação de deformações e - indiretamente - tensões.

O desenvolvimento e as potencialidades deste programa são tratados detalhadamente no capítulo 5.

d) Testes & aplicações:

Aplicações práticas do sistema desenvolvido foram realizadas como forma de avaliar o seu desempenho e as vantagens da automatização. Estas são descritas e avaliadas nos capítulos 6 e 7.

2 - PRINCÍPIOS DA HOLOGRAFIA

2.1 - INTRODUÇÃO

Com o intuito de fundamentar, demonstra-se como uma frente de onda qualquer pode ser reproduzida (gravada e reconstruída) por meio da holografia. Esta propriedade é provada por dois métodos distintos: o geométrico e o analítico.

2.2 - MÉTODO GEOMÉTRICO

Para expor, de maneira simples, a forma de gravar e reconstruir uma frente de onda qualquer, o problema é dividido em três etapas: onda plana, onda esférica e onda qualquer.

2.2.1 - Reprodução de uma Onda Plana

Seja O uma onda plana de comprimento de onda igual a λ , propagando-se num meio homogêneo, formando um ângulo α com o eixo X (fig. 2.1). Esta onda será gravada e posteriormente reconstruída por meio da holografia.

Seja agora uma segunda onda plana O' , de mesmo λ , que se propaga segundo um ângulo qualquer α' com o eixo X . Esta onda é denominada onda de referência. Por simplicidade supor que O e O' têm a mesma amplitude de radiação.

A superposição das ondas O e O' em uma mesma região do espaço dá origem a uma interferência. Como ambas têm iguais comprimentos de onda, a onda resultante é uma onda estacionária. A figura 2.2 mostra esta interferência. As linhas cheias mostram a posição dos ventres, ou seja, regiões onde há interferência construtiva, portanto máximas amplitudes. As linhas tracejadas mostram a posição dos nós, onde há interferência destrutiva completa, resultando amplitudes nulas independentemente do tempo.

Para gravar a onda O para posterior reconstrução, uma placa H , de material sensível à intensidade da radiação dessas ondas, é posicionada na região onde há interferência, como mostra a figura 2.3. Por comodidade a placa H é posicionada normalmente

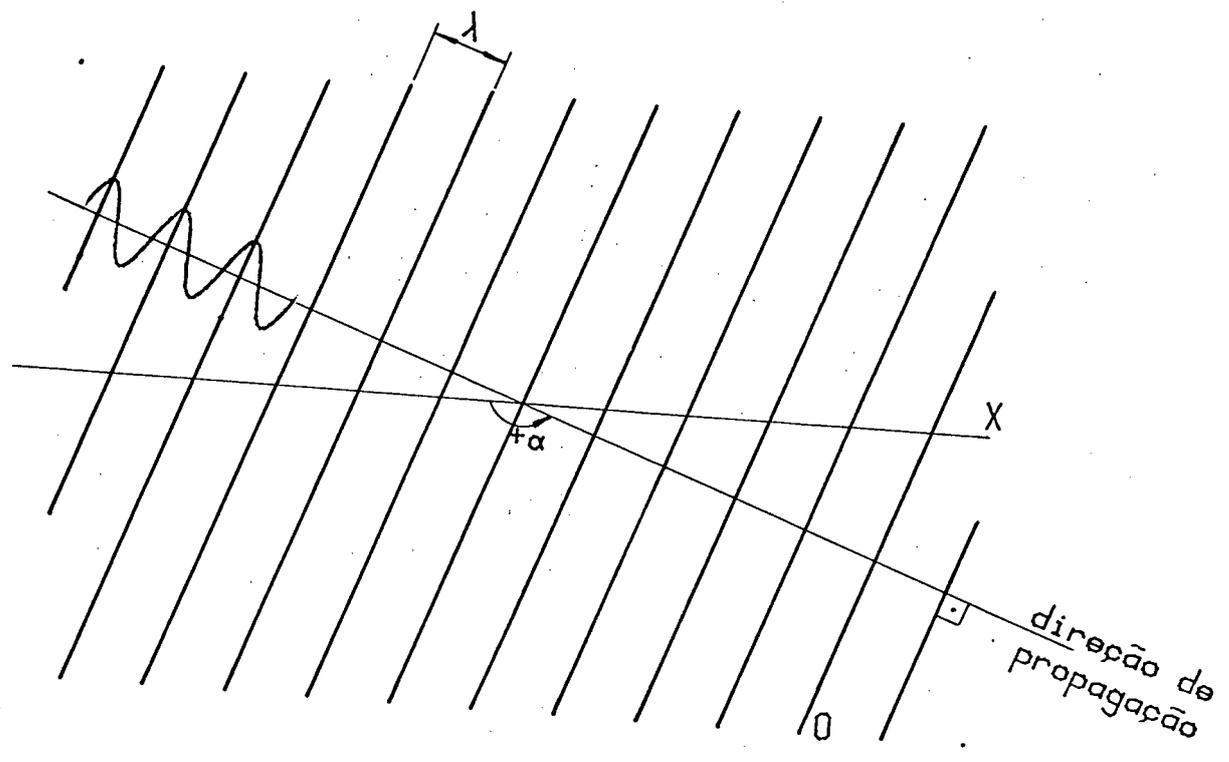


Fig 2.1 - Propagação de uma onda plana

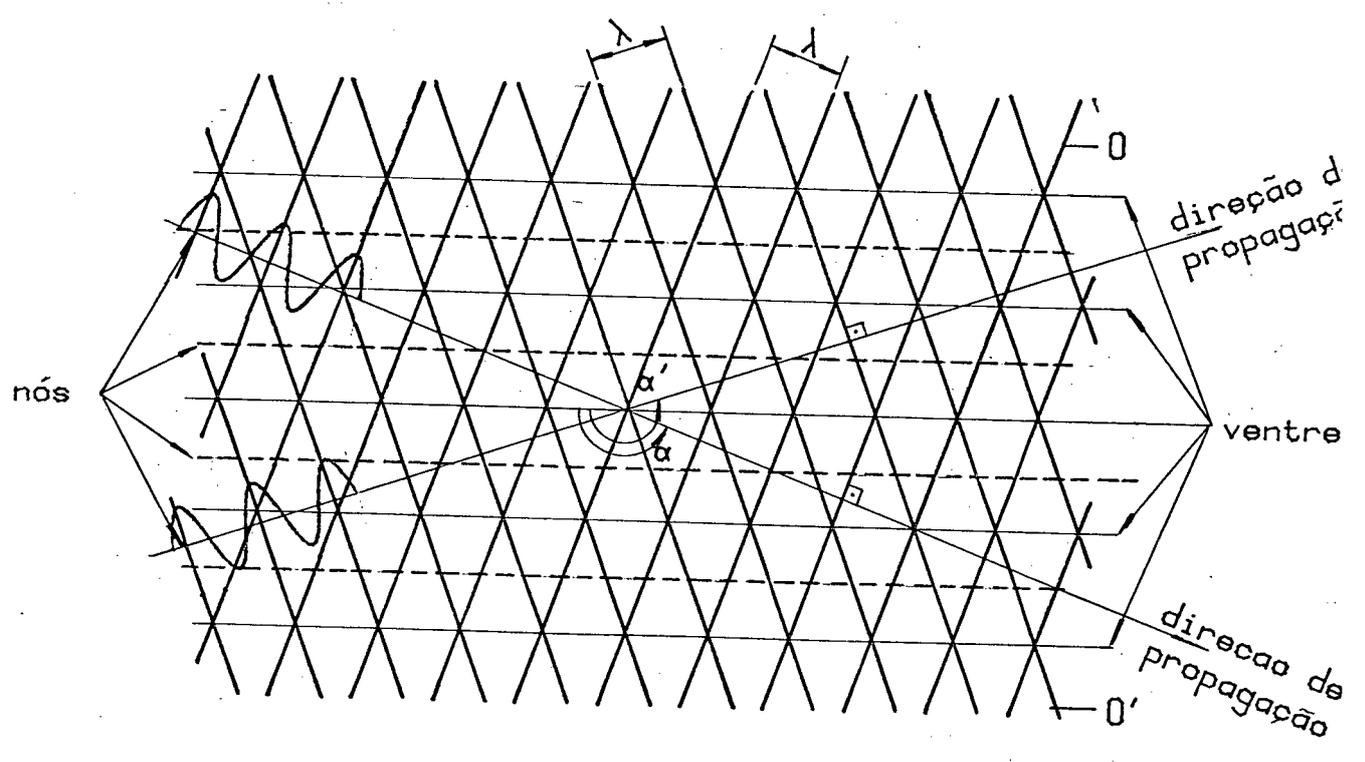


Fig 2.2 - Interferência entre duas ondas planas

ao eixo X.

Para determinar a distância h entre duas linhas de ventre consecutivas, são considerados os triângulos ABD e BCE (fig. 2.4). É fácil mostrar que estes triângulos são semelhantes.

Logo:

$$\frac{\overline{BE}}{\overline{AD}} = \frac{\overline{CE}}{\overline{BD}}$$

onde:

$$\begin{aligned} \overline{BE} &= \lambda \\ \overline{AD} &= h \\ \overline{CE} &= \lambda \cdot \operatorname{tg}(\phi/2) \\ \overline{BD} &= \frac{\lambda}{2 \cos(\phi/2)} \\ \phi &= \alpha' - \alpha \end{aligned}$$

logo:

$$h = \left| \frac{\lambda}{2 \operatorname{sen}(\frac{\alpha' - \alpha}{2})} \right| \quad (2.1)$$

Nas linhas de nós a intensidade resultante é nula, portanto a chapa H não será impressionada nestas regiões. Nas linhas de ventre a intensidade média é máxima e a chapa será impressionada fortemente nesta região. Depois de convenientemente processada, o aspecto da chapa H será o de uma rede paralela de franjas, igualmente espaçadas, com intensidade variando gradativamente de um valor máximo (nas linhas de ventre), a um mínimo (linhas de nós), como mostra a figura 2.5.

As linhas de ventres e de nós atingem a chapa H segundo um ângulo:

$$\psi = \frac{\alpha + \alpha'}{2} \quad (2.2)$$

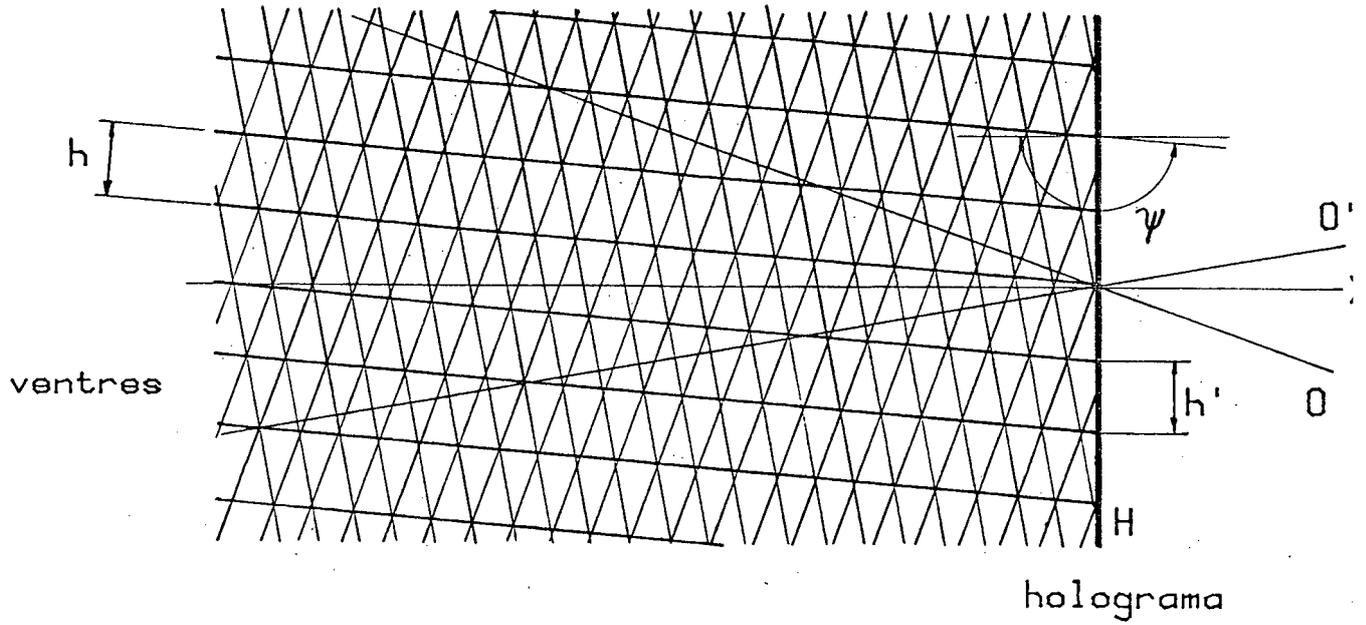


Fig 2.3 - Formação do holograma

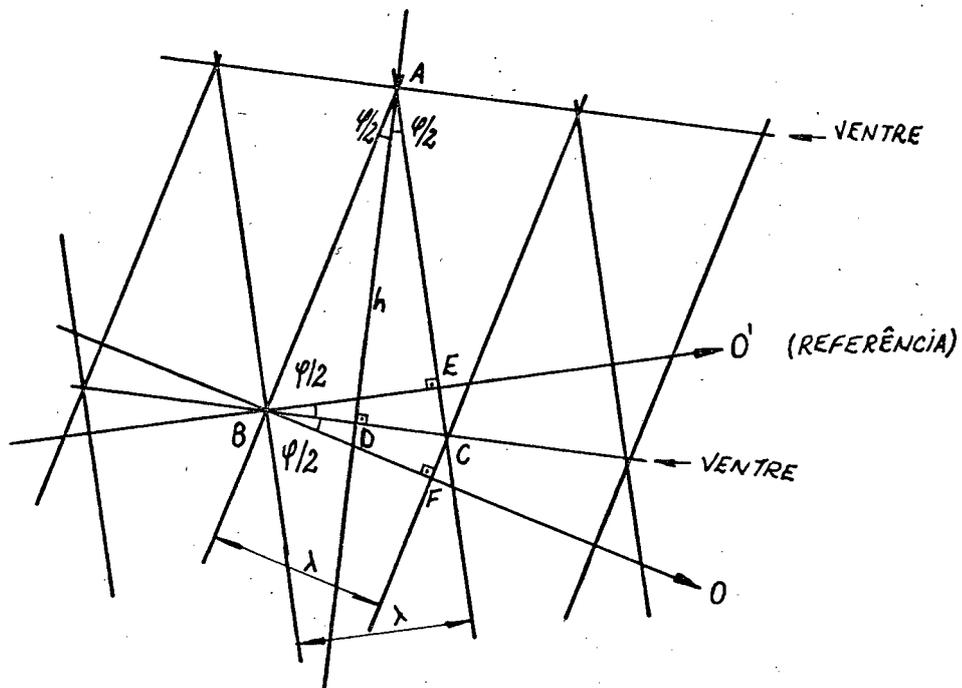


Fig 2.4 - Cálculo do espaçamento h

o espaçamento entre duas linhas de nós consecutivos será:

$$h' = \frac{h}{\cos \gamma}, \text{ onde } \gamma = \psi - \pi \quad (2.3)$$

substituindo as equações 2.1 e 2.2 na equação 2.3, vem:

$$h' = \frac{-\lambda}{2 \operatorname{sen}(\frac{\alpha - \alpha'}{2}) \cdot \cos(\frac{\alpha + \alpha'}{2})}$$

A chapa H, após revelada, apresenta um índice de absorção proporcional à intensidade média da onda estacionária $O + O'$ em cada ponto de sua superfície, formando um "negativo" da intensidade. Esta chapa com a propriedade acima descrita é denominada holograma.

O holograma processado apresenta um perfil como o mostrado na figura 2.5.a, com um índice de absorção mínimo na posição das linhas de nós. Este perfil corresponde aproximadamente, como é mostrado na figura 2.5.b, ao de uma rede de difração, como a esquematizada na figura 2.5.c, constando de uma série de fendas paralelas e igualmente espaçadas.

Em consequência ao princípio de Huygens, cada fenda fina comporta-se como uma fonte, emitindo uma onda cilíndrica (fig. 2.6). Algumas particularidades podem ser observadas como consequência da interferência destas diversas ondas: existem determinadas direções nas quais as ondas geradas estão sempre em fase, e conseqüentemente apresentam maior intensidade. A figura 2.6 mostra três direções preferenciais, embora outras existam. A onda que se propaga na direção O tem a mesma direção de propagação e mesmo λ que a incidente. As ondas I e II também têm o mesmo comprimento de onda que a incidente, porém se propagam em direções diferentes. As ondas O , I e II são chamadas de ordem 0, 1 ou 2 de difração respectivamente, e este fenômeno é denominado difração.

Numa segunda etapa, a onda O é reconstruída a partir da onda de referência O' e do holograma. Para tal, seja a mesma disposição inicial, onde somente a onda de referência O' incide no

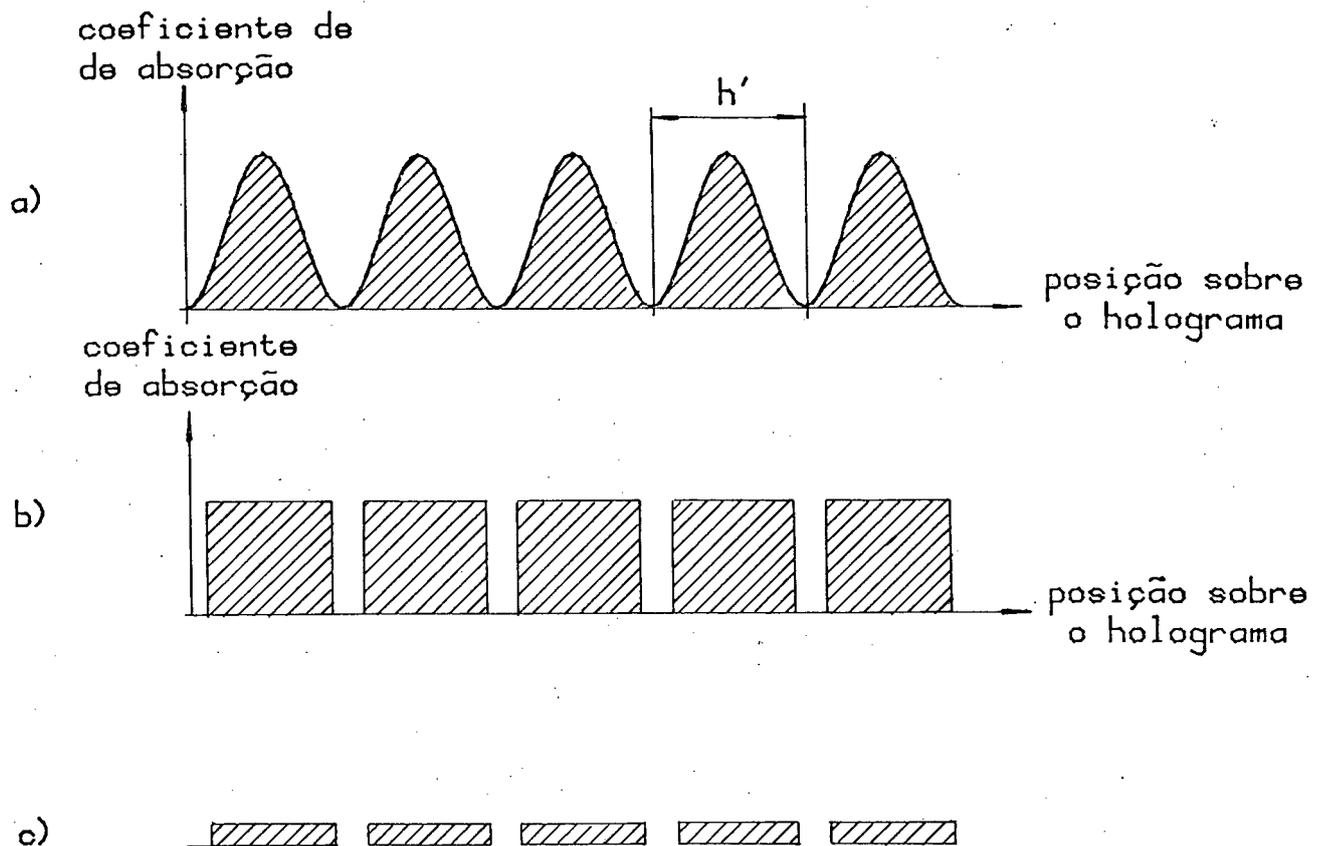


Fig 2.5 - a) Fator de absorção ao longo do holograma
 b) Aproximação da distribuição
 c) Rede de difração

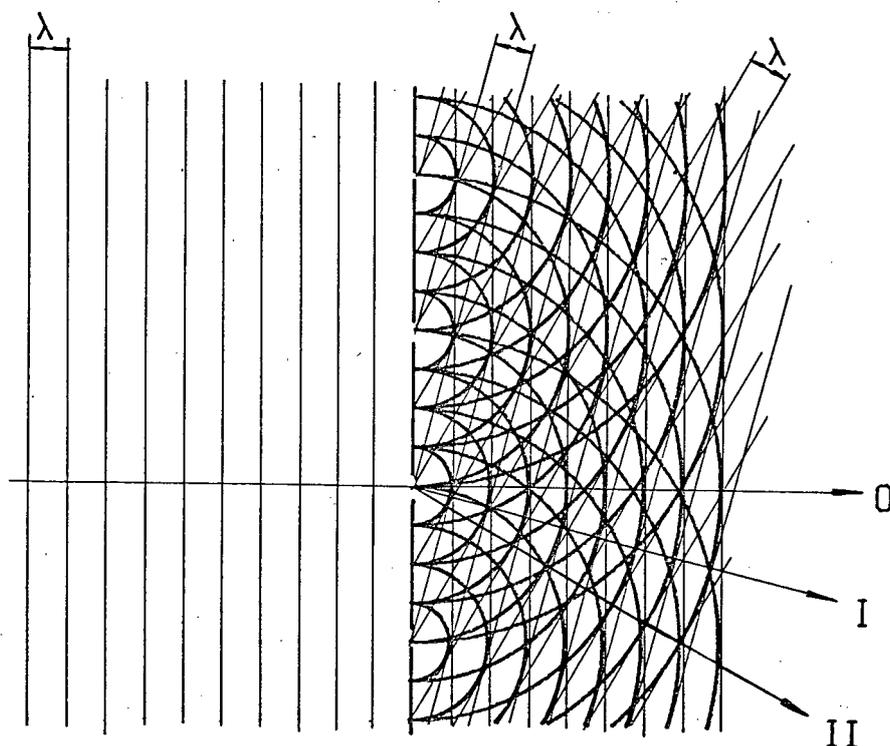


Fig 2.6 - Difração por uma rede de fendas equidistantes

holograma H, segundo o mesmo ângulo α' (fig. 2.7).

Deseja-se demonstrar que a ordem 1 de difração do holograma H, formado nas condições da figura 2.3, quando iluminado segundo o mesmo ângulo α' pela mesma onda de referência O' (fig. 2.7), tem as mesmas características da onda O . É imediato notar que o comprimento de onda é o mesmo da onda incidente, portanto λ . Resta mostrar que o ângulo de propagação θ é o mesmo, ou seja $\theta = \alpha$. Para tal considerar a figura 2.8:

tem-se:

$$\begin{aligned} \overline{BC} &= h' \cdot \text{sen} \gamma = -h' \text{sen} \alpha' \\ \overline{CD} &= \overline{CE} = \lambda - \overline{BC} = \lambda + h' \text{sen} \alpha' \\ \text{sen} \beta &= \frac{\overline{CD}}{\overline{AC}} = \frac{\lambda + h' \text{sen} \alpha'}{h'} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\text{sen} \beta = \text{sen} (\pi - \theta) = \text{sen} \theta \quad (2.6)$$

igualando as equações 2.5 e 2.6 :

$$\text{sen} \theta = \frac{\lambda}{h'} + \text{sen} \alpha' \quad (2.7)$$

substituindo o valor de h' da equação 2.4 na 2.7:

$$\text{sen} \theta = -2 \text{sen} \left(\frac{\alpha' - \alpha}{2} \right) \cos \left(\frac{\alpha' + \alpha}{2} \right) + \text{sen} \alpha' \quad (2.8)$$

desenvolvendo a equação 2.8, efetuando as simplificações, chega-se a:

$$\theta = \alpha + k \pi, \quad \text{onde } k = \text{inteiro}$$

no caso, considerando o sentido de propagação, tem-se

$$k = 0$$

logo:

$$\theta = \alpha \quad (2.9)$$

Assim, fica demonstrado que a onda resultante da primeira ordem de difração do holograma quando neste incide a onda de referência O' , segundo o mesmo ângulo inicial, tem o mesmo comprimento de onda, mesma forma e mesma direção de propagação que a onda O original. A única diferença relativa à onda original é a redução na amplitude.

2.2.2 - Reprodução de uma Onda Esférica

Ao invés de demonstrar geometricamente que a interferência entre uma onda esférica e uma onda plana de referência gera um holograma capaz de reconstruir esta mesma onda esférica, semelhantemente ao demonstrado no item anterior, serão extrapolados os resultados anteriormente obtidos para as ondas planas às ondas esféricas.

A forma de uma superfície esférica restrita dentro de um pequeno ângulo sólido tende à plana quando este ângulo sólido tende a zero. Assim, para os fins aqui propostos, a onda esférica será considerada como composta de uma infinidade de ondas planas.

Esta aproximação é bastante razoável, considerando que o valor típico de h' situa-se entre 1 e 2 $|\mu\text{m}|$. Assim, uma região suficientemente grande para abranger algumas fendas será ainda suficientemente pequena para que a onda esférica que atinge aquela região possa ser considerada plana.

No item anterior foi demonstrado que qualquer onda plana pode ser reconstruída por meio da holografia. Considerando que em cada pequena região do holograma incide uma onda quase plana, com direção de propagação ligeiramente diferente, um pequeno holograma, capaz de reproduzir esta mesma onda quase plana, será então formado sobre a chapa H em cada região. A reconstrução deste holograma reproduz as diversas parcelas planas da onda esférica, resultando, pelo processo inverso, uma onda esférica de mesmas características geométricas que a original.

2.2.3 - Reprodução de uma Onda Qualquer

Aqui também será feita uma extrapolação dos itens anteriores.

Seja um corpo de forma qualquer que reflete radiação monocromática que o atinge. O aspecto da onda que este emite, ou seja, sua frente de onda, é função de sua forma geométrica e do seu poder de reflexão em cada ponto. Em geral a frente de onda resultante de um corpo real é muito complexa.

Mais uma vez são usados recursos infinitesimais para a extrapolação. Supondo que o corpo seja dividido em uma infinidade de pequenas regiões, cada pequena região do corpo ao ser iluminada, reflete a luz segundo uma onda com a forma muito próxima da onda esférica. No limite, quando o número destas regiões tende ao infinito, a forma das ondas de cada região tende à esférica.

Admite-se aqui que vale o princípio da superposição, ou seja, várias ondas podem ser gravadas e reconstruídas simultaneamente. [35 e 36].

Considerando uma frente de onda qualquer como o somatório de uma infinidade de ondas esféricas elementares e admitindo a validade do princípio da superposição, demonstra-se a possibilidade de reconstruir uma frente de onda qualquer por meio da holografia.

2.3 - MÉTODO ANALÍTICO

Para demonstrar analiticamente que qualquer frente de onda pode ser reconstruída por meio da holografia será usada a notação complexa. [37].

2.3.1 - Caracterização de uma Onda pela Notação Complexa

A equação de uma onda \vec{O} que se propaga em um meio homogêneo no sentido positivo do eixo Z é dada por:

$$\vec{O} = A \cos \left(\frac{2\pi Z}{\lambda} - \omega t + \phi \right) \cdot \vec{k} \quad (2.10)$$

onde:

$A = A(x,y)$ = amplitude

λ = comprimento de onda

ω = frequência angular

$\phi = \phi(x, y)$ = ângulo de fase
 Z = coordenada espacial
 t = tempo
 \vec{k} = vetor unitário na direção Z

Da fórmula de Euler, tem-se que:

$$e^{i\alpha} = \cos \alpha + i \operatorname{sen} \alpha \quad (2.11)$$

A equação 2.10 nada mais é que a parte real do termo:

$$A \cdot e^{i\left(\frac{2\pi Z}{\lambda} - \omega t + \phi\right)}$$

multiplicada pelo vetor unitário \vec{k} ; ou seja:

$$\vec{O} = \operatorname{Re} \left| A \cdot e^{i \frac{2\pi Z}{\lambda}} \cdot e^{-i\omega t} \cdot e^{i\phi} \right| \cdot \vec{k} \quad (2.12)$$

Da equação 2.12 algumas conclusões podem ser tiradas. A frequência angular, dada por:

$$\omega = \frac{2 \pi c}{\lambda} \quad \text{onde: } c = \text{velocidade da luz}$$

é constante para uma radiação monocromática. Portanto o termo:

$$e^{-i\omega t}$$

aparece como fator multiplicativo em todas as equações relacionadas com a mesma radiação monocromática podendo ser omitido.

A análise a seguir restringe-se ao plano da placa fotográfica, o qual pode ser convenientemente posicionado no plano $Z = 0$, assim:

$$e^{i \frac{2\pi Z}{\lambda}} = e^0 = 1$$

Na mecânica ondulatória é comum omitir o símbolo "Re" da equação 2.12 tendo em mente que somente a parte real da equação tem significado físico.

Com base nas considerações anteriores a equação 2.12 pode ser finalmente escrita como:

$$\vec{O} = A \cdot e^{i\phi} \cdot \vec{k} \quad (2.13)$$

2.3.2 - Geração do Holograma

Seja \vec{O} a onda a ser gravada com o auxílio da onda de referência \vec{R} dadas por:

$$\vec{O} = A \cdot e^{i\phi} \cdot \vec{k} \quad (2.14)$$

$$\vec{R} = B \cdot e^{i\psi} \cdot \vec{k} \quad (2.15)$$

Ambas ondas incidem simultaneamente no plano do holograma ($Z = 0$). A onda resultante da interferência destas ondas é dada por:

$$\vec{T} = \vec{O} + \vec{R} = (A \cdot e^{i\phi} + B \cdot e^{i\psi}) \cdot \vec{k} \quad (2.16)$$

O material sensível da placa fotográfica é impressionado de forma proporcional à intensidade da onda incidente. A intensidade de uma radiação é dada pelo quadrado da amplitude, ou seja :

$$I = \vec{T} \cdot \vec{T}^* \quad (2.17)$$

onde \vec{T}^* representa o complexo conjugado de \vec{T} .

Substituindo a equação 2.16 na 2.17, tem-se:

$$\begin{aligned} I &= \vec{T} \cdot \vec{T}^* \\ I &= (A \cdot e^{i\phi} + B \cdot e^{i\psi}) \cdot \vec{k} \cdot (\bar{A} \cdot e^{-i\phi} + \bar{B} \cdot e^{-i\psi}) \cdot \vec{k} \\ I &= A^2 + B^2 + 2AB [e^{i(\phi-\psi)} + e^{-i(\phi-\psi)}] \end{aligned} \quad (2.18)$$

ou

$$I = A^2 + B^2 + 2AB \cos (\phi - \psi) \quad (2.19)$$

A equação 2.19 caracteriza as franjas de interferência no plano da placa fotográfica. Tanto a fase quanto a amplitude das ondas incidentes são função das coordenadas espaciais x e y ao longo do plano $Z = 0$. A intensidade das franjas de interferência é modulada pelo cosseno da diferença de fase entre ambas ondas incidentes.

2.3.3 - Reconstrução

A equação da onda transmitida em um meio com propriedade de causar difração, como o é um holograma, em função da onda incidente e da distribuição de intensidade das franjas é dada por: |37 e 38|.

$$\vec{T}_t = I \cdot \vec{T}_i \quad (2.20)$$

onde:

\vec{T}_t = onda transmitida

$I = I(x,y)$ = distribuição de intensidade das franjas

\vec{T}_i = onda incidente

Assim, incidindo a mesma onda de referência no holograma, segundo o mesmo ângulo inicial, obtém-se da equação 2.20:

$$\vec{T}_t = I \cdot \vec{R} \quad (2.21)$$

substituindo as equações 2.15 e 2.18 na 2.21:

$$\begin{aligned} \vec{T}_t &= [A^2 + B^2 + AB e^{i(\phi - \psi)} + AB^{-1} e^{-i(\phi - \psi)}] B \cdot e^{i\psi} \cdot \vec{k} \\ \vec{T}_t &= [B(A^2 + B^2) e^{i\psi} + AB^2 e^{i\phi} + AB^2 e^{-i(\phi - 2\psi)}] \cdot \vec{k} \end{aligned} \quad (2.22)$$

A interpretação de cada termo da equação 2.22 é dada a seguir:

- o primeiro termo: $B(A^2+B^2) e^{i\psi} \cdot \vec{k}$

contém a mesma fase que a onda de referência, portanto é uma parcela que não sofreu difração.

- o segundo termo: $AB^2 e^{i\phi} \cdot \vec{k}$

possui a mesma fase que a onda \vec{O} original, porém difere na amplitude de um fator multiplicativo. Esta parcela portanto tem as mesmas propriedades da onda original, representando a reconstrução da onda \vec{O} . É também chamada de imagem verdadeira.

- o terceiro termo: $AB^2 e^{-i(\phi-2\psi)} \cdot \vec{k}$

é denominado de imagem conjugada. Embora não guarde a fase nem de uma nem da outra onda, mas o resultado da interação entre ambas, esta parcela tem a propriedade de convergir e formar uma imagem real.

A propriedade expressa neste termo tornou decisiva a viabilização da técnica utilizada para a automatização, como descrito no capítulo 4.

A análise acima é genérica, não há restrições quanto à forma da onda de referência nem da forma da onda do objeto. Indistintamente, uma vez formado o holograma, tanto a onda \vec{O} quanto a \vec{R} poderia ser usada para reconstruir a outra.

Não existem restrições sobre a natureza da radiação, desde que seja pura (monocromática). A teoria da holografia é válida para a luz, micro-ondas, ultrassom, raios-X ou qualquer outra radiação ondulatória. A holografia não óptica ainda não é viável, face as limitações de coerência das fontes de radiação hoje disponíveis.

3 - HOLOGRAFIA INTERFEROMÉTRICA

A frente de onda emitida por um corpo pode ser reconstruída pela holografia de forma tão precisa, que pode ser comparada interferometricamente (no campo de λ) com a frente de onda do próprio corpo em tempo real, ou mesmo, com a reconstrução da frente de onda a partir de outro holograma do mesmo corpo. Neste princípio está baseada a holografia interferométrica.

Dentro da metrologia, a holografia interferométrica é usada para medir deslocamentos a partir das franjas de interferência geradas na superposição de duas frentes de onda. Conforme a origem das frentes de onda comparadas, a holografia interferométrica pode ser dividida em três diferentes tipos: de dupla exposição, em tempo real e em tempo médio.

3.1 - HOLOGRAFIA INTERFEROMÉTRICA PELA DUPLA EXPOSIÇÃO

Considere-se uma montagem convencional, como a da figura 3.1, onde se realiza a gravação de um holograma. Seja a placa fotossensível exposta simultaneamente à onda de referência \vec{R} , e à do corpo \vec{O} . Em seguida à primeira exposição, supõe-se que o corpo sofra um pequeno deslocamento ou deformação, por exemplo, pela aplicação de uma força mecânica. Seja \vec{O}' a nova frente de onda emitida pelo corpo, esta difere ligeiramente da original. Uma segunda exposição é então feita na mesma placa fotossensível, que é iluminada agora pela mesma onda de referência \vec{R} , e a onda do corpo perturbado \vec{O}' . Devido à linearidade do processo, tem-se no mesmo filme dois hologramas: um no qual \vec{O} foi gravado e no outro \vec{O}' . Quando a placa fotossensível é devidamente revelada e iluminada pela onda de referência \vec{R} apenas, ambas as frentes de onda são simultaneamente reconstruídas e interferem mutuamente. Uma vista através do holograma mostra uma imagem tridimensional do corpo, superposta por um correspondente mapa de franjas de interferência. As franjas são um indicativo da diferença de fase causada pela perturbação no corpo em termos de deslocamentos.

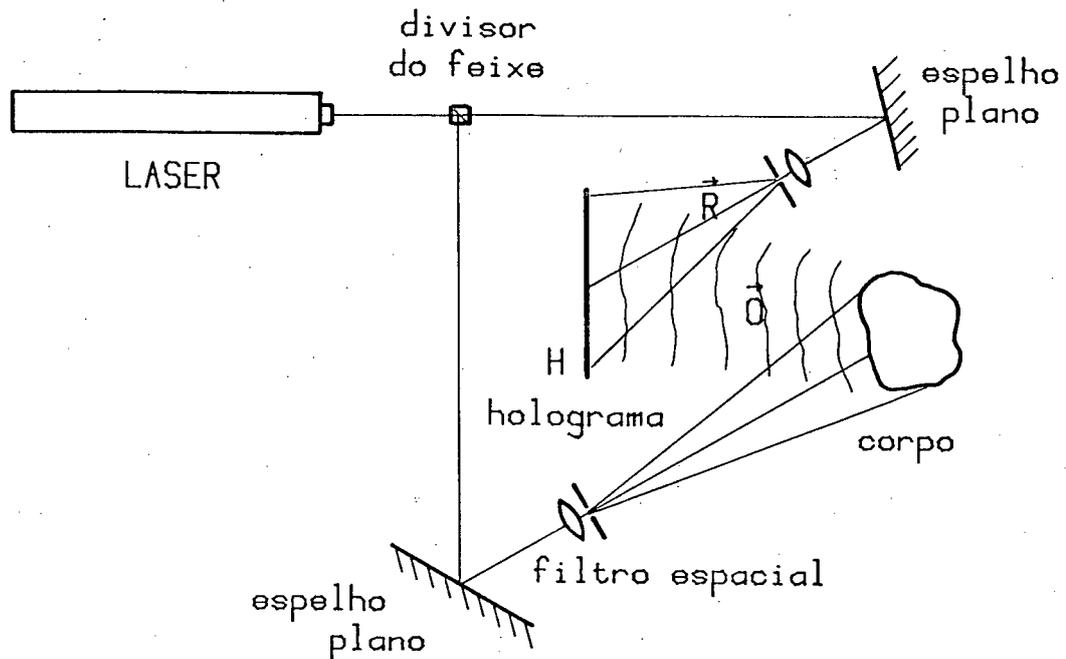


Fig 3.1 - Gravação de um holograma

3.2 - HOLOGRAFIA INTERFEROMÉTRICA EM TEMPO REAL

Partindo-se da mesma montagem da figura 3.1, na qual a placa fotossensível é exposta simultaneamente às ondas de referência \vec{R} e do corpo \vec{O} , se a placa fotossensível for processada e repositada precisamente na sua posição inicial e iluminada pela onda de referência \vec{R} , uma imagem tridimensional do corpo será reconstruída precisamente na mesma posição original. Entretanto como o corpo ainda está presente, a frente de onda emitida por este é superposta à reconstruída. Se o corpo agora é deslocado, ou deformado de alguma maneira, a frente de onda reconstruída e a momentaneamente emitida pelo corpo interferem mutuamente, gerando um mapa de franjas, que pode ser relacionado com o campo de deslocamento sofrido pelo corpo. Em corpos onde não se imprime nenhuma deformação permanente é possível com um único holograma estu-

dar o campo de deslocamento para uma grande gama de solicitações, pois, cessada a causa, cessa o efeito. De certa forma esta técnica é similar à dupla exposição, porém com a vantagem que as franjas podem ser observadas em tempo real.

3.3 - HOLOGRAFIA INTERFEROMÉTRICA EM TEMPO MÉDIO

Holografia em tempo médio é uma técnica para análise de superfícies vibrantes. Pode ser vista como uma generalização da holografia de dupla exposição para uma exposição contínua da superfície vibrante. Neste caso, quando o corpo em estudo vibra senoidalmente, o holograma é formado pela exposição contínua e simultânea da onda do corpo vibrante e a de referência, durante um tempo longo em relação ao período de vibração. Se o holograma resultante é reconstruído através da onda de referência, a superposição da imagem virtual do corpo e do mapa de franjas de interferência, indicativo da forma e do modo de vibração, pode ser observada.

A essência da holografia em tempo médio pode ser compreendida de forma simples. As áreas mais brilhantes na imagem são as áreas nodais, ou as partes do corpo onde não houve movimento durante a exposição do holograma. As outras regiões da superfície do corpo levam mais tempo nas posições de máxima deflexão que nas posições intermediárias. Assim as franjas de interferência na imagem do corpo reconstruído indicam essencialmente o deslocamento da superfície de um máximo de deflexão para outro, ou seja o campo de amplitudes de vibração.

3.4 - FORMAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DAS FRANJAS DE INTERFERÊNCIA

A frente de onda característica de um corpo resulta da superposição das ondas elementares emitidas por cada ponto deste corpo. Portanto, qualquer região da frente de onda porta informações sobre todos os pontos visíveis do corpo. Esta frente de onda é gravada e reconstruída pela holografia. [22, 35 à 38].

3.4.1 - Formação das Franjas de Interferência

A análise da formação das franjas de interferência e sua interpretação está baseada no princípio que qualquer ponto do holograma contém informações sobre cada ponto visível do corpo, em ambos os estados comparados interferometricamente.

A figura 3.2 mostra esquematicamente a disposição dos componentes usados na holografia interferométrica. Seja F a posição da fonte de iluminação, O a posição do observador e H o holograma. O ponto P representa um ponto do corpo estudado na posição inicial. O ponto P sofre um deslocamento \vec{d} , atingindo uma nova posição P' correspondente ao estado final de deformação e/ou posicionamento do corpo. Os vetores unitários de direção são mostrados na figura.

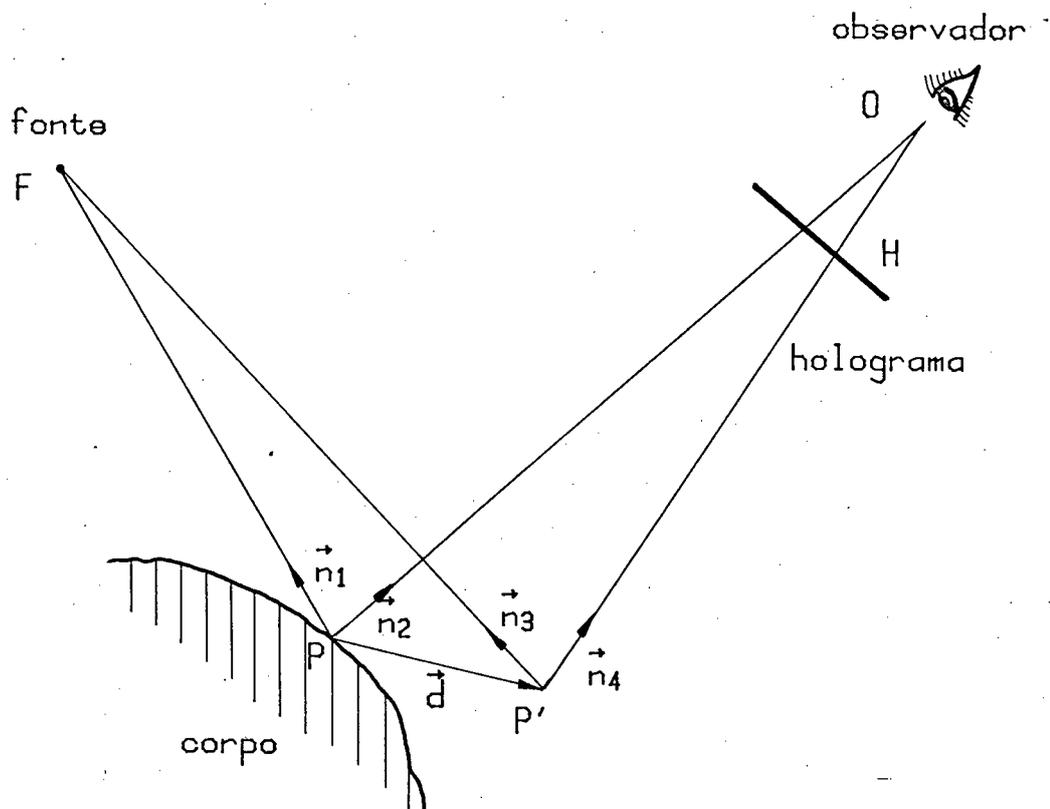


Fig 3.2 - Variação do caminho óptico

Na posição inicial a luz deixa a fonte F, atinge o ponto P, onde é refletida, e atinge o observador no ponto O. Na posição final o caminho percorrido é FP'O. Quando as duas frentes de onda, correspondentes aos estados inicial e final, são reconstruídas simultaneamente, a intensidade luminosa do ponto P é função da diferença de fase causada pela diferença entre os caminhos ópticos FPO e FP'O. A intensidade luminosa do ponto P poderá ser máxima quando ambas chegam com a mesma fase, ou variar até um mínimo, quando chegam com fases opostas.

A análise acima corresponde à intensidade resultante do ponto P, entretanto este efeito é simultâneo para todos os pontos do corpo. O efeito resultante é o aparecimento das franjas de interferência, ou seja, linhas claras e escuras sobre a superfície do corpo. Todos os pontos sobre a mesma franja de interferência têm a mesma diferença de fase.

Para relacionar o vetor deslocamento com os dados oriundos das franjas de interferência recorre-se novamente à figura 3.2. [34, 36, 39, 40].

No estado inicial o caminho óptico percorrido pelo feixe é $\overline{FP} + \overline{OP}$. No estado final: $\overline{FP}' + \overline{OP}'$. A diferença entre estes dois caminhos ópticos é relacionada com o vetor \vec{d} por:

$$\overline{FP}' - \overline{FP} = - \vec{d} \cdot \vec{n}_1 \quad (3.1)$$

$$\overline{OP} - \overline{OP}' = \vec{d} \cdot \vec{n}_2 \quad (3.2)$$

a diferença de caminho é então:

$$\Delta = (\overline{FP} + \overline{OP}) - (\overline{FP}' + \overline{OP}') \quad (3.3)$$

$$\Delta = - (\overline{FP}' - \overline{FP}) + (\overline{OP} - \overline{OP}')$$

$$\Delta = \vec{d} \cdot \vec{n}_1 + \vec{d} \cdot \vec{n}_2$$

$$\Delta = \vec{d} \cdot (\vec{n}_1 + \vec{n}_2) \quad (3.4)$$

$$\Delta = \vec{d} \cdot \vec{p} \quad (3.5)$$

onde:

$$\vec{p} = \vec{n}_1 + \vec{n}_2 \quad (3.6)$$

A diferença de caminho óptico Δ gera uma diferença de fase ϕ dada por:

$$\phi = \frac{2 \pi \Delta}{\lambda} \quad (3.7)$$

entretanto a diferença de fase não é passível de determinação direta. Outros recursos devem ser usados.

3.4.2 - Ordens de Franja

É possível partir de um referencial, por exemplo uma região imóvel do corpo, e atribuir ao ponto P um parâmetro denominado de "ordem de franja" (OF). Este parâmetro é determinado mediante a enumeração sucessiva das franjas, a partir do referencial fixo. Onde não há deslocamento não há diferença de caminho, nem de fase, logo esta região é caracterizada por uma franja clara, denominada de franja de ordem zero. A próxima franja clara será denominada franja de ordem um e assim sucessivamente. Correspondem às franjas claras sempre números inteiros sucessivos. Como as franjas escuras se intercalam às franjas claras estas recebem sempre números como 0,5; 1,5; 2,5; Assim, é sempre possível atribuir uma ordem de franja a qualquer ponto em estudo na região visível da peça estudada, seja diretamente, quando o ponto está sobre uma franja, ou indiretamente, por interpolação, quando este se situa entre franjas.

Um cuidado especial deve ser tomado quando o campo de deslocamento estudado apresenta um comportamento mais complexo. Nestes casos o deslocamento pode não ser monotonicamente crescente em uma direção, conseqüentemente a numeração das fran-

jas não o será também. Estes casos não são difíceis de quantificar, desde que um especial cuidado seja tomado. A forma e o espaçamento das franjas são um indicativo da ocorrência de uma região onde há inversão de comportamento.

Uma vez conhecida a OF de um ponto de interesse, pode-se associar este dado à diferença de fase, à diferença de caminho óptico, e finalmente, ao vetor deslocamento.

A diferença de fase é dada por:

$$\phi = 2 \pi OF \quad (3.8)$$

substituindo o valor de ϕ da equação 3.7 na equação 3.8 tem-se:

$$\Delta = OF \lambda \quad (3.9)$$

logo:

$$\vec{d} \cdot \vec{p} = OF \lambda \quad (3.10)$$

3.4.3 - Sensibilidade e Resolução

As equações 3.6 e 3.7 permitem tecer uma série de considerações importantes.

O vetor \vec{p} , por sua capital importância, também é chamado de vetor sensibilidade [39] pois, como será mostrado posteriormente, representa a direção segundo a qual a holografia interferométrica tem máxima sensibilidade, e esta sensibilidade é proporcional ao seu módulo.

O vetor \vec{p} resulta da soma vetorial dos dois vetores unitários, \vec{n}_1 e \vec{n}_2 , definidos a partir do ponto P, na direção da fonte de iluminação e do observador respectivamente. Seu valor máximo é 2, quando os vetores unitários são colineares e têm mesmo sentido. O vetor \vec{p} varia de ponto para ponto ao longo da superfície em análise, tanto em módulo quanto em orientação.

A equação 3.10 mostra que a OF é proporcional ao produto escalar $\vec{p} \cdot \vec{d}$, ou seja, para um mesmo ponto a ordem de franja será tão maior quanto maior este produto. A OF de um ponto é pro -

porcional à componente do vetor \vec{d} na direção do vetor \vec{p} . A sensibilidade será máxima quando \vec{p} e \vec{d} forem colineares, e nula quando ortogonais. Disto decorre que a disposição dos componentes deve, sempre que possível, ser otimizada no sentido de obter o vetor sensibilidade com máximo módulo, e sua orientação segundo a direção do deslocamento, quando esta última for conhecida. Nesta situação tem-se a máxima resolução da holografia, que pode ser menor que $0.1 \text{ } |\mu\text{m}|$, como é mostrado a seguir:

A equação 3.10 pode ser reescrita como:

$$p \cdot d \cdot \cos \alpha = OF \cdot \lambda \quad (3.11)$$

Otimizada a disposição dos componentes tem-se:

$$\alpha = 0$$

$$p = 2$$

Supondo que a resolução da OF seja de $1/4$, ou seja, a interpolação das OF seja factível até $1/4$ de franja. Como $\lambda = 0.6328 \text{ } |\mu\text{m}|$ para o laser HeNe, a equação 3.11 torna-se:

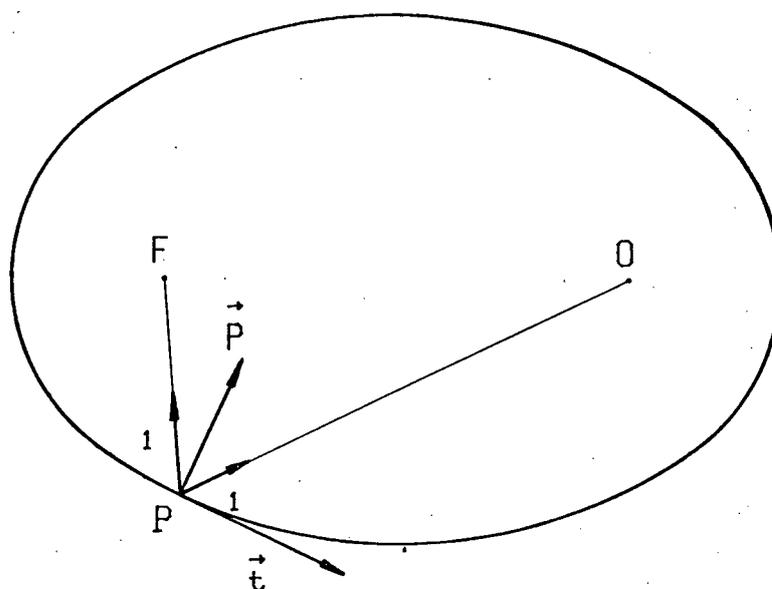
$$2 \cdot \Delta d \cdot 1 = 0,25 \cdot 0,6328$$

onde

$$\Delta d = 0,08 \text{ } |\mu\text{m}|$$

representando a máxima resolução da holografia interferométrica para uma resolução de $1/4$ na OF. Com a interpretação instrumental da esta resolução pode ainda ser melhorada.

A equação 3.10 mostra ainda que existem direções segundo as quais a holografia interferométrica não é capaz de medir o deslocamento, ou seja, onde a sensibilidade é nula. Esta direção corresponde à normal ao vetor sensibilidade. Com base nestas considerações constrói-se o diagrama da elipse de sensibilidade (fig. 3.3). [39]



F = fonte de iluminação
O = posição do observador

Fig 3.3 - Elipse de sensibilidade

A elipse é o lugar geométrico caracterizado pela propriedade:

$$\overline{FP} + \overline{OP} = \text{constante}$$

estando F e O situados em seus focos e P situado em qualquer ponto da linha da elipse.

Assim, quando o ponto P se desloca para uma nova posição P' também situada na elipse, tem-se:

$$\overline{FP} + \overline{OP} = \overline{FP'} + \overline{OP'}$$

não há variação do caminho óptico e, conseqüentemente, não há diferença de fase, e a OF em P será nula. Portanto a holografia interferométrica não registra a componente do deslocamento nestas

condições.

Como a norma de \vec{d} é muito menor que \overline{FP} ou \overline{OP} é possível enunciar a seguinte generalização:

- "A holografia interferométrica apresenta máxima sensibilidade, em um ponto P qualquer, na direção normal à elipse de sensibilidade que passa pelo ponto P, e nula na direção tangente à elipse, ou seja, a holografia interferométrica registra apenas a componente do deslocamento na direção normal à elipse de sensibilidade".

3.4.4 - Determinação dos Deslocamentos

A equação 3.10 permite escrever uma relação entre: o vetor deslocamento, as posições da fonte e do observador e a OF. Esta relação é a base para os métodos de cálculo usados na holografia interferométrica, entretanto é particularizada segundo a natureza do campo de deslocamento a quantificar, conforme descrito nos próximos itens.

3.5 - MÉTODO PARA DESLOCAMENTO UNIDIRECIONAL (1-D)

Quando a direção do deslocamento é conhecida previamente, a quantificação do campo de deslocamento com base nas OF pode ser efetuada de maneira simples e direta, ponto a ponto.

Seja \vec{n}_d o vetor unitário que define a direção do deslocamento no ponto P, então:

$$\vec{d} = d \cdot \vec{n}_d \quad (3.12)$$

como o vetor sensibilidade pode ser determinado em cada ponto do corpo estudado, a única incógnita passa a ser a magnitude do vetor deslocamento. Assim partindo da equação 3.10, vem:

$$\vec{d} \cdot \vec{p} = OF \lambda$$

$$d \vec{n}_d \cdot \vec{p} = OF \lambda$$

$$d = \frac{OF \lambda}{\vec{n}_d \cdot \vec{p}} \quad (3.13)$$

Para exprimir a equação acima em função das coordenadas cartesianas, utilizar-se-á o sistema de coordenadas mostrado na figura 3.4.

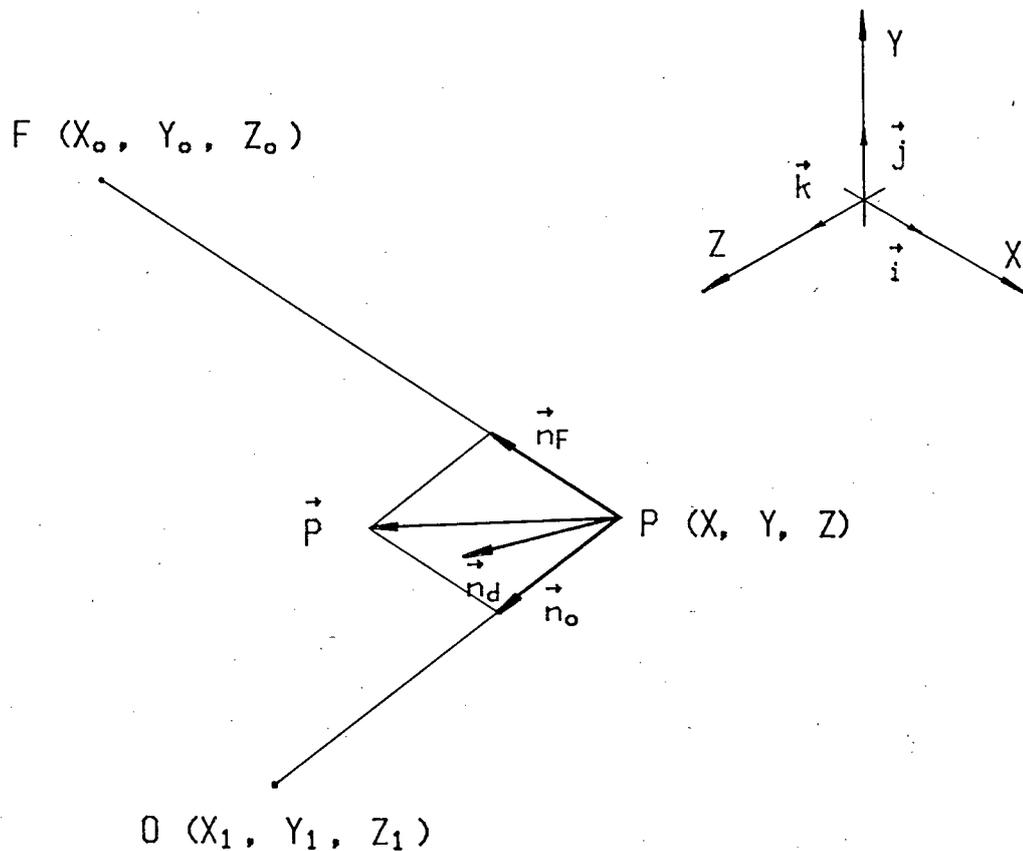


Fig 3.4 - Sistema de coordenadas - método 1-D

Valem as relações:

$$\vec{p} = \vec{n}_f + \vec{n}_o$$

onde:

$$\vec{n}_f = \frac{X_o - X}{FP} \vec{i} + \frac{Y_o - Y}{FP} \vec{j} + \frac{Z_o - Z}{FP} \vec{k} \quad (3.14)$$

$$\vec{n}_o = \frac{X_1 - X}{\overline{OP}} \vec{i} + \frac{Y_1 - Y}{\overline{OP}} \vec{j} + \frac{Z_1 - Z}{\overline{OP}} \vec{k} \quad (3.15)$$

$$\overline{FP} = [(X_o - X)^2 + (Y_o - Y)^2 + (Z_o - Z)^2]^{1/2} \quad (3.16)$$

$$\overline{OP} = [(X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2 + (Z_1 - Z)^2]^{1/2} \quad (3.17)$$

$$\vec{n}_d = n_{dx} \vec{i} + n_{dy} \vec{j} + n_{dz} \vec{k} \quad (3.18)$$

daí:

$$\vec{p} = p_x \vec{i} + p_y \vec{j} + p_z \vec{k} \quad (3.19)$$

onde:

$$\begin{aligned} p_x &= \frac{X_o - X}{\overline{FP}} + \frac{X_1 - X}{\overline{OP}} \\ p_y &= \frac{Y_o - Y}{\overline{FP}} + \frac{Y_1 - Y}{\overline{OP}} \\ p_z &= \frac{Z_o - Z}{\overline{FP}} + \frac{Z_1 - Z}{\overline{OP}} \end{aligned} \quad (3.20)$$

logo:

$$d = \frac{OF \cdot \lambda}{n_{dx} p_x + n_{dy} p_y + n_{dz} p_z} \quad (3.21)$$

Uma vez calculado o módulo do vetor \vec{d} pela equação 3.21, é imediata a determinação do vetor \vec{d} pela aplicação da equação 3.12.

O conhecimento da OF ao longo da superfície do corpo, a partir de um único ponto de observação, é suficiente para calcular todo o campo de deslocamentos, desde que as posições da fonte e do observador sejam conhecidas.

Sem o conhecimento prévio da direção do deslocamento é possível apenas determinar a projeção do vetor \vec{d} na direção do vetor \vec{p} .

Esta forma de abordar um problema é chamada de unidirecional (1-D) pois supõe que o deslocamento se dá segundo uma direção conhecida.

3.6 - MÉTODO PARA DESLOCAMENTOS BIDIRECIONAIS (2-D)

Existem situações onde é possível afirmar que o vetor deslocamento está contido num determinado plano. A solução deste problema já não é, como antes, tão direta, sendo necessário um tratamento algébrico mais requintado ao mesmo tempo em que é necessário conhecer a OF a partir de, no mínimo, dois pontos de observação distintos. |20|

Sejam \vec{e}_1 e \vec{e}_2 os vetores unitários linearmente independentes que geram o plano onde o vetor \vec{d} está contido. (fig. 3.5) O vetor \vec{d} pode ser decomposto em:

$$\vec{d} = d_1 \vec{e}_1 + d_2 \vec{e}_2 \quad (3.22)$$

onde:

$$\vec{e}_1 = e_{1x} \vec{i} + e_{1y} \vec{j} + e_{1z} \vec{k}$$

$$\vec{e}_2 = e_{2x} \vec{i} + e_{2y} \vec{j} + e_{2z} \vec{k}$$

assim:

$$\vec{d} = (d_1 e_{1x} + d_2 e_{2x}) \vec{i} + (d_1 e_{1y} + d_2 e_{2y}) \vec{j} + (d_1 e_{1z} + d_2 e_{2z}) \vec{k}$$

$$\vec{d} = d_x \vec{i} + d_y \vec{j} + d_z \vec{k} \quad (3.23)$$

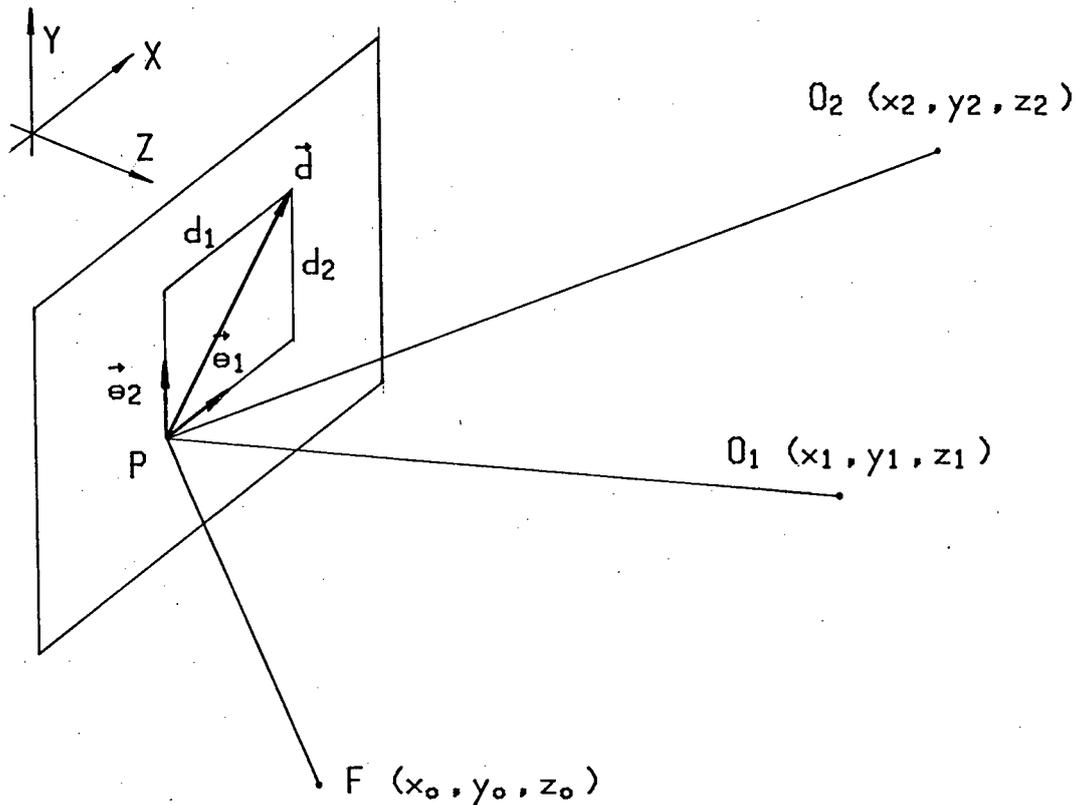


Fig 3.5 - Método bidirecional

levando a equação 3.23 na equação 3.10 tem-se para o ponto de observação 1:

$$\vec{d} \cdot \vec{p}_1 = OF_1 \lambda$$

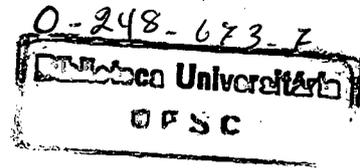
$$d_x p_{1x} + d_y p_{1y} + d_z p_{1z} = OF_1 \lambda$$

ou

$$(d_1 e_{1x} + d_2 e_{2x}) p_{1x} + (d_1 e_{1y} + d_2 e_{2y}) p_{1y} + (d_1 e_{1z} + d_2 e_{2z}) p_{1z} = OF_1 \lambda$$

$$(e_{1x} p_{1x} + e_{1y} p_{1y} + e_{1z} p_{1z}) d_1 +$$

$$+ (e_{2x} p_{1x} + e_{2y} p_{1y} + e_{2z} p_{1z}) d_2 = OF_1 \lambda \quad (3.24)$$



ou

$$M_1 d_1 + N_1 d_2 = DF_1 \lambda \quad (3.25)$$

Analogamente, pelo ponto de observação 2 chega-se a equação:

$$M_2 d_1 + N_2 d_2 = DF_2 \lambda \quad (3.26)$$

onde:

$$M_i = e_{1x} p_{ix} + e_{1y} p_{iy} + e_{1z} p_{iz} \quad (3.27)$$

$$N_i = e_{2x} p_{ix} + e_{2y} p_{iy} + e_{2z} p_{iz} \quad (3.28)$$

$$p_{ix} = \frac{X_o - X}{\overline{FP}} + \frac{X_i - X}{\overline{O_iP}}$$

$$p_{iy} = \frac{Y_o - Y}{\overline{FP}} + \frac{Y_i - Y}{\overline{O_iP}} \quad (3.29)$$

$$p_{iz} = \frac{Z_o - Z}{\overline{FP}} + \frac{Z_i - Z}{\overline{O_iP}}$$

O sistema formado pelas equações 3.25 e 3.26 permite determinar as componentes do vetor \vec{d} nas direções dos vetores unitários \vec{e}_1 e \vec{e}_2 . Com isso o vetor \vec{d} fica determinado pela equação 3.22.

Este método supõe que o vetor \vec{d} esteja contido em um plano definido sendo portanto denominado de método bidirecional.

(2-D)

A completa determinação do vetor \vec{d} exige no mínimo duas observações distintas angularmente separadas. Entretanto, como se trata de equações envolvendo parâmetros experimentais aos quais são inerentes incertezas, é conveniente que um número maior de equações seja utilizado. O sistema apresentará redundância matemática, mas soluções ligeiramente diferentes para cada par de

equações considerado, em função de erros experimentais. Este sistema de várias equações a duas incógnitas pode ser resolvido convenientemente pelo Método dos Mínimos Quadrados [41].

3.7 - MÉTODO PARA DESLOCAMENTO TRIDIRECIONAL (3-D)

Em problemas mais gerais, nenhuma informação sobre a natureza ou orientação do vetor \vec{d} é conhecida. Entretanto este tipo de problema pode ser resolvido pela holografia interferométrica. Um tratamento mais geral permite determinar as coordenadas do vetor \vec{d} em qualquer ponto observado, conhecendo-se assim sua direção e módulo. [10, 16, 39]

Para tal, considere que a equação 3.10 será escrita em relação a um ponto de observação "i" e o ponto de iluminação. Assim, para o ponto de observação "i", esta fica:

$$\vec{d} \cdot \vec{p}_i = OF_i \lambda \quad (3.30)$$

ou em função das coordenadas cartesianas

$$U p_{ix} + V p_{iy} + W p_{iz} = OF_i \lambda \quad (3.31)$$

onde:

$$\vec{d} = U \vec{i} + V \vec{j} + W \vec{k}$$

e p_{ix} , p_{iy} e p_{iz} são definidos pelas equações 3.29.

Com a equação 3.31 escrita para no mínimo três pontos de observação distintos e angularmente separados, é possível montar um sistema de equações e determinar as três componentes do vetor deslocamento.

Também aqui as componentes do vetor deslocamento são determinados indiretamente por meio de um sistema de equações envolvendo parâmetros determinados experimentalmente. Em função das incertezas inerentes a estes parâmetros, a solução do sistema será fortemente comprometida. Um tratamento mais adequado a este tipo de determinação consiste em formular um número de equações,

do tipo da equação 3.31, maior que três, e resolver o sistema global de M equações à N incógnitas ($M > N$) pelo Método dos Mínimos Quadrados. [41] Fisicamente este procedimento significa utilizar um maior número de pontos de observação.

3.8 - MÉTODO DIFERENCIAL

Os métodos expostos anteriormente supõem conhecida a ordem de franja absoluta em cada ponto. Para tal é necessária a existência de um referencial no campo visual estudado. Uma região imóvel, como por exemplo um apoio ou engaste determinam a posição de uma franja de ordem zero. A partir desta é feita a contagem das demais. [29]

Entretanto, em determinadas situações, a franja de ordem zero não aparece no campo visual ou não se conhece sua posição. Nesta situação ainda é possível determinar o campo de deslocamento pela holografia interferométrica.

O método consiste em determinar o número de franjas que "passam" pelo ponto estudado quando o observador se desloca continuamente entre pares de ponto de observação. Em outras palavras, determinar a diferença das OF entre pares de pontos.

Seja a equação 3.31 escrita para o ponto "r" e para o ponto "s".

$$U p_{rx} + V p_{ry} + W p_{rz} = OF_r \lambda \quad (3.32)$$

$$U p_{sx} + V p_{sy} + W p_{sz} = OF_s \lambda \quad (3.33)$$

As ordens de franja absoluta do ponto "r" e do ponto "s" não são conhecidas, mas é possível determinar sua diferença:

$$\Delta_{rs} = OF_r - OF_s \quad (3.34)$$

Subtraindo a equação 3.33 da equação 3.32, vem:

$$U (p_{rx} - p_{ax}) + V (p_{ry} - p_{ay}) + W (p_{rz} - p_{az}) = OF_r - OF_a$$

ou

$$U (p_{rx} - p_{ax}) - V (p_{ry} - p_{ay}) + W (p_{rz} - p_{az}) = \Delta_{ra} \quad (3.35)$$

A equação 3.35 ao ser aplicada em no mínimo três pares de pontos distintos forma um sistema de equações que quando resolvido, determina as componentes U, V e W do vetor deslocamento. Também aqui é conveniente utilizar um maior número de equações e solução do sistema pelo Método dos Mínimos Quadrados.

4 - DIGITALIZAÇÃO DE UM MAPA DE FRANJAS

No capítulo 3 foi mostrado que conhecidas as ordens de franja (OF) a partir de um, dois ou três pontos de observação distintos, pode-se determinar, para um ponto qualquer, o deslocamento absoluto segundo uma, duas ou três direções, respectivamente.

4.1 - MÉTODOS CONVENCIONAIS PARA DETERMINAR A OF

A OF para um ponto é normalmente determinada por um dos seguintes métodos convencionais:

a) Observação direta:

Consta da determinação visual da OF do ponto por observação direta do mapa de franjas associado à imagem virtual reconstruída (fig. 4.1). Quando no ponto de interesse não coincidir exatamente o centro de uma franja, é feita uma interpolação por estimativa. O método não exige instrumentação auxiliar, porém um telescópio pode ser usado com sensível melhora dos resultados. Exige do executor grande concentração e considerável prática para manter os erros absolutos menores que 0.3 OF, pois com o aumento da densidade de franjas, a suscetibilidade a enganos de contagem cresce. É um processo enfadonho, impreciso e bastante moroso.

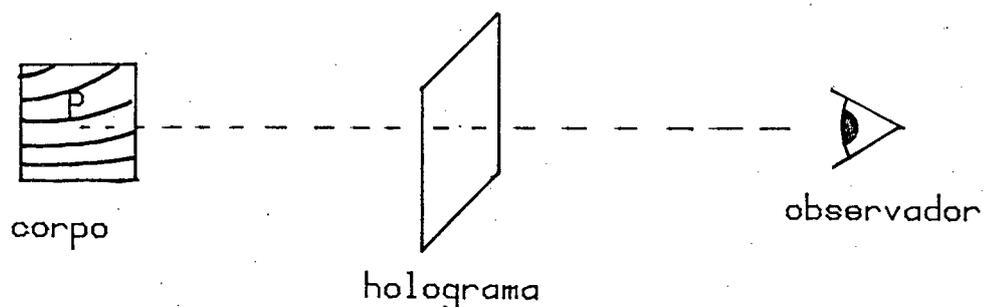


Fig 4.1 - Determinação da OF de um ponto por observação direta

b) Fotografia:

Por este processo uma fotografia da imagem virtual reconstruída, mostrando o mapa de franjas de interferência, é obtida (fig. 4.2). A contagem das franjas e interpolação são melhoradas com o auxílio de recursos gráficos, mesmo onde a densidade de franjas é maior. Envolve técnica, equipamento e processamentos fotográficos convenientes.

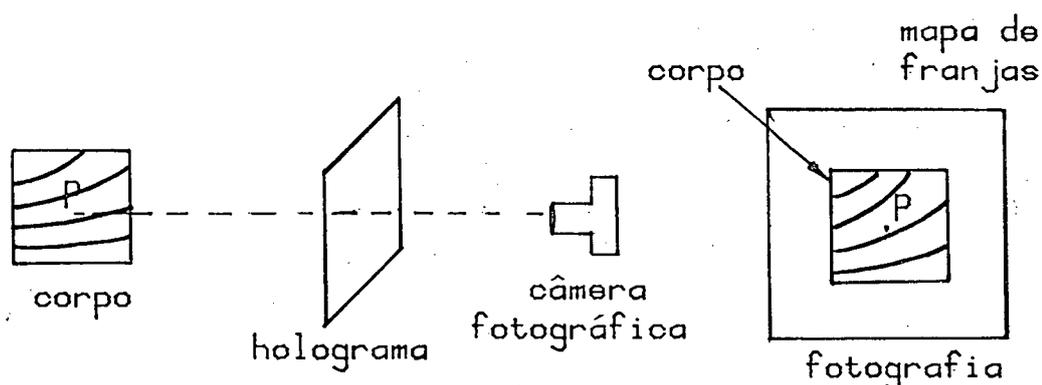


Fig 4.2 - Determinação da OF de um ponto por fotografia

c) Diapositivos:

Por este método obtém-se fotograficamente um diapositivo da imagem reconstruída onde aparece superposto à peça o mapa de franjas. A imagem é projetada em uma tela e analisada convenientemente (fig. 4.3). A interpolação e a contagem das OFs pode ser determinada com boa precisão em virtude do grande grau de ampliação da imagem. Exige uma câmera fotográfica de boa qualidade, um projetor e processamento fotográfico específico.

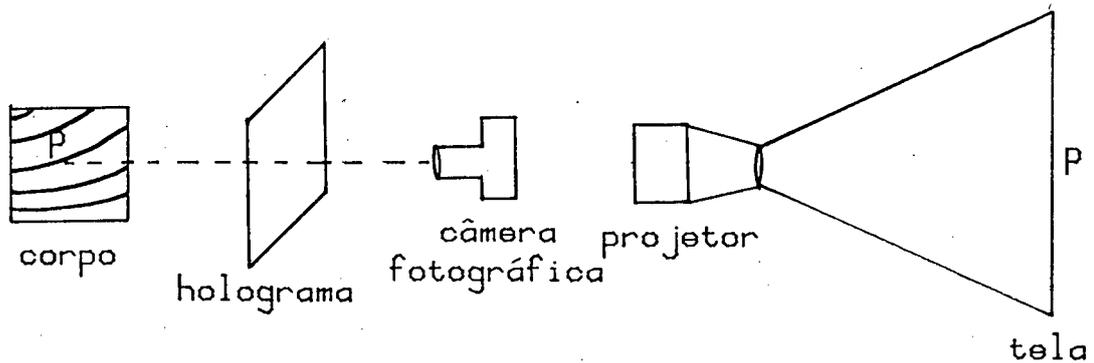


Fig 4.3 - Determinação da OF de um ponto por meio de um diapositivo

d) Televisão:

Uma câmera de televisão pode ser usada para gravar a evolução do mapa de franjas em uma holografia interferométrica em tempo real. A determinação da OF consiste em contar o número de franjas que passam pelo ponto considerado, entre o estado inicial e o final. Este método permite estudar a evolução gradual do campo de deslocamentos pelo estudo de estados intermediários, e ao mesmo tempo, determinar de modo seguro a OF absoluta. Necessita de todo um equipamento de vídeo tape, e só se aplica à holografia em tempo real (fig. 4.4).

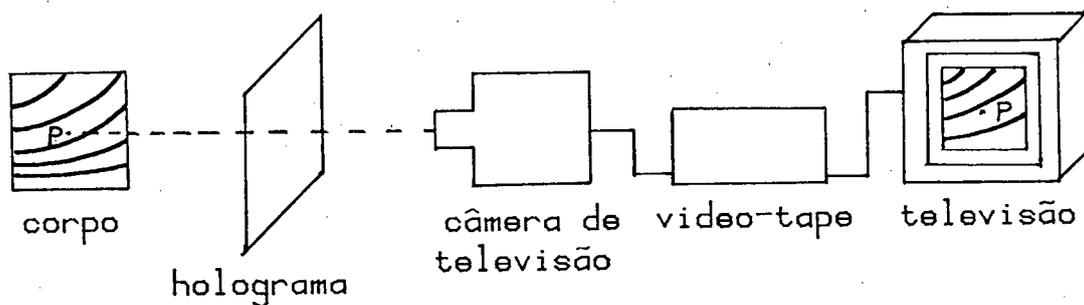


Fig 4.4 - Determinação da OF de um ponto por televisão

e) Imagem real:

O holograma de dupla exposição quando iluminado convenientemente gera uma imagem real do corpo, onde aparecem superpostas as franjas de interferência (fig. 4.5). Embora de fraca intensidade e resolução limitada esta imagem pode ser projetada em uma tela e a OF do ponto determinada com satisfatória precisão. Nenhum equipamento adicional é requerido [34].

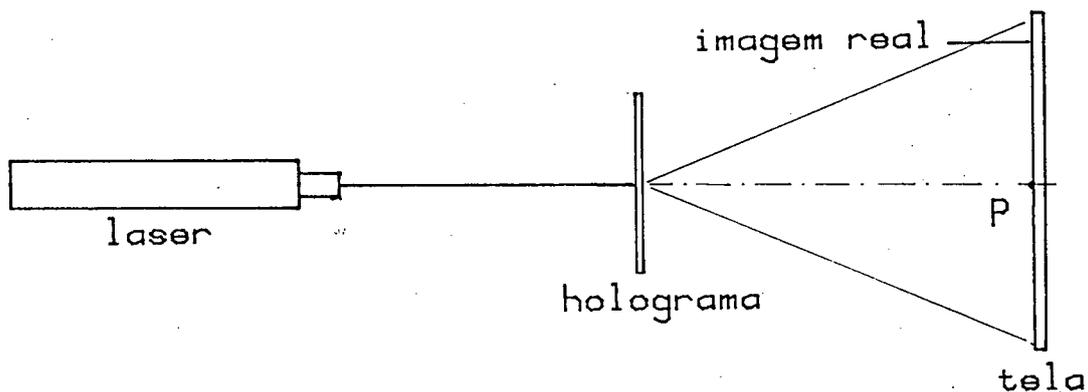


Fig 4.5 - Determinação da OF de um ponto através da imagem real

Os métodos (b), (c) e (d) exigem um grande tempo de preparação enquanto que pelo método (a) a determinação da OF é lenta. Na determinação da OF, o método (b) apresenta maior precisão seguido pelo (c), (e) e (d), sendo o (a) o mais impreciso. Os métodos (a) e (d) estão fortemente sujeitos a erros de interpolação e o método (a) a erros de contagem.

Para avaliar quantitativamente o campo de deslocamentos/deformações de uma região é necessário discretizar esta região segundo uma malha, ou seja, calcular o deslocamento para uma série de pontos regularmente espaçados. Normalmente desenha-se a malha na própria superfície sob análise e o deslocamento é determinado para cada nó da malha. O campo de deslocamento será melhor caracterizado quanto maior o refino da malha.

A OF deve ser então atribuída para cada nó da malha. 0

montante de dados a determinar envolvidos na discretização aumenta muito com o refino da malha. Isto torna enfadonha a aquisição de dados por qualquer dos métodos descritos e praticamente impossível pela observação direta. A morosidade do método passa a ser um fator agravante.

O método da fotografia tem sido o mais usado por vários pesquisadores para a discretização de mapas de franjas, tanto na holografia interferométrica quanto em fotoelasticidade, moirê ou outras técnicas afins. [14 a 33]

4.2 - IMPORTÂNCIA DA AUTOMATIZAÇÃO

Nos casos genéricos, onde nenhuma ou quase nenhuma informação é conhecida sobre a natureza do campo de deslocamentos a quantificar, torna-se necessária a discretização da região estudada segundo, no mínimo, três diferentes ângulos de observação [7]. O montante de dados a adquirir, que já é considerável para casos simples é então pelo menos triplicado. Por estas razões a quantificação por meio da holografia interferométrica sofre significativas limitações.

Os métodos convencionais para determinação das OFs tornam-se ineficientes, devido à morosidade e a imprecisão inerentes.

A viabilização da quantificação de campos de deslocamentos/deformações pela holografia interferométrica, de uma forma prática, só é possível por meio da automatização das etapas de aquisição, processamento e documentação. Garantindo isso, a quantificação por meio da holografia interferométrica pode ser explorada em todas as suas potencialidades de forma simples, rápida e ampla, com uma boa confiabilidade dos resultados.

Na bibliografia consultada [1 a 48] nenhuma referência foi encontrada sobre a automatização na holografia interferométrica.

4.3 - MÉTODO DESENVOLVIDO

4.3.1 - Viabilidade

O primeiro passo no sentido de captar eletronicamente as

informações de um mapa de franjas é a obtenção da correspondente imagem real. Esta pode ser originada pela projeção de um diapositivo obtido fotograficamente a partir da imagem virtual holograficamente reconstruída, como descrito no método (c) do item 4.1, ou diretamente do holograma pelo método (e), como descrito em maiores detalhes abaixo.

O feixe não expandido do laser ao atravessar o holograma de dupla exposição se difrata, como mostra a figura 4.6 e é descrito no item 4.1.e. Uma parcela do feixe difratado forma uma imagem real quando incide numa tela, como é mostrado na figura 4.7. A qualidade da imagem gerada é satisfatória, embora de fraca intensidade e limitada resolução. As vantagens da técnica são que nenhum componente óptico ou acessório adicional é requerido e, conseqüentemente, menor custo, menor suscetibilidade a erros e distorções, e menor tempo de preparação. O ponto de observação fica automaticamente bem caracterizado como o ponto em que o feixe intercepta o holograma.

Para a geração de um sinal elétrico associado ao mapa de franjas, foi utilizado um fotodetector como transdutor ativo [42]. Este elemento atua como uma célula fotovoltaica, ou seja, gera uma tensão proporcional à intensidade de luz que incide em sua região sensível.

A viabilidade da automatização e a adequação do elemento fotossensível proposto ficaram evidenciadas com o auxílio da experiência descrita a seguir.

O fotodetector foi montado no carro do movimento X de um registrador X-Y e sua saída conectada na entrada de sinal referente ao eixo Y (fig. 4.8). Desta forma o eixo X está associado à posição do fotodetector e o eixo Y à intensidade de luz no fotodetector em cada posição X.

Quando a imagem real de uma dupla exposição é projetada ao longo do eixo pelo qual se desloca o fotodetector, como mostra a figura 4.8, e o carro do eixo X desloca-se regularmente, resulta um gráfico posição-intensidade como o da figura 4.9. Vários testes de repetibilidade foram feitos e constatou-se que os erros máximos são da ordem da própria resolução do sistema (espessura do traço $\approx 0,8$ mm).

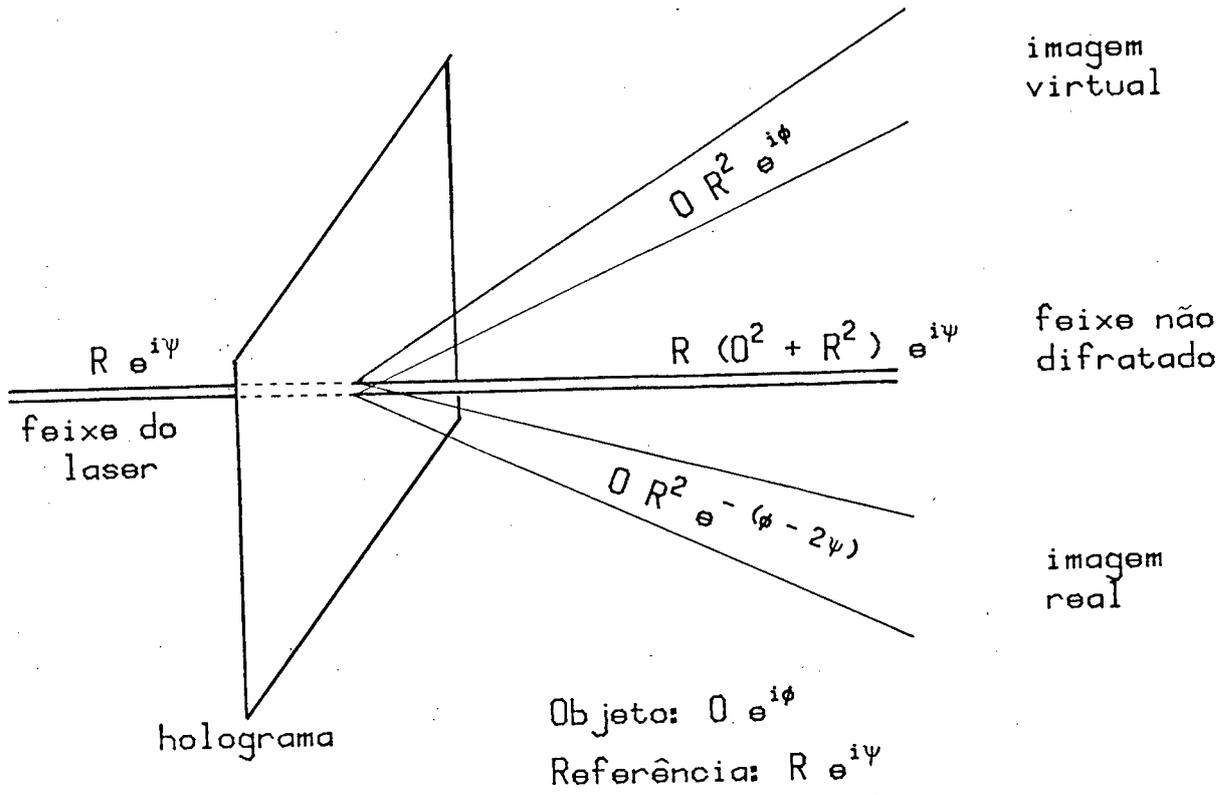


Fig 4.6 - Difração do feixe do laser em um ponto do holograma

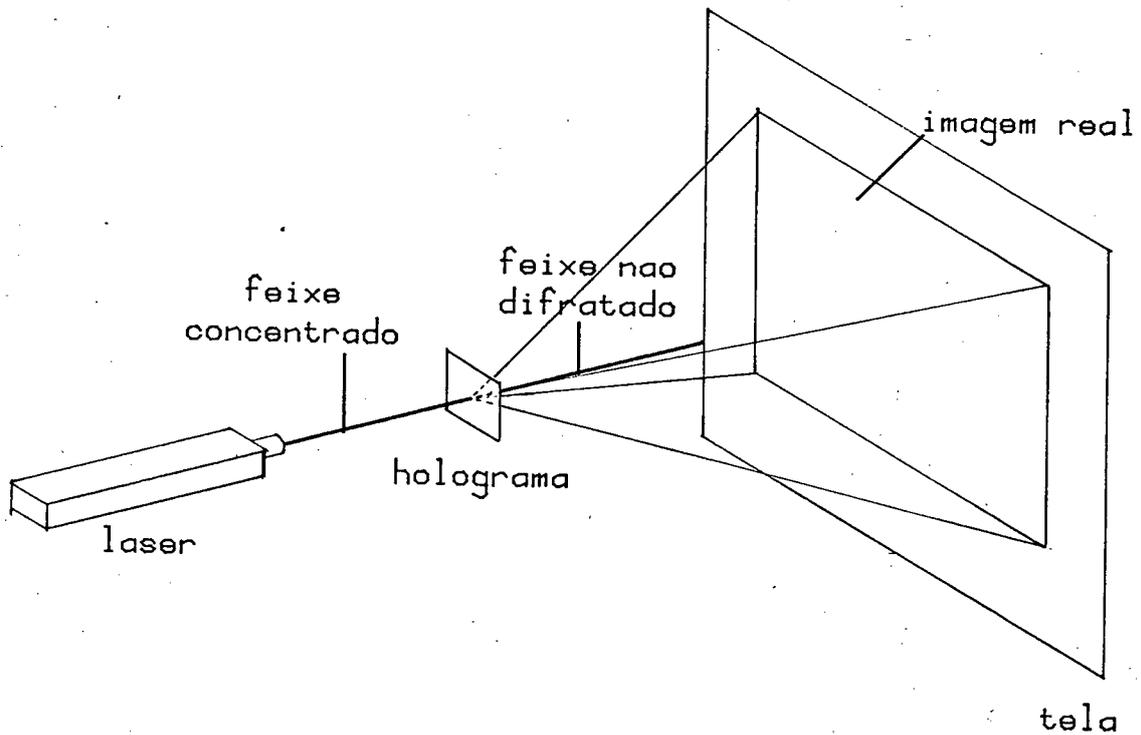


Fig 4.7 - Montagem para a formação da imagem real

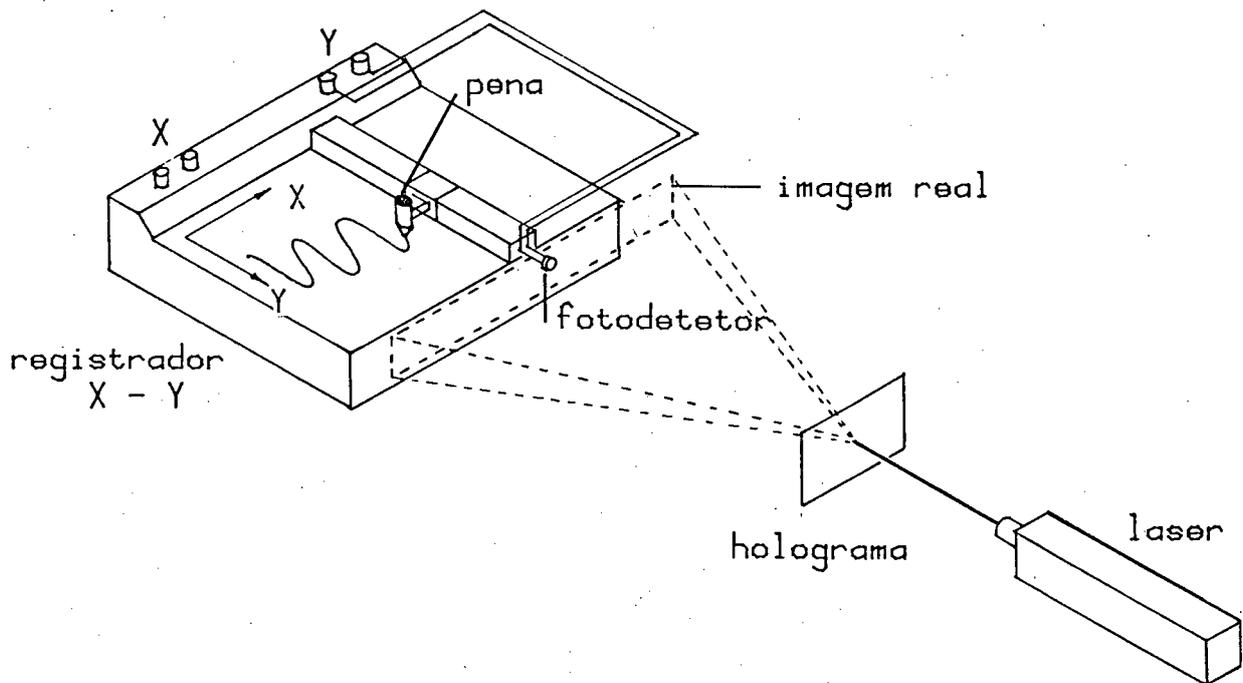
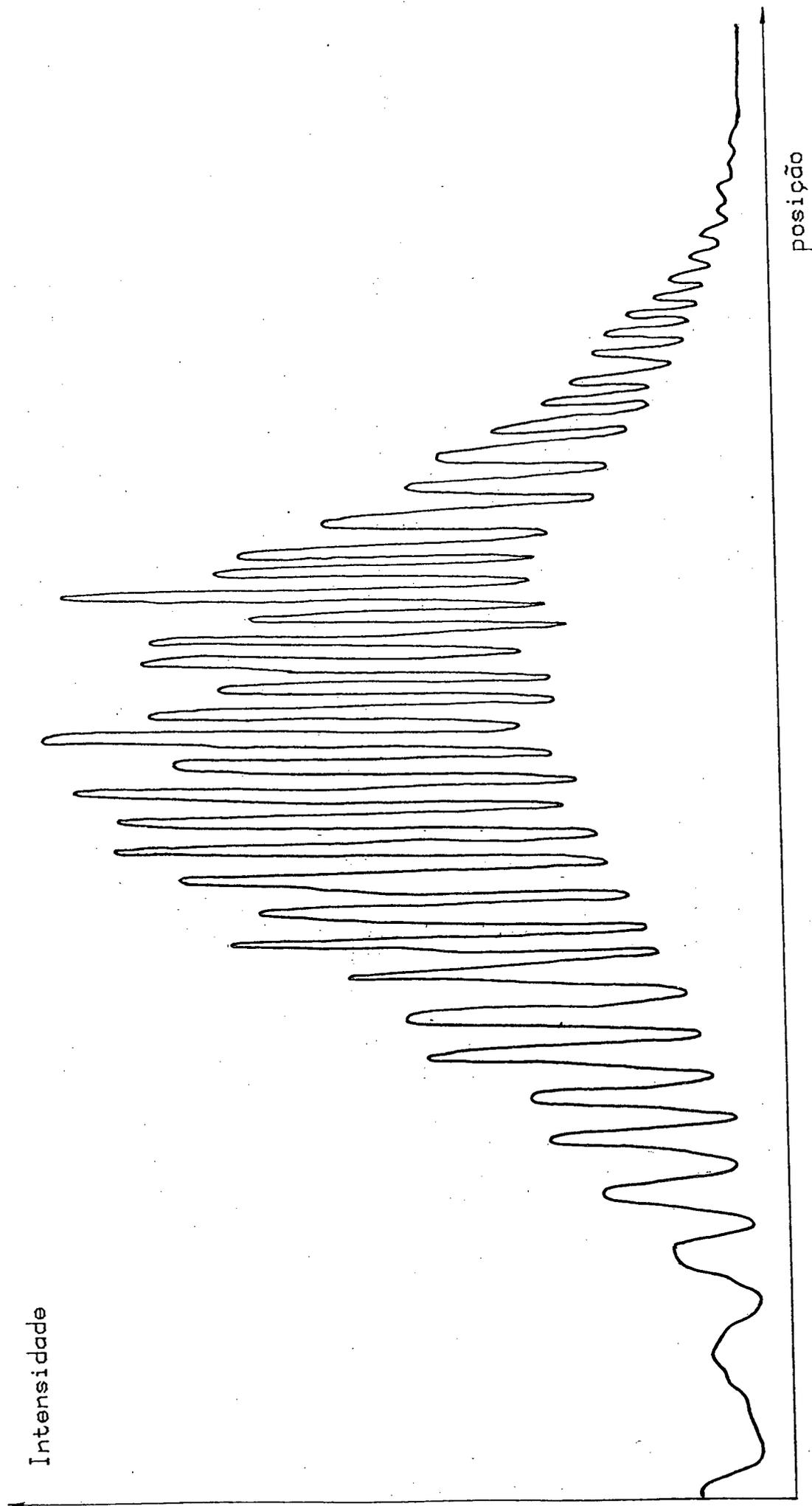


Fig 4.8 - Detecção fotoeletrônica das franjas de interferência

Esta experiência mostrou a viabilidade da detecção fotoeletrônica da distribuição de intensidade luminosa originada pelas franjas, ao longo de um eixo. A forma do gráfico permite concluir que existem pontos de máximo e de mínimo perfeitamente definidos ao longo da largura de uma franja, ou seja, é possível identificar o centro de uma franja como sendo o ápice do pico, e este aparece bem agudo e definido. Ainda convém observar que a existência de máximos e mínimos relativos é tão perfeitamente evidenciada em regiões bastante iluminadas quanto em regiões de pouca luminosidade.

4.3.2 - Instrumentação

Para a digitalização automatizada de um mapa de franjas foi usado o sistema esquematizado na figura 4.10.



posição

Fig 4.9 - Posição do fotodetector versus intensidade

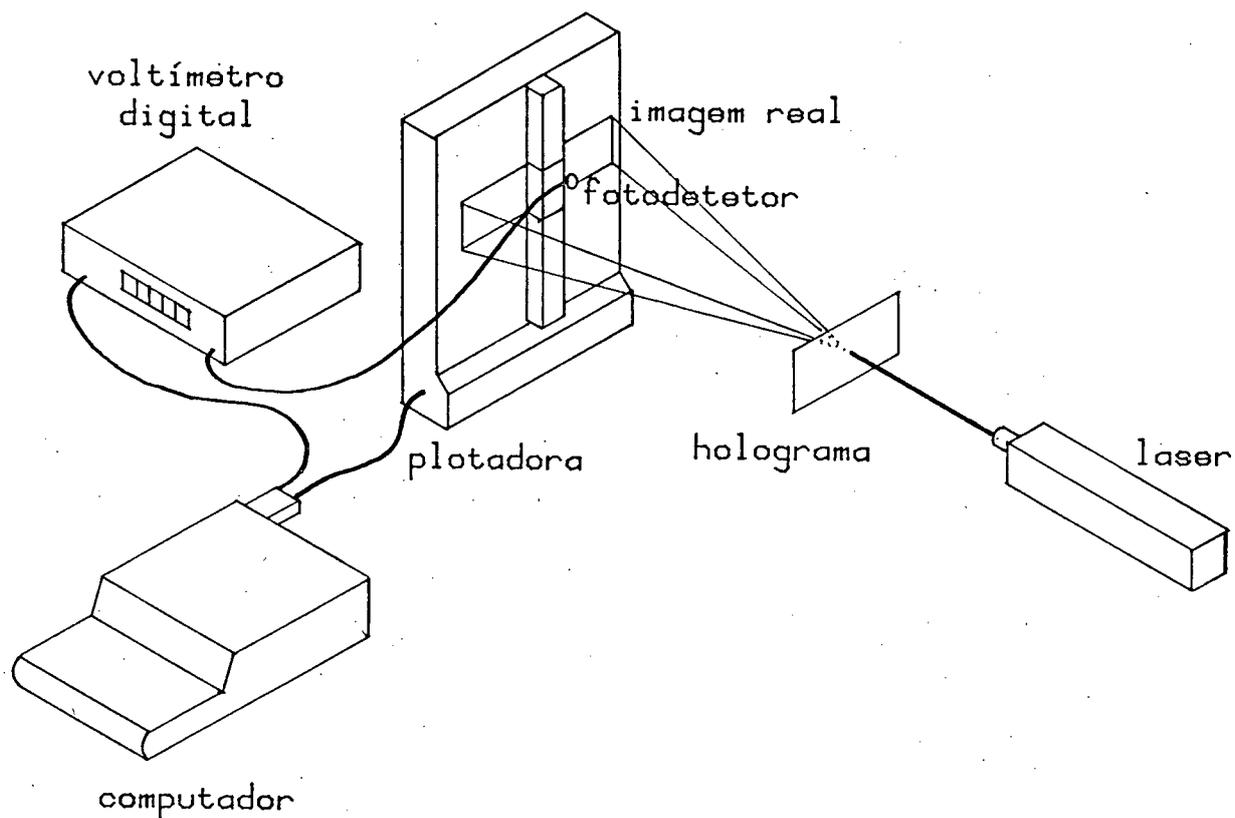


Fig 4.10 - Sistema utilizado para a automatização

O sistema consta de um microcomputador, um voltímetro digital, uma plotadora e um fotodetetor posicionado no porta-pena da plotadora. A posição XY do fotodetetor é associada às coordenadas XY do referencial da plotadora. A saída do fotodetetor é ligada ao voltímetro digital, que mede a tensão gerada proporcionalmente à intensidade da luz incidente. Desta forma, a cada par de coordenadas XY do plano da plotadora pode ser associada uma grandeza proporcional à intensidade luminosa daquele ponto.

O sistema descrito não pode operar de forma contínua. Tanto a plotadora funciona de forma incremental quanto a velocidade de leitura do voltímetro empregado não é superior a 25 leituras por segundo. Assim é inviável a monitoração contínua da intensidade versus a posição em todo o plano da imagem real.

4.3.3 - Programação

Para discretizar o mapa de franjas da imagem real é definida uma malha sobre a região estudada. São feitas varreduras ao longo das linhas paralelas da malha de modo a determinar a posição das franjas sobre estas.

Ao longo da linha de varredura, um único parâmetro é suficiente para definir a posição do transdutor no plano XY. O transdutor é deslocado pela plotadora, ao longo da linha de varredura, de uma forma incremental. Assim, cada posição do transdutor, ao ser associada com sua respectiva intensidade, pode ser representada por um ponto no gráfico posição versus intensidade, como mostra a figura 4.11.

Intensidade

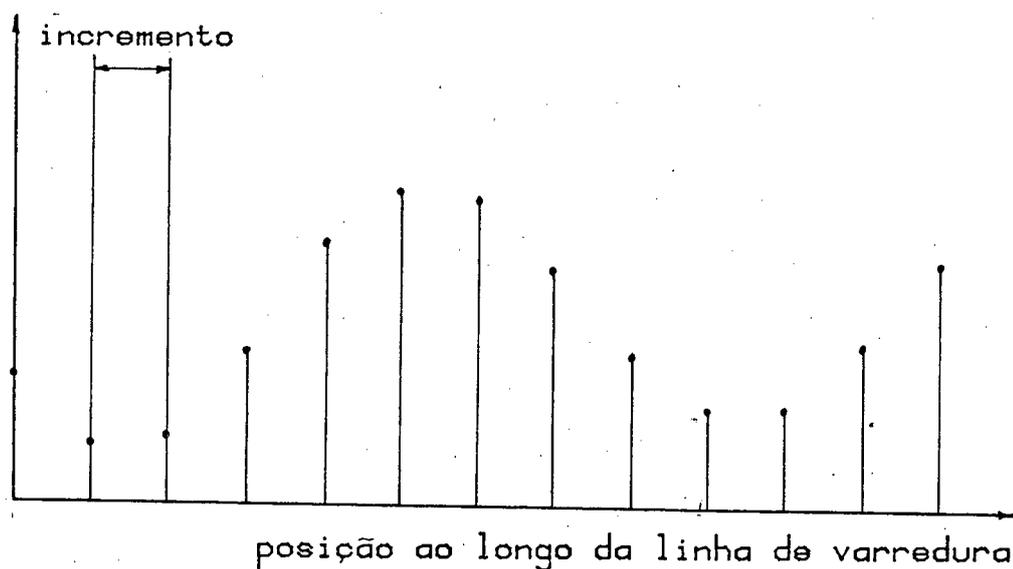


Fig 4.11 - Intensidade versus posição ao longo da linha de varredura

O algoritmo desenvolvido para determinar a posição dos máximos e mínimos relativos da distribuição discreta de intensidade é descrito a seguir.

No gráfico intensidade (I) versus posição ao longo da varredura (P), sejam A, B e C, nesta ordem, os três últimos pontos adquiridos pelo sistema, próximos o suficiente para assumir a existência de dois extremos entre eles. Para detectar a existência de um máximo ou mínimo entre estes três pontos, considera-se o produto entre o coeficiente angular da reta AB (m_{AB}), com o coeficiente angular da reta BC (m_{BC}). Como mostra a figura 4.12, se este produto for positivo, nesta região a curva da posição versus intensidade é monotonicamente crescente ou decrescente. Se este produto for negativo existe um extremo (máximo ou mínimo) entre os pontos A e C. Neste segundo caso, a posição do vértice da parábola (P_v) que passa pelos pontos A, B e C é assumida como a posição do centro da franja, e o sinal da concavidade da parábola indica se o extremo é um máximo ou um mínimo.

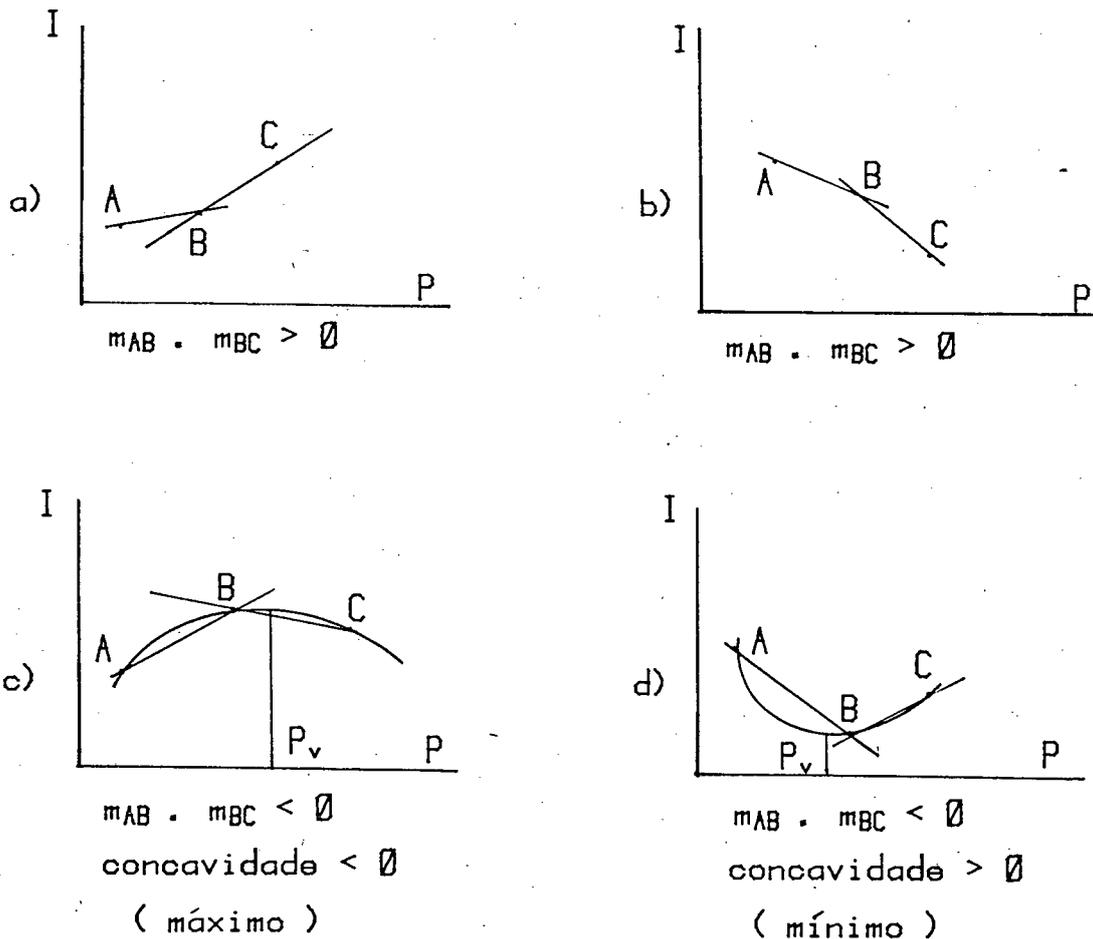


Fig 4.12 - Interpretação dos dados discretos I x P

Os testes efetuados mostraram que esta metodologia apresenta excelentes resultados. Os erros na determinação da posição (P_V) para um sinal típico, de forma senoidal por exemplo, com um incremento da ordem de $1/6$ do espaçamento entre as franjas, foram não superiores a $0,3\%$ do espaçamento das franjas.

Em regiões onde a intensidade é constante, a existência de ruídos, provenientes da granulação do filme e flutuações do voltímetro, pode tornar o produto dos coeficientes angulares das retas AB e BC negativo (quando teoricamente seria nulo), embora de uma pequena magnitude em valor absoluto. Para evitar o inconveniente da detecção de um falso extremo, o produto é comparado com um parâmetro negativo denominado sugestivamente de sensibilidade. Quanto maior o módulo desse parâmetro, menor a resolução do sistema para captar estas pequenas flutuações. O sistema constituído foi capaz de determinar experimental e automaticamente, com boa precisão, a posição de máximos e mínimos de intensidade ao longo da linha de varredura.

Para efetuar a quantificação pela holografia interferométrica é necessário, no entanto, determinar discretamente as OFs dos nós definidos por uma malha a partir dos dados levantados experimentalmente.

As franjas claras (máximos de intensidade) correspondem ordens inteiras: $0, 1, 2, 3, \dots$; às escuras (mínimos de intensidade): $0.5, 1.5, 2.5, 3.5, \dots$. Assim, a posição das sucessivas franjas pode ser transformada em pontos no gráfico posição-OF, e com estes dados é fácil fazer uma interpolação e determinar a OF de cada ponto definido pela malha naquela linha de varredura, como mostra a figura 4.13.

A interpolação é feita trecho a trecho por meio de polinômios de segundo grau. Em virtude do comportamento desta curva ser normalmente bastante suave, os resultados têm sido satisfatórios, não justificando a utilização de uma técnica de interpolação ou de ajuste mais sofisticada.

Fatalmente, a projeção de uma imagem real em uma tela plana é acompanhada de distorções quando o eixo de projeção não for perpendicular à tela. É evidente que um grande cuidado no posicionamento da tela pode minimizar este efeito. Isto implica em

um intensivo trabalho de ajuste.

A projeção de um retângulo em uma tela oblíqua resulta em um trapezóide, onde os lados que eram originalmente paralelos, deixam de ser paralelos, embora as linhas retas permaneçam retas. Esta distorção pode ser corrigida através da definição de um novo sistema de coordenadas utilizando elementos do trapezóide correspondente à distorção de um retângulo original, dentro do qual é definida a malha de discretização. Este novo sistema, st é relacionado com o XY por:

$$X = \frac{1}{4} [(1-s)(1-t)x_1 + (1+s)(1-t)x_2 + (1+s)(1+t)x_3 + (1-s)(1+t)x_4] \quad (4.1)$$

$$Y = \frac{1}{4} [(1-s)(1-t)y_1 + (1+s)(1-t)y_2 + (1+s)(1+t)y_3 + (1-s)(1+t)y_4]$$

onde x_i, y_i são as coordenadas do ponto "i" no sistema XY ; s e t são parâmetros associados ao sistema de coordenadas distorcido (fig. 4.14) e X e Y são as coordenadas do ponto definido pelos parâmetros s e t no sistema XY .

As equações 4.1 definem as coordenadas XY , no plano da imagem distorcida, de qualquer ponto da malha, desde que suas coordenadas s e t sejam conhecidas. A figura 4.15 mostra a associação entre a malha original e sua distorção.

Para efetuar a digitalização, na região original, define-se uma malha pela qual a região é discretizada. As posições dos quatro vértices da malha na projeção da imagem são informadas ao computador. A varredura é feita na malha por um cursor imaginário, de forma incremental. A posição XY correspondente no plano da imagem é calculada pelas relações 4.1, e nesta, o transdutor é posicionado. A leitura da intensidade é associada ao sistema st resultando no levantamento da posição das franjas em relação a este último sistema. Desta forma a OF interpolada é referente à malha original.

Em cada discretização, a imagem real é originada a partir da difração causada pela pequena região do holograma onde incide o feixe concentrado. Esta região é bem definida e caracteri

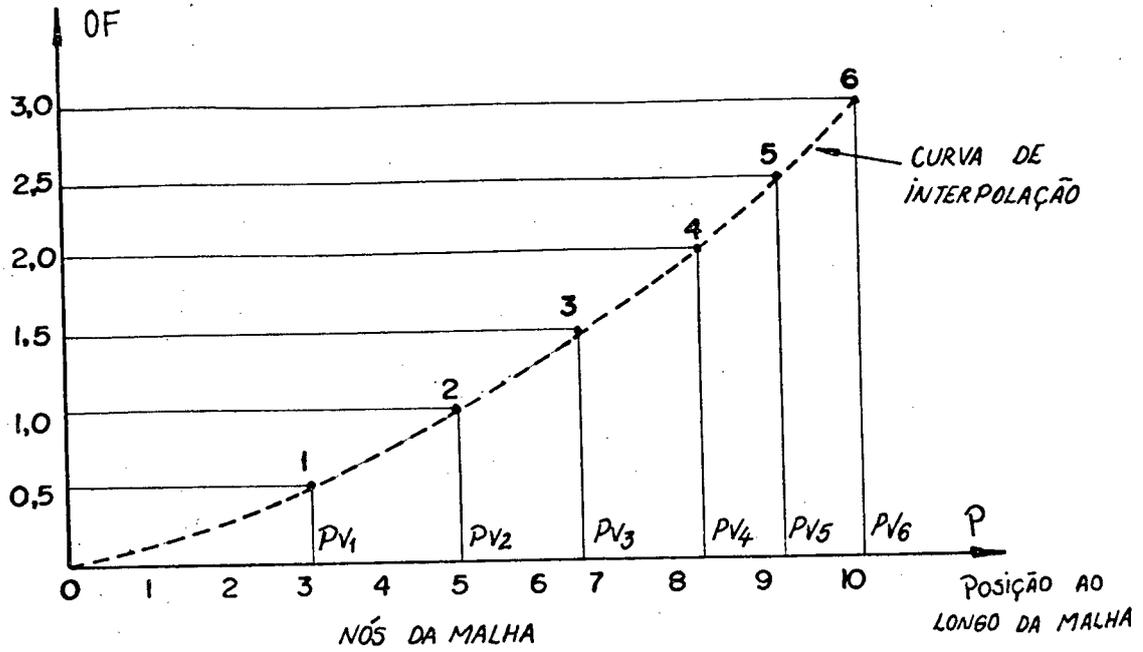


Fig 4.13 - Interpolação das OFs para os nós da malha

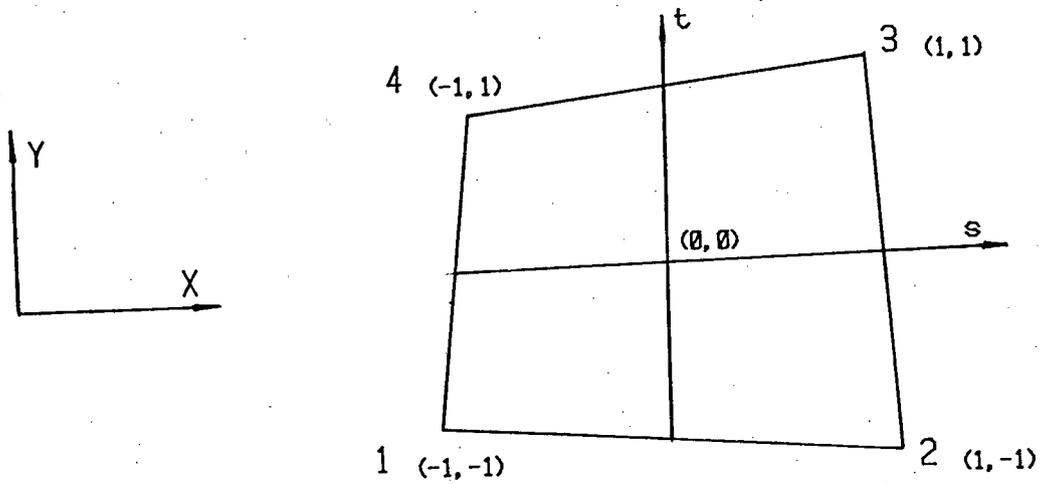


Fig 4.14 - Definição do sistema distorcido st

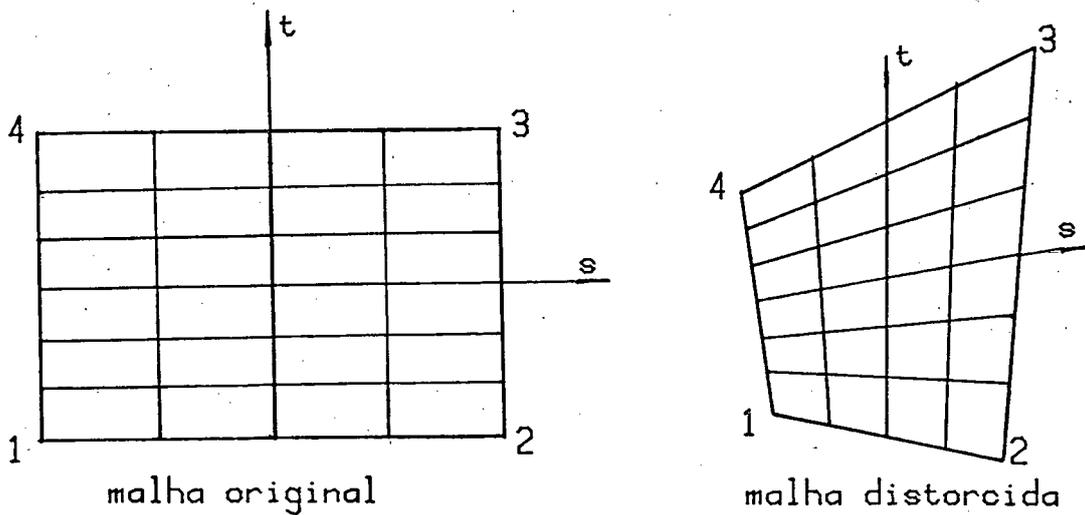


Fig 4.15 - Distorção da malha

za o ponto de observação. A imagem real gerada corresponde àque-la que um observador situado no ponto onde o feixe concentrado intercepta o holograma, veria o corpo estudado.

Diferentes digitalizações podem ser feitas para um mesmo holograma, variando o ponto de iluminação/observação, uma vez que o mapa das franjas varia conforme a posição do observador.

4.3.4 - Aspectos Operacionais

Durante os procedimentos de digitalização de um mapa de franjas, o sistema pára ao detectar a existência da primeira franja em cada linha de varredura. Neste ponto o operador informa ao computador a OF correspondente. Para cada nova franja detectada, o operador atua no sistema classificando-a segundo o sentido de crescimento: a OF é maior, igual ou menor que a anterior. Pode ser usada classificação automática em casos mais simples.

4.3.5 - Fontes de erros

Alguns fatores contribuem para a formação de um erro na determinação da OF ao longo da malha. A contribuição das diferentes fontes é difícil de ser avaliada para uma situação geral, pois o peso de cada uma varia substancialmente com as circunstâncias particulares.

O ruído na imagem real causado pela granulação do filme no holograma, sobretudo quando a intensidade da imagem real é débil, é uma das principais fontes de erros. Origina erros na posição dos centros das franjas ao longo da varredura.

O erro na especificação das posições dos quatro vértices do trapezóide, correspondentes à projeção distorcida da malha, também tem certa influência, principalmente quando o grau de distorção é grande.

Os resultados estão sujeitos a erros de operação e interpretação por parte do usuário.

As influências dos erros aleatórios dos instrumentos envolvidos, como dos erros de interpolação são consideradas desprezíveis.

Testes de repetibilidade, para um mesmo mapa de franjas, mostraram que mesmo com a ação das fontes de erro referenciadas, os erros absolutos na digitalização foram inferiores a 1/10 de ordem de franja.

4.4 - APLICABILIDADE

De acordo com as conveniências do estudo em questão, define-se livremente a malha de discretização. Um maior ou menor número de nós em cada direção é especificado de forma a atingir o refino conveniente [43]. Desta forma, garante-se grande flexibilidade e eficiência na digitalização de malhas retangulares, com as mais diferentes proporções.

Somente hologramas de dupla exposição ou em tempo médio podem ser diretamente estudados, pois as franjas de interferência já estão "congeladas" e contidas na própria imagem reconstruída. Nas situações onde não há um referencial fixo natural no corpo estudado, a OF absoluta pode ser determinada por meio de uma técnica especial, descrita na referência [34].

Tanto hologramas em tempo real quanto mapas de franjas de outras origens: fotoelasticidade, moirê, etc., podem ser digitalizadas via técnica fotográfica. Assim, projetando-se um diapositivo do mapa de franjas sobre o plano da plotadora é feita a digitalização pelo método descrito.

Uma análise das considerações acima revela que as limitações adicionais impostas pela técnica de digitalização desenvolvida não restringem a gama de aplicações tipicamente atribuídas à holografia interferométrica. Contrariamente, a sistemática desenvolvida representa uma redução substancial da no tempo inerente à aquisição de dados e um aumento de precisão dos resultados.

5 - TRATAMENTO DE DADOS

Na holografia interferométrica, os dados oriundos da discretização de um mapa de franjas segundo a malha estabelecida, exigem um tratamento matemático compatível para tomar significado físico. A apresentação de resultados em forma de gráficos e tabelas é de grande importância para a análise dos aspectos qualitativos e quantitativos do problema estudado, bem como para a documentação e armazenamento permanente para futuros reprocessamentos e análises.

5.1 - O PROGRAMA DE PROCESSAMENTO E DOCUMENTAÇÃO

O programa geral de processamento e documentação foi desenvolvido para atender estas necessidades básicas da holografia interferométrica. Conta ainda com recursos adicionais que facilitam e enriquecem a análise de qualquer tipo de campo de deslocamento estudado [44].

A estrutura geral do programa é esquematizada na figura 5.1 e será discutida nos itens seguintes.

5.2 - ENTRADA DE DADOS

Os dados de posicionamento dos componentes ópticos utilizados na montagem são compactados de forma normalizada, permitindo uma fácil e prática especificação.

As geometrias espaciais do suporte do holograma e do filtro espacial de iluminação do corpo [34] estão embutidos no programa. A especificação da posição destes dois elementos é feita mediante a um sistema de coordenadas normalizado referido à superfície da mesa. A especificação do ponto de observação é feita por meio de uma normalização feita sobre a superfície do holograma (fig. 5.2). O centro da região estudada define o sistema de coordenadas global, segundo o qual são calculados os deslocamentos. Estes recursos têm por objetivo facilitar a especificação dos parâmetros de posicionamento dos componentes ópticos.

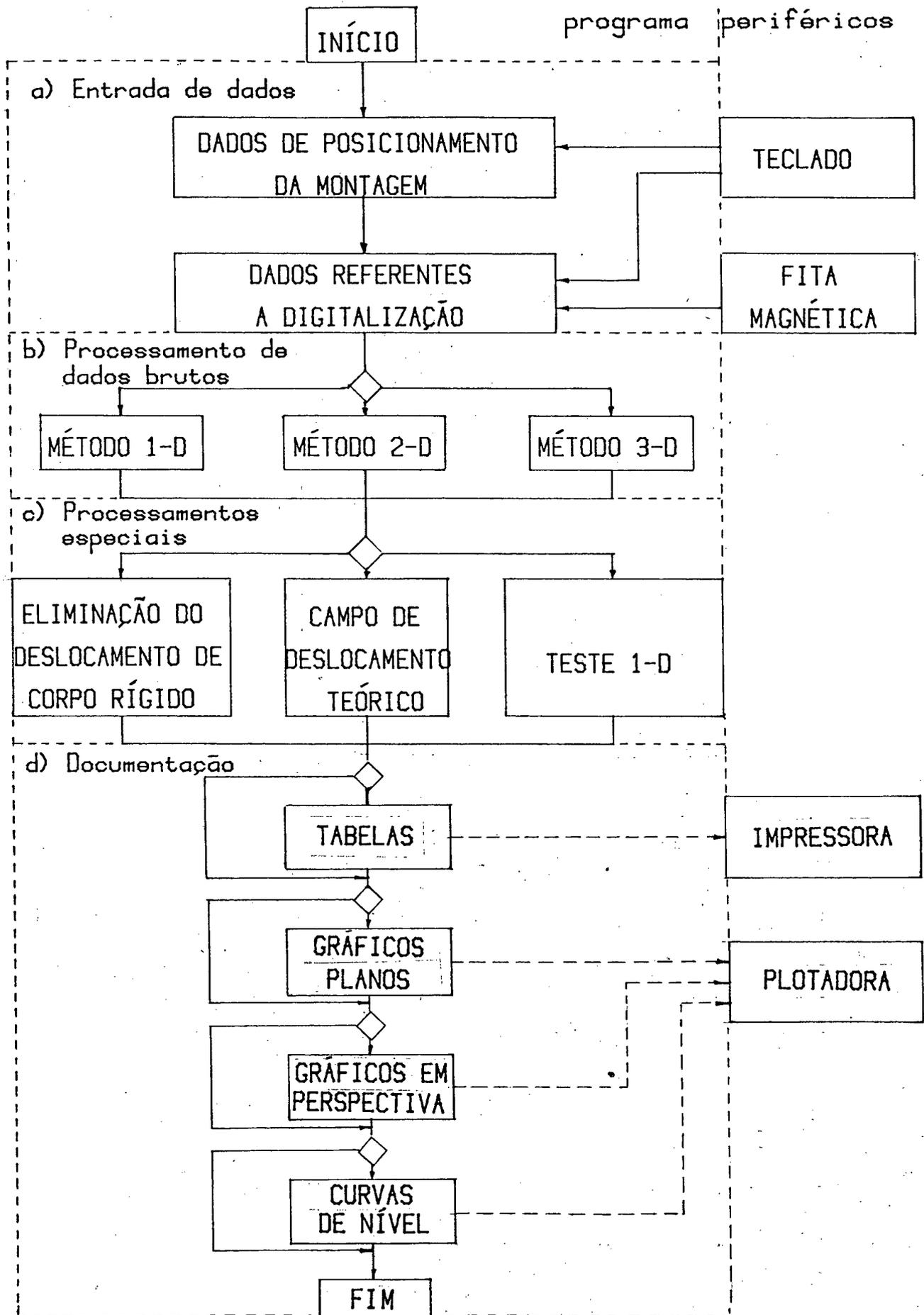


Fig 5.1 - Diagrama geral do programa de processamento

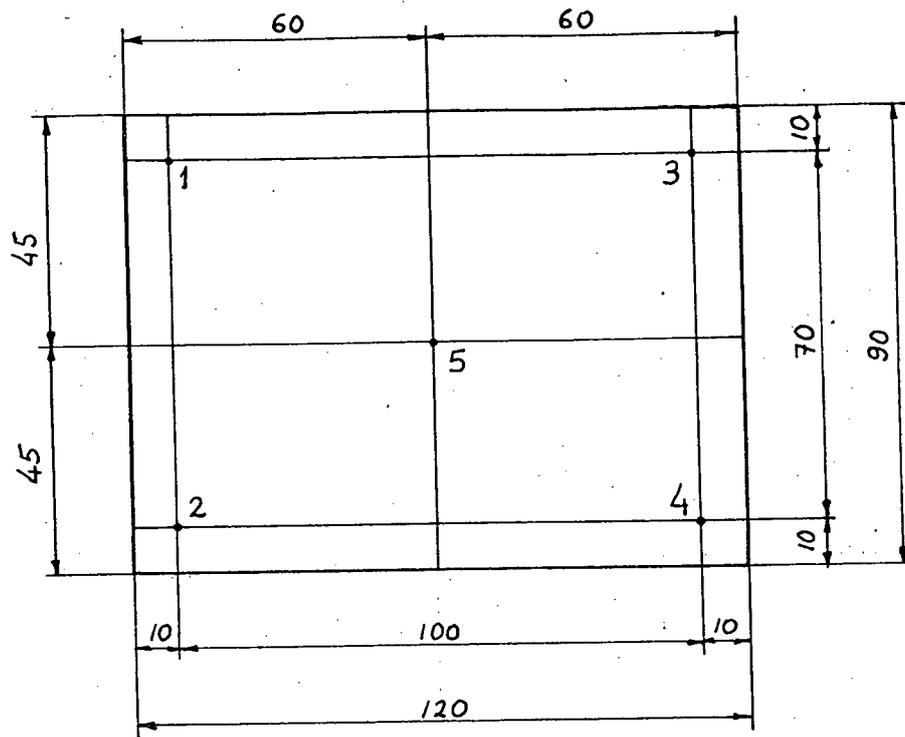


Fig 5.2 - Posição dos pontos normalizados no holograma

As características da malha de discretização usada na digitalização do(s) mapa(s) de franjas e a especificação do(s) ponto(s) de observação correspondente(s) constituem os dados referentes à digitalização.

5.2.1 - Observação do Corpo via Espelhos Planos

Como exposto no capítulo 2, tanto o método bidirecional quanto o tridirecional exigem digitalização da região estudada, por diferentes pontos de observação. Face às condições impostas pelas reduzidas dimensões do holograma e a sua considerável distância à superfície estudada, obtem-se em geral pequena separação angular quando os pontos de observação situam-se dentro do próprio holograma.

A solução adotada para contornar esta dificuldade consta

da utilização simultânea de alguns espelhos planos que refletem a imagem da peça na direção do holograma (fig. 5.3). Desta forma, a cena gravada mostra várias imagens da mesma peça, submetida ao mesmo campo de deslocamento, vista por diferentes ângulos. (fig. 5.4)

Evidentemente que cada vista diferente apresenta diferentes distribuições das franjas.

As posições de observação O_i no caso de imagens refletidas por espelhos planos são consideradas as correspondentes ao rebatimento do ponto do observador O nos planos dos respectivos espelhos (fig. 5.3) |45|.

Foi embutida no programa uma rotina que calcula a posição da reflexão de um ponto em um espelho plano em função de parâmetros normalizados dos espelhos informados ao computador na etapa de entrada de dados de posicionamento dos componentes da montagem.

5.3 - PROCESSAMENTO DE DADOS BRUTOS

5.3.1 - Método Unidirecional

Por este método de cálculo a direção do deslocamento é previamente conhecida e deve ser especificada no início desta rotina. Somente a digitalização por um ponto de observação é requerida para o processamento, segundo descrito no item 3.5.

Este método de processamento é bastante propício para medição da flecha em problemas de flexão envolvendo vigas e placas. Uma resolução de até $0,07 \text{ } \mu\text{m}$ pode ser atingida.

5.3.2 - Método Bidirecional

Este método parte do princípio que os vetores deslocamento ao longo de toda a superfície estudada são coplanares, como descrito no item 3.6. O plano deve ser especificado no início da rotina.

São requeridas digitalizações por no mínimo dois pontos de observação. Quando mais pontos são usados, a solução do siste

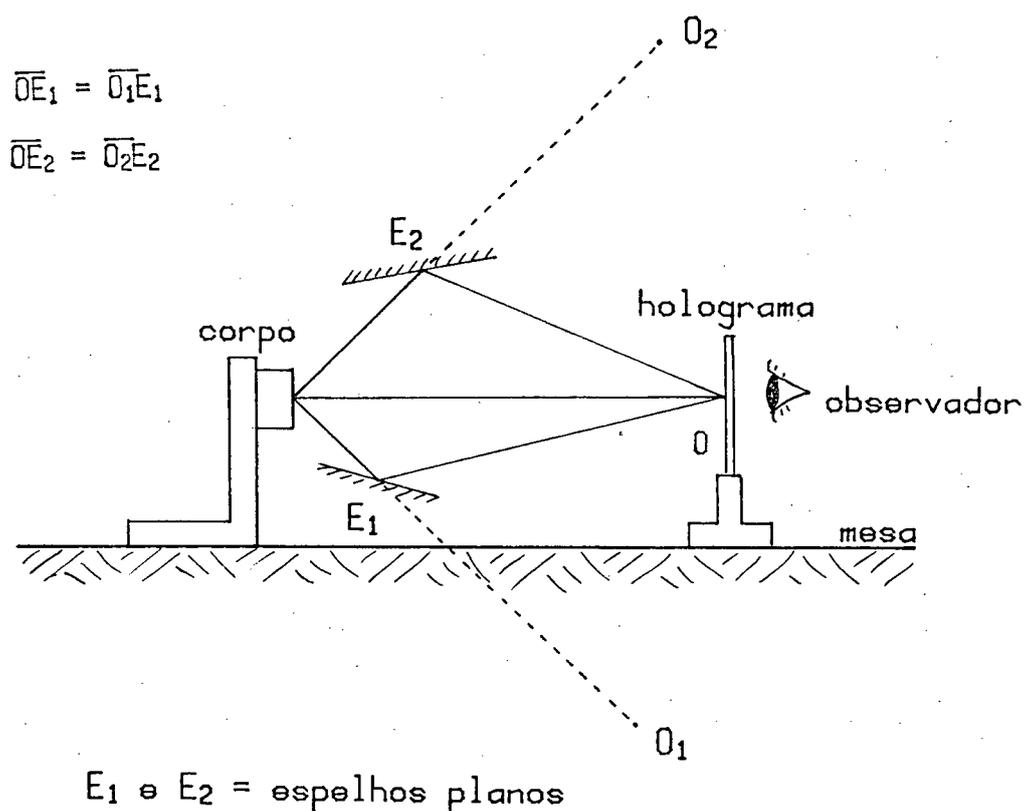
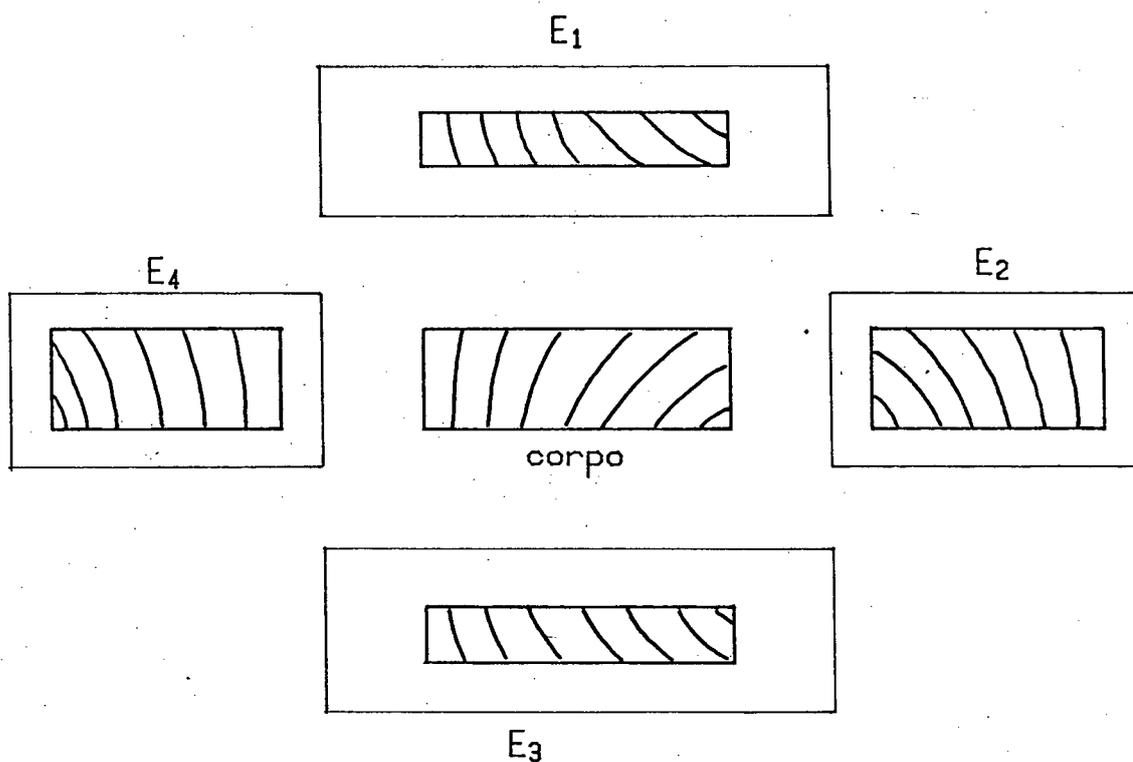


Fig 5.3 - Observação do corpo via espelhos planos



E₁, E₂, E₃ e E₄ = espelhos planos

Fig 5.4 - Aspecto da cena observada via espelhos planos

ma de equações (3.25 e 3.26) é feita pelo método dos mínimos quadrados, com significativa melhora dos resultados. (Três ou quatro são suficientes).

5.3.3 - Método Tridirecional

Este método é o mais geral possível. Nenhuma restrição é imposta ao campo de deslocamento a ser determinado. No mínimo digitalizações segundo três pontos de observação distintos são requeridas, como foi visto no item 3.7. Quando o número de imagens digitalizadas é maior que três, há sensível melhora do resultado pela solução do sistema de equações pelo método dos mínimos quadrados. (Quatro ou cinco levam a excelentes resultados).

5.4 - PROCESSAMENTOS ESPECIAIS

5.4.1 - Teste Unidirecional (1-D)

Trata-se de uma autoverificação de dados e resultados ao mesmo tempo que permite uma estimativa da ordem de grandeza dos erros de medição para os métodos 2-D ou 3-D.

Após o processamento dos dados pelo método 2-D ou 3-D as três componentes do deslocamento em cada ponto da malha são conhecidas e, conseqüentemente, o é a direção do deslocamento.

O teste 1-D processa os dados referentes a cada ponto de observação independentemente. Consiste em calcular o campo de deslocamentos pelo método 1-D considerando que a direção do deslocamento em cada ponto da malha é a mesma resultante do processamento pelo método 2-D ou 3-D realizado anteriormente, ou uma outra previamente especificada. A comparação dos resultados obtidos para cada ponto de observação possibilita a avaliação qualitativa e quantitativa dos erros de medição. Teoricamente, na ausência total de erros, os valores calculados deveriam coincidir exatamente. Entretanto, erros decorrentes da digitalização e/ou especificação da posição dos componentes causam uma dispersão nestes resultados proporcional à magnitude do erro envolvido, como exemplificado no capítulo 6.

A comparação dos dados referentes aos diversos pontos de observação pode identificar a especificação errônea de algum parâ

metro. Por exemplo, quando os dados de um ponto de observação diferem muito dos demais, certamente a especificação do ponto de observação, e/ou do espelho plano no qual a respectiva imagem é refletida, foi incorreta.

5.4.2 - Eliminação de Deslocamentos de Corpo Rígido

O campo de deslocamento de uma região pode ser desmembrado em duas componentes. A primeira componente é aquela que causa apenas um deslocamento de corpo rígido, ou seja, não altera a forma da malha, só a sua posição. A segunda parcela é responsável somente pela mudança da forma, por isso chamada deviatória.

Somente a componente deviatória é de interesse para o estudo de deformações e tensões. A componente de corpo rígido deve ser eliminada.

A componente de translação de corpo rígido pode ser eliminada para cada eixo independentemente. O referencial zero pode ser especificado por pontos da malha ou pela média dos deslocamentos.

A rotação de corpo rígido em torno de cada eixo pode ser eliminada independentemente pela subtração da rotação média em torno de cada eixo.

Um exemplo de eliminação da translação de corpo rígido é mostrado no item 7.2.

5.4.3 - Deslocamento Teórico

Através das equações que exprimem as três componentes do deslocamento em função da posição na malha, o programa pode gerar e documentar, com os mesmos recursos apresentados até aqui, o campo de deslocamento descrito por uma formulação teórica.

A representação gráfica desta formulação teórica pode ser vista e analisada separadamente ou pode ser superposta aos resultados experimentais, representando uma valiosa ferramenta de análise comparativa.

No item 6.2.3, nas figuras 6.18, 6.19 e 6.20 são vistas aplicações destes recursos.

5.5 - DOCUMENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.5.1 - Tabelas

Uma das formas de apresentação de resultados é feita via tabelas numéricas. Para cada nó da malha, devidamente ordenado, são impressas as três componentes do vetor deslocamento.

Esta forma de apresentação é adequada para análise de alguns aspectos quantitativos, e armazenamento digital de informações.

5.5.2 - Gráficos das Componentes

Nesta forma de apresentação de resultados qualquer componente do deslocamento pode ser colocada graficamente em relação à posição na malha, ou seja, representa o comportamento da(s) componente(s) do deslocamento ao longo de uma direção da malha.

Este tipo de gráfico é muito conveniente para análise qualitativa e quantitativa e interpretação de resultados. O comportamento e a interdependência entre as diversas componentes do deslocamento ao longo de uma ou mais linhas da malha é facilmente estudado. É de muito interesse na análise dos resultados do teste 1-D e na comparação teórico - experimental.

Exemplos deste tipo de gráficos podem ser vistos nas figuras 6.8 a 6.12, 6.17 e 6.18.

5.5.3 - Gráficos em Perspectiva

Por meio destes recursos, os resultados são representados num gráfico em três dimensões. Uma vista em perspectiva, segundo qualquer ângulo de observação especificado, mostrando a malha nas posições inicial e final, pode ser obtida (fig. 6.19, 7.2, 7.4, 7.5, 7.7, 7.9). São usadas escalas distintas para posição e deslocamento, podendo esta última ser selecionada convenientemente.

Selecionando ângulos de observação convenientes elimina-se uma das componentes do deslocamento, restringindo a análise às outras duas. Por exemplo, observação normal ao plano XY impli

cará na eliminação da componente Z. Exemplos de aplicações destes recursos são vistos nas figuras 6.20 a 6.22.

5.5.4 - Curvas de Nível

Curvas de deslocamento constante são traçadas na superfície correspondente à posição final da malha. Estas curvas são traçadas na própria vista em perspectiva com igualmente plena liberdade de escolha do ângulo de observação. A vista frontal resulta em uma representação topográfica do campo de deslocamento. Seleciona-se qual a direção do deslocamento constante em relação à qual as curvas são traçadas.

Este recurso é muito conveniente para análise quantitativa dos diversos campos de deslocamento. Complementa-se integralmente com a representação em perspectiva, conjugando os aspectos qualitativos e quantitativos na mesma representação gráfica. Também o aspecto qualitativo, se comparado aos gráficos simples em perspectiva, é grandemente enriquecido. As figuras 6.21, 6.22, 7.2, 7.4, 7.5, 7.7 e 7.9 ilustram aplicações deste recurso.

Quando a direção segundo a qual as curvas de nível são traçadas é especificada, a componente do deslocamento nesta direção é calculada em todos os pontos da malha. A curva de nível no interior de um elemento quadrangular da malha é calculada por interpolação do nível de cada um dos quatro vértices deste elemento, quando o respectivo nível existe dentro do elemento considerado.

5.6 - ASPECTOS GERAIS

O programa geral de processamento, apresentado funcionalmente neste capítulo em conjunto com o programa digitalizador, constituem uma valiosa ferramenta para tornar prática e precisa a holografia interferométrica.

As rotinas de tratamento matemático dos dados foram estruturadas visando a adequação a qualquer tipo de problema a ser estudado.

Os resultados apresentados são de fácil visualização e constituem poderosas ferramentas para análise qualitativa e quantitativa.

6 - DESEMPENHO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

O desempenho metrológico e operacional do sistema desenvolvido é avaliado neste capítulo através da análise dos resultados de dois ensaios especialmente idealizados para este fim.

Inicialmente foi feita a determinação do campo de deslocamento oriundo da flexão de uma viga engastada, por meio da holografia interferométrica automatizada. Foi feita uma comparação quantitativa com outras técnicas convencionais com a finalidade de avaliar os erros experimentais.

O segundo ensaio foi realizado com o intuito de determinar o movimento composto de translação e rotação de uma superfície plana. Também os aspectos qualitativos e quantitativos dos resultados são analisados mediante comparação com outras técnicas.

6.1 - DEFORMAÇÕES EM UMA VIGA ENGASTADA

Neste experimento, o campo de deslocamento gerado pela flexão de uma viga engastada em uma extremidade foi estudado. O deslocamento foi medido diretamente em um ponto selecionado da superfície da peça por um medidor de deslocamento padrão, sendo este valor comparado com o medido pela holografia interferométrica para aquele mesmo ponto.

O estudo da flexão de uma viga engastada foi adotado por conveniência em virtude do campo de deslocamentos esperado. Pela teoria simplificada de vigas, o campo de deslocamentos decorrente apresenta componentes de deslocamento em uma única direção. Esta situação é conveniente para o estudo do problema pelo método 1-D, entretanto, resultados semelhantes ao 1-D são esperados quando os métodos 2-D ou 3-D são utilizados. Assim, a escolha de um campo de deslocamento simples possibilita a comparação qualitativa e quantitativa entre os resultados apresentados pelos três métodos e destes com os resultados dos métodos convencionais.

6.1.1 - Especificação do Corpo de Prova

A forma e as dimensões do corpo de prova foram selecionada

das em função de uma série de considerações:

- a) Pequena espessura (1,5 mm) para reduzir a rigidez à flexão, não exigindo uma força de deflexão significativa. Assim, as condições de imobilidade do engaste são melhoradas.
- b) Grande largura (75 mm) para permitir um engaste eficiente e garantir uma grande rigidez flexional na direção transversal ao movimento, minimizando a componente Y.
- c) Grande comprimento (240 mm) para permitir boas condições de engaste e visualização na imagem real; espaço suficiente para instalação do transdutor de deslocamento; vão em balanço grande (140 mm).
- d) Disponibilidade de chapa de alumínio com boa homogeneidade.
- e) Fácil usinabilidade.

6.1.2 - Montagem Experimental

A forma e as dimensões do modelo estudado são vistas na figura 6.1. A região hachuriada corresponde à região estudada.

A força F foi aplicada indiretamente por meio do deslocamento imposto por um parafuso micrométrico na face posterior da placa, como mostra a figura 6.2. A esfera tem por finalidade garantir uma aplicação pontual da força F , segundo uma direção normal à superfície. A posição do transdutor de deslocamento também é mostrada na figura.

O sistema de coordenadas adotado é mostrado na figura 6.3.

O corpo de prova foi preso à base por meio de quatro parafusos (fig. 6.2 e 6.3). Esta situação não garante uma condição ideal de engaste mas foi adotada por assegurar a existência de um referencial fixo, visível na imagem reconstruída, na própria superfície do corpo. Assim, a OF absoluta pode ser determinada com segurança.

O corpo de prova foi iluminado numa disposição frontal e a observação foi feita por quatro vias diferentes: diretamente, por meio de dois espelhos laterais e por meio de um espelho superior. (fig. 6.4)

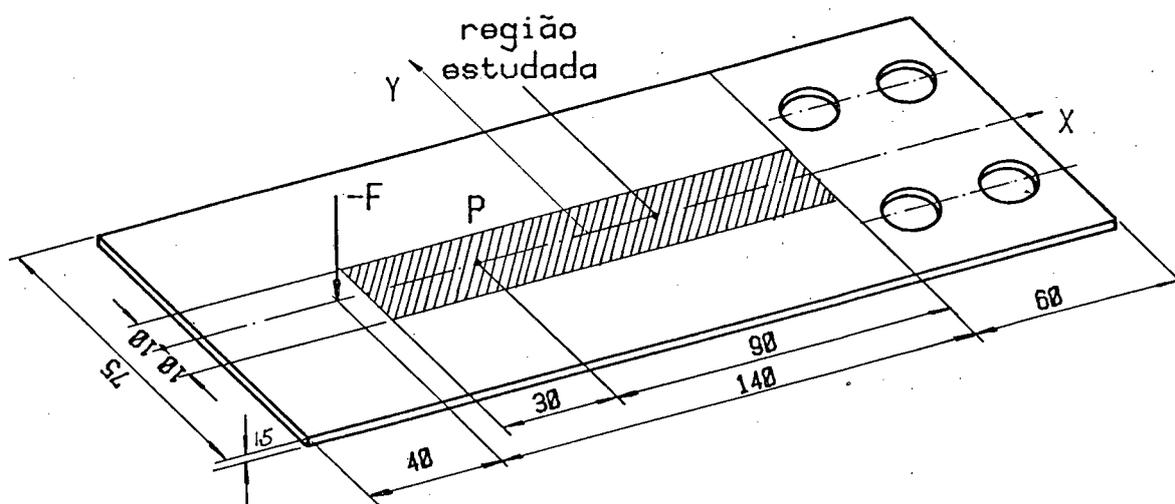


Fig 6.1 - Corpo de prova

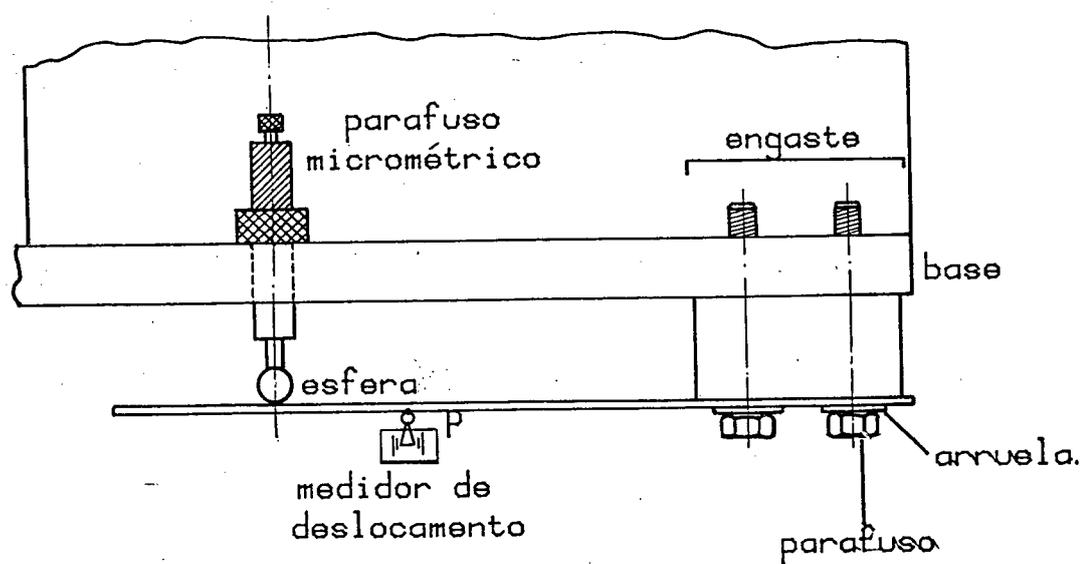


Fig 6.2 - Montagem experimental - vista superior

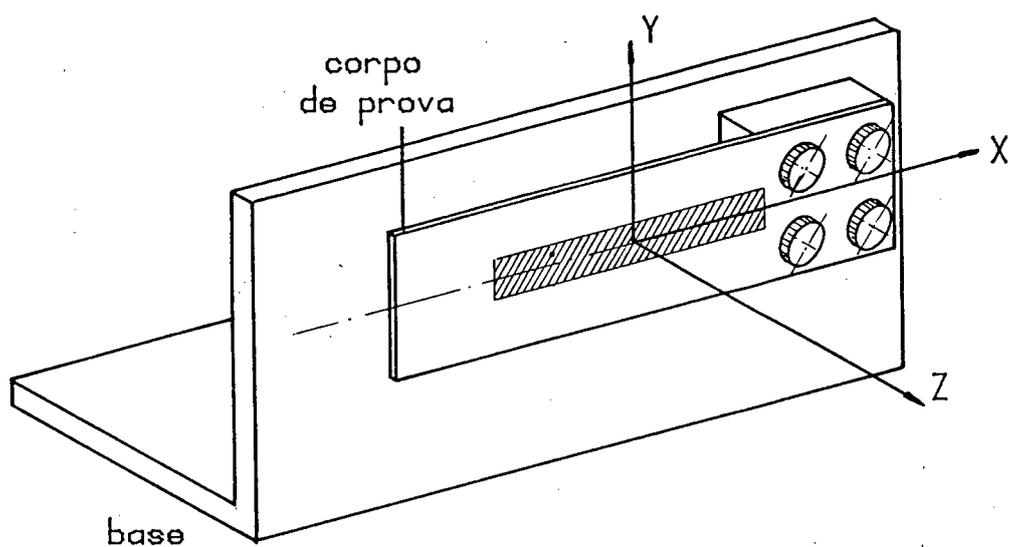
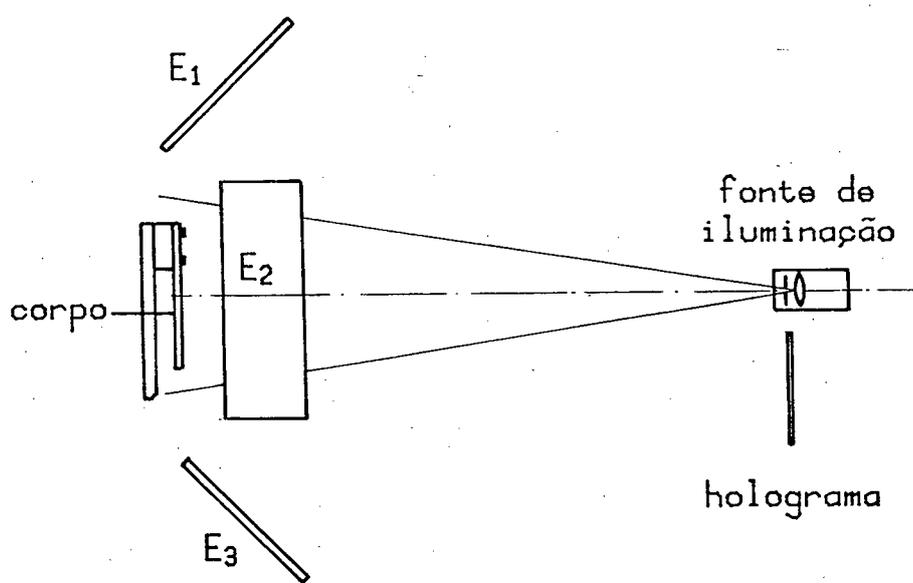


Fig 6.3 - Sistema de coordenadas adotado



E_1 e E_3 = espelhos laterais
 E_2 = espelho superior

Fig 6.4 - Disposição dos espelhos e ângulo de iluminação

A região estudada corresponde à região hachuriada da figura 6.1. A malha adotada para o levantamento do campo de deslocamentos consta de 19 nós na direção X e 3 nós na direção Y, como mostra a figura 6.5. O ponto de medição corresponde ao nó $X = 3$, $Y = 0$.

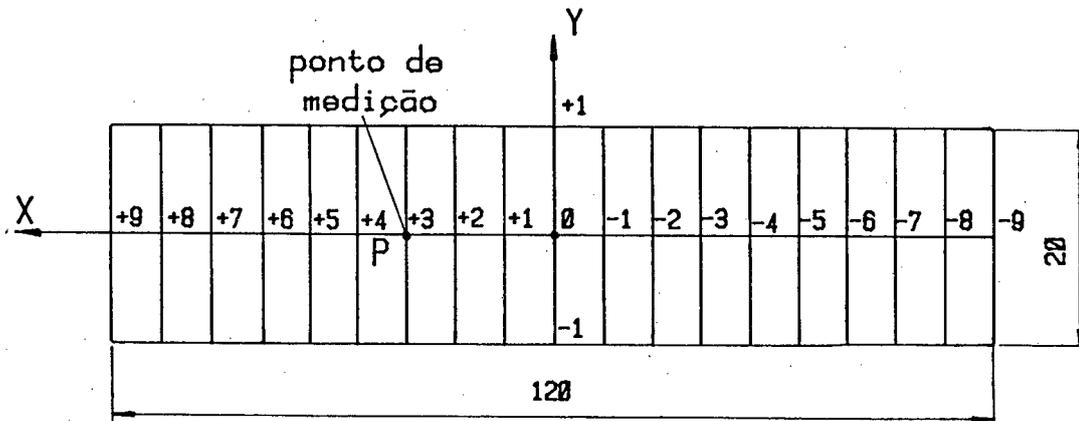


Fig 6.5 - Malha de discretização

6.1.3 - Medição do Deslocamento com Recursos Convencionais

Foi empregado um medidor de deslocamento de apalpador transversal [47], o qual apresenta a conveniência da medição direta do deslocamento do ponto desejado praticamente sem redução do campo de observação, ou seja, somente uma pequena parte da haste de medição encobre a superfície da peça (fig. 6.6).

O medidor com apalpador transversal, embora fisicamente adequado para o tipo de medição efetuada, não apresenta características metrológicas tão boas quanto um medidor com apalpador longitudinal. Para reduzir os erros dos resultados obtidos com o primeiro foi levantada "in loco" a curva de calibração deste instrumento. Como padrão foi usado um medidor digital de deslocamento com resolução de $0,1 \mu\text{m}$ [48].

Ambos apalpadores foram posicionados em pontos muito próximos, de mesma abscissa X, no corpo de prova e correlacionados na faixa de 0 a $6 \mu\text{m}$ através do deslocamento gradual do parafuso micrométrico.

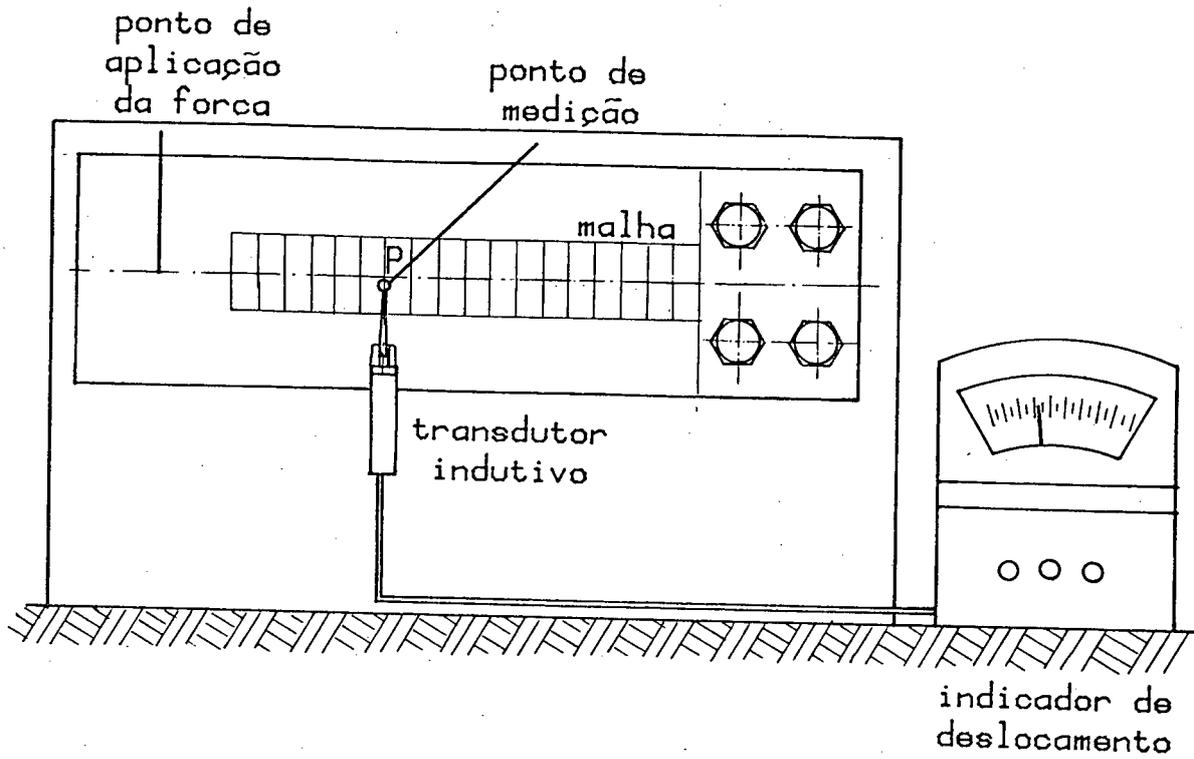


Fig 6.6 - Medição do deslocamento com medidor de apalpador transversal.

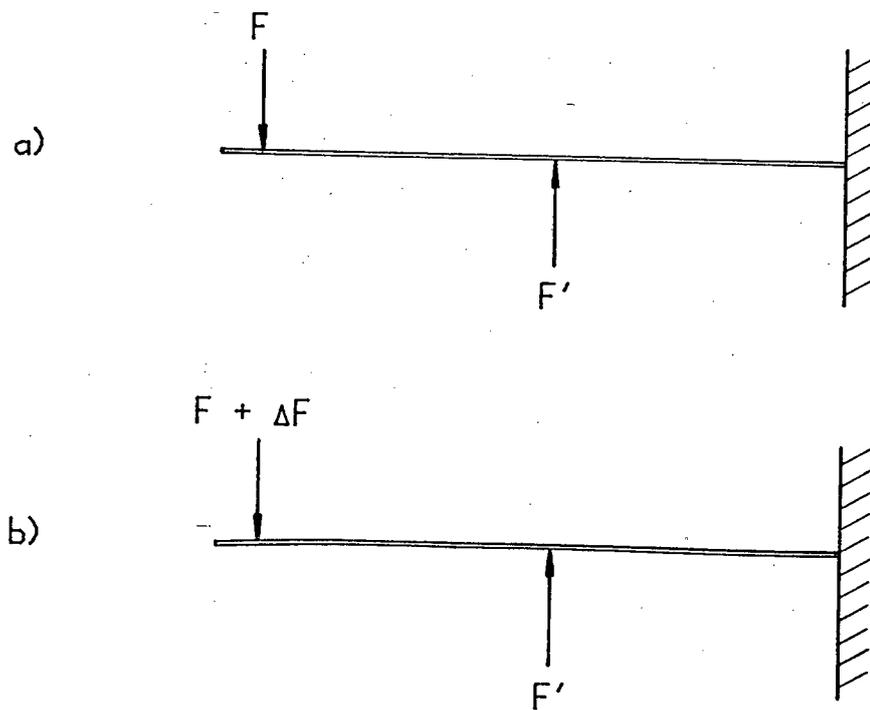


Fig 6.7 - Influência da força de medição

A força de medição do apalpador transversal não causa distorção no deslocamento imposto pela força externa F . Para demonstrar a validade desta afirmação basta recorrer ao princípio da superposição que tem validade na fase elástica. A figura 6.7.a mostra as forças presentes na viga no primeiro estado. Na figura 6.7.b as forças correspondem ao segundo estado de deformação.

A força de medição (F') pode ser considerada constante dentro da faixa de deslocamento de 0 a 6 $|\mu\text{m}|$ na ponta da haste do apalpador. [47] Seja $d(Q)$ a função que descreve o campo de deflexão gerado por uma força Q . Como vale o princípio da superposição, no primeiro estado tem-se:

$$d_I = d(F) + d(F')$$

no segundo estado:

$$d_{II} = d(F + \Delta F) + d(F')$$

$$d_{II} = d(F) + d(\Delta F) + d(F')$$

a diferença será:

$$d_{II} - d_I = d(F) + d(\Delta F) + d(F') - [d(F) + d(F')]$$

$$d_{II} - d_I = d(\Delta F)$$

Logo, fica demonstrado que, dentro da fase elástica, o campo de deslocamento não é influenciado pela força de medição (F'), desde que seja constante, nem pelo valor da força inicial (F).

6.1.4 - Resultados Experimentais

Para verificar a repetibilidade e realizar comparações foram digitalizados 10 mapas de franjas correspondendo a 10 diferentes pontos de observação. Três destes diretamente, segundo diferentes pontos no holograma, dois via espelho lateral esquerdo, dois pelo espelho superior e três pelo espelho lateral direito.

O deslocamento relativo medido pelo apalpador transversal entre os estados de deformação inicial e final foi de

$$\delta = 4.43 \pm 0.14 \text{ } |\mu\text{m}|$$

Apesar de utilizar o medidor disponível mais apropriado operacionalmente, este resultado não é satisfatório para uso como referência, pois como será demonstrado, a holografia interferométrica apresenta valores com menor dispersão.

6.1.4.1 - Teste Unidirecional

Para os fins deste teste foi considerado que o deslocamento de cada ponto se deu exclusivamente segundo a direção Z (na direção da força F) o que é compatível com a teoria simplificada de vigas. Segundo esta suposição, os dados obtidos a partir de cada um dos pontos de observação foram processados independentemente pelo método unidirecional. A figura 6.8 mostra a superposição dos gráficos deslocamento versus posição ao longo da linha lateral da malha. Para a coordenada X = 3, considerando todas as curvas chega-se ao valor do deslocamento em P como sendo:

$$\delta = 4,48 \pm 0,13 \text{ } |\mu\text{m}|$$

A dispersão destas curvas justifica-se por erros experimentais originados na etapa de aquisição, e principalmente, na especificação do posicionamento dos componentes (posição do holograma, da fonte de iluminação e ângulos dos espelhos).

Como cada curva é calculada independentemente das demais, os erros assumem um caráter aleatório. A dispersão destes resultados está desta forma associada com a incerteza de medição.

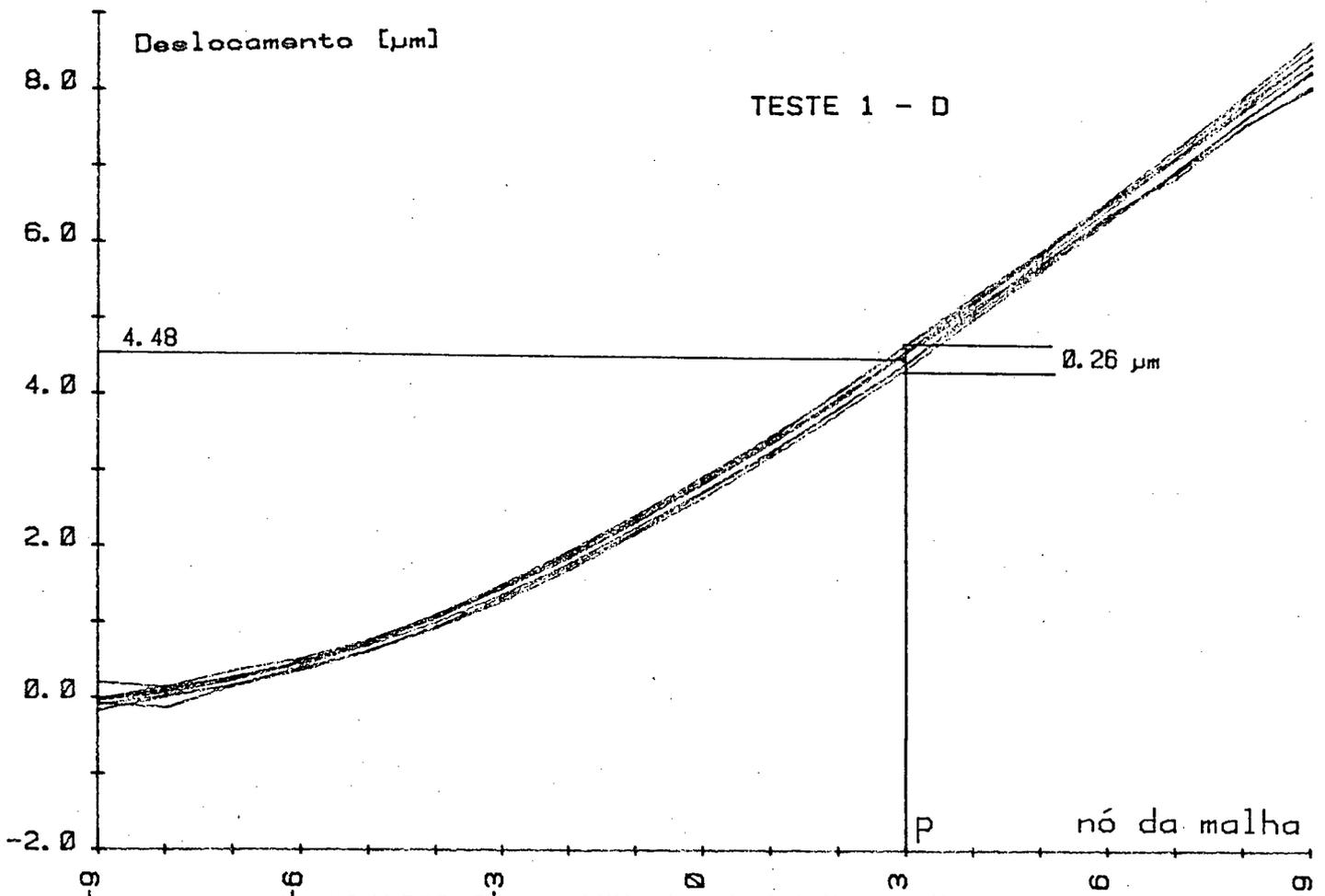


Fig 6.8 - Resultados do teste 1-D

6.1.4.2 - Medição Bidirecional do Deslocamento

Os dados digitalizados e correspondentes aos 10 pontos de observação foram processados segundo o método 2-D, considerando que a componente Y do deslocamento é nula para todos os pontos. (fig. 6.9)

O resultado deste processamento é mostrado na figura 6.9 e na tabela 6.1. No gráfico foram traçadas simultaneamente as três componentes do deslocamento ao longo da malha para cada uma das três linhas da malha paralelas ao eixo X correspondentes a $Y = -1$, $Y = 0$ e $Y = 1$ (fig. 6.5). A digitalização e o processamento para cada uma destas linhas é independente das demais, portanto uma dispersão entre estas refletiria a influência de erros aleatórios, que no caso é bastante pequena. A parcela de deslocamento na direção X será comentada no item 6.1.5.1.

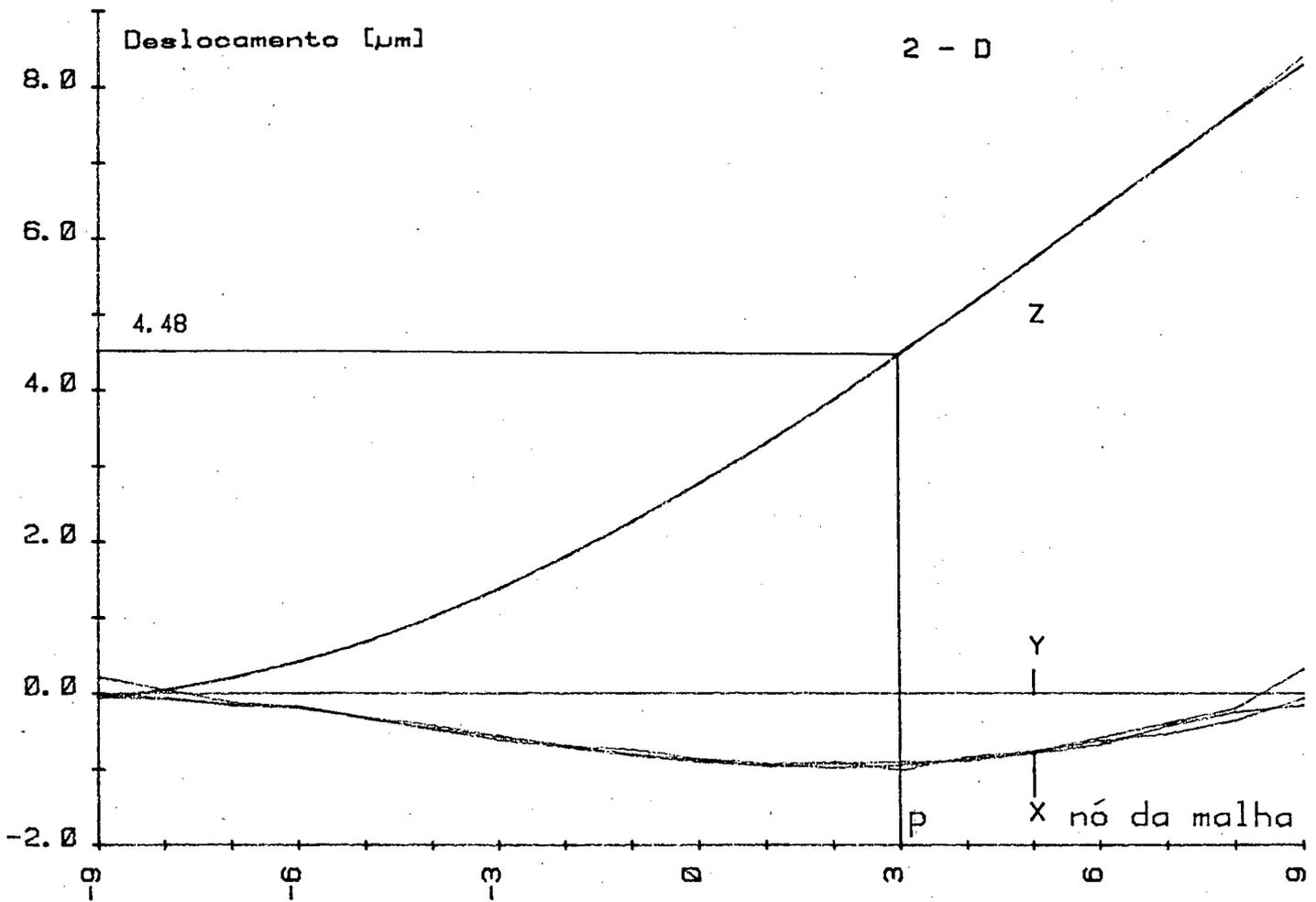


Fig 6.9 - Resultados pelo método 2-D

Tabela 6.1 - Método bidirecional

nó	componente X	componente Y	componente Z
-9	0.01	0.00	0.05
-8	0.06	0.00	-0.05
-7	0.15	0.00	-0.21
-6	0.18	0.00	-0.42
-5	0.33	0.00	-0.63
-4	0.47	0.00	-1.00
-3	0.58	0.00	-1.38
-2	0.69	0.00	-1.80
-1	0.81	0.00	-2.26
0	0.88	0.00	-2.77
1	0.97	0.00	-3.30
2	0.93	0.00	-3.88
3	0.91	0.00	-4.48
4	0.89	0.00	-5.09
5	0.77	0.00	-5.72
6	0.62	0.00	-6.38
7	0.53	0.00	-7.00
8	0.35	0.00	-7.57
9	0.06	0.00	-8.29

A medida do deslocamento no ponto de medição (P) determinado a partir dos dez pontos de observação pelo método 2-D foi:

$$\delta = 4,48 \text{ } |\mu\text{m}|$$

Por tratar-se de uma única medida, não há elementos suficientes pra isoladamente avaliar a incerteza de medição do método 2-D.

6.1.4.3 - Medição Tridirecional do Deslocamento

O resultado do processamento dos dados correspondentes aos 10 pontos de observação pelo método 3-D é mostrado no gráfico da figura 6.10 e na tabela 6.2. No gráfico os resultados referentes às linhas da malha paralelas ao eixo X correspondentes a $Y = -1$, $Y = 0$ e $Y = 1$ são mostradas, enquanto que os dados da tabela se referem a $Y = 0$ somente. A dispersão nas correspondentes curvas do gráfico praticamente inexistente para a componente Z, é inferior a $0,10 \text{ } |\mu\text{m}|$ para a componente X mas apresenta certa dispersão para a componente Y (em torno de $0,30 \text{ } |\mu\text{m}|$). A existência de componentes não identicamente nulas nas direções X e Y será discutida no item 6.1.5.1.

A medida do deslocamento no ponto de medição (P) determinada a partir de 10 pontos de observação pelo método 3-D foi:

$$\delta = 4,48 \text{ } |\mu\text{m}|$$

Mais três processamentos foram realizados pelo método 3-D. No primeiro somente quatro pontos de observação foram considerados: um diretamente e um via cada espelho e o valor encontrado foi:

$$\delta = 4,44 \text{ } |\mu\text{m}|$$

No segundo processamento seis pontos de observação foram considerados (dois diretamente, dois via espelho lateral direito, um via espelho superior e um via espelho lateral esquerdo). O valor encontrado foi:

$$\delta = 4,53 \text{ } |\mu\text{m}|$$

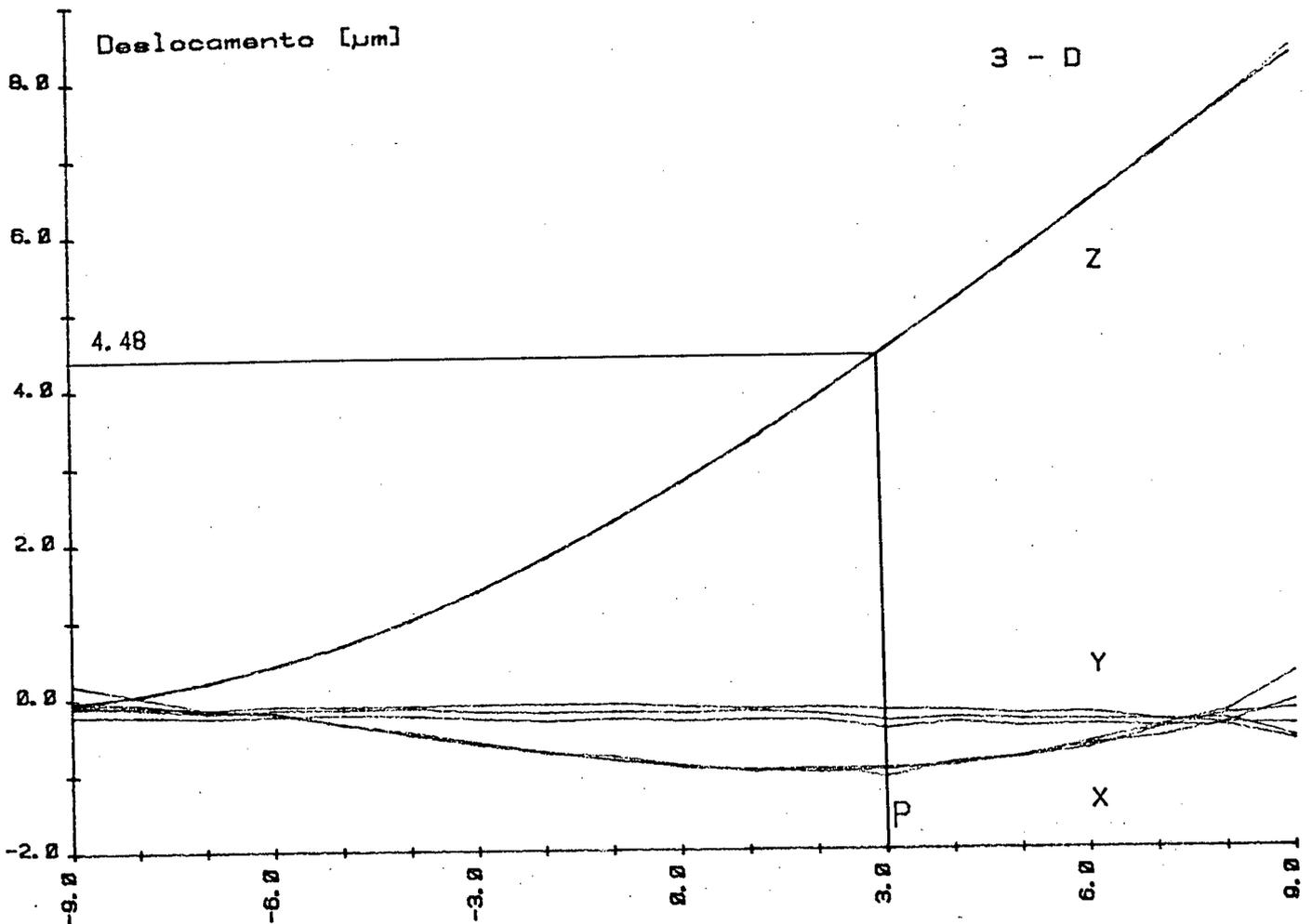


Fig 6.10 - Resultados pelo método 3-D

Tabela 6.2 - Método Tridirecional

no	componente X	componente Y	componente Z
-9	0.02	0.09	0.05
-8	0.08	0.14	-0.05
-7	0.18	0.20	-0.21
-6	0.20	0.16	-0.42
-5	0.35	0.16	-0.68
-4	0.49	0.15	-1.00
-3	0.60	0.19	-1.38
-2	0.72	0.21	-1.80
-1	0.84	0.20	-2.25
0	0.91	0.22	-2.76
1	0.99	0.20	-3.30
2	0.95	0.24	-3.87
3	0.94	0.33	-4.48
4	0.93	0.30	-5.09
5	0.81	0.33	-5.72
6	0.66	0.34	-6.38
7	0.57	0.35	-7.00
8	0.39	0.40	-7.67
9	0.10	0.42	-8.29

O terceiro processamento destinou-se a verificar o comportamento do sistema sem o auxílio dos espelhos planos usados para promover vistas auxiliares. Foram considerados três pontos de observação ao longo do holograma, todos diretamente, sem espelhos. Os resultados são mostrados na tabela 6.3 onde constata-se valores completamente absurdos, principalmente para as componentes X e Y do deslocamento. Estes resultados foram atingidos em função da grande proximidade dos pontos de observação, ocasionando pequena separação angular. Nestas condições, o sistema de equações envolvendo as componentes do deslocamento apresenta equações com coeficientes muito próximos. Nestas condições pequenos erros nos coeficientes levam a grandes erros na solução. Este processamento demonstra a inviabilidade da medição 2-D e/ou 3-D pela holografia interferométrica sem o auxílio de espelhos auxiliares.

Tabela 6.3 - Método Tri direcional sem espelhos

nó	componente X	componente Y	componente Z
-9	-1	0	0.0
-8	-22	28	-2.7
-7	-50	65	-5.6
-6	-77	102	-7.9
-5	-114	161	-10.3
-4	-139	196	-11.0
-3	-164	219	-11.2
-2	-168	227	-9.8
-1	-175	237	-8.5
0	-187	255	-7.1
1	-195	266	-5.5
2	-202	276	-3.7
3	-197	271	-1.8
4	-210	288	0.3
5	-183	252	1.2
6	-173	239	2.3
7	-162	223	3.1
8	-159	218	4.1
9	-97	132	0.0

Finalmente, considerando as medidas obtidas pelo método 3-D para as diferentes combinações a partir de distintos pontos de observação tem-se o resultado:

$$\delta = 4,48 \pm 0,05 \text{ } |\mu\text{m}|$$

6.1.5 - Análise dos Resultados

Do ponto de vista quantitativo, os resultados da medição do deslocamento pela holografia interferométrica automatizada são excelentes. Tanto os resultados do método 2-D quanto os do método 3-D por 4, 6 ou 10 pontos de observação se aproximaram bastante do valor medido pelo apalpador para a componente Z do deslocamento. Todos os resultados caíram dentro das faixas de incerteza estabelecidas pelo apalpador e pelo teste 1-D. Estes resultados permitiram concluir que a precisão da holografia interferométrica automatizada é superior à do apalpador empregado.

6.1.5.1 - Comparação dos Métodos 2-D e 3-D

O gráfico da figura 6.11 mostra a superposição dos resultados obtidos dos métodos 2-D e 3-D. As curvas correspondentes às componentes X e Z apresentam excelente concordância entre os dois métodos. A curva correspondente à componente Y, assumida como nula no método 2-D, apresenta segundo o método 3-D certa tendência de desviar do zero, atingindo o valor máximo na extremidade de de $-0,42 \text{ } \mu\text{m}$.

Teoricamente esperava-se que as componentes X e Y fossem nulas para todos os pontos da malha. Esta condição não foi de fato verificada experimentalmente.

O comportamento da componente Y poderia ser atribuído à imperfeições físicas da montagem (desalinhamentos, empenamentos), o mesmo não ocorrendo com o da componente X. Entretanto, a curva da componente X apresenta excelente concordância entre os resultados dos métodos 2-D e 3-D (fig. 6.11). A forma da curva da componente X (deslocamento axial) não pôde ser explicada dentro da elasticidade, sendo portanto atribuída a erros sistemáticos, originados provavelmente por erros de especificação dos parâmetros de posicionamento dos componentes ópticos da montagem holográfica, ou, mais provavelmente, erros oriundos da distorção causada pelos espelhos planos auxiliares utilizados, que são de qualidade duvidosa. A sensibilidade da componente X a estes erros foi muito maior que as demais, sendo portanto provável que o erro fosse referente à posição dos espelhos laterais.

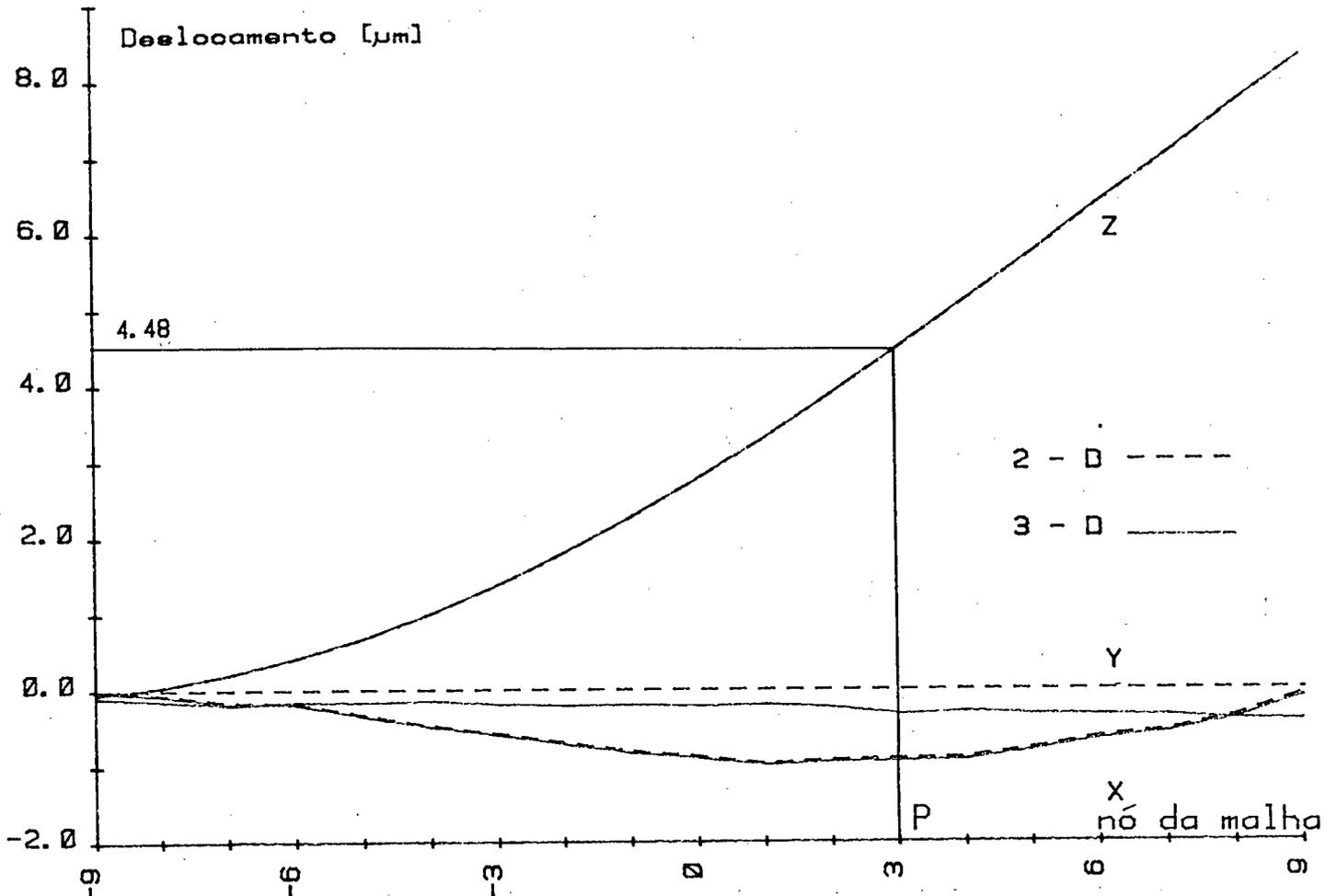


Fig 6.11 - Comparação dos resultados dos métodos 2-D e 3-D

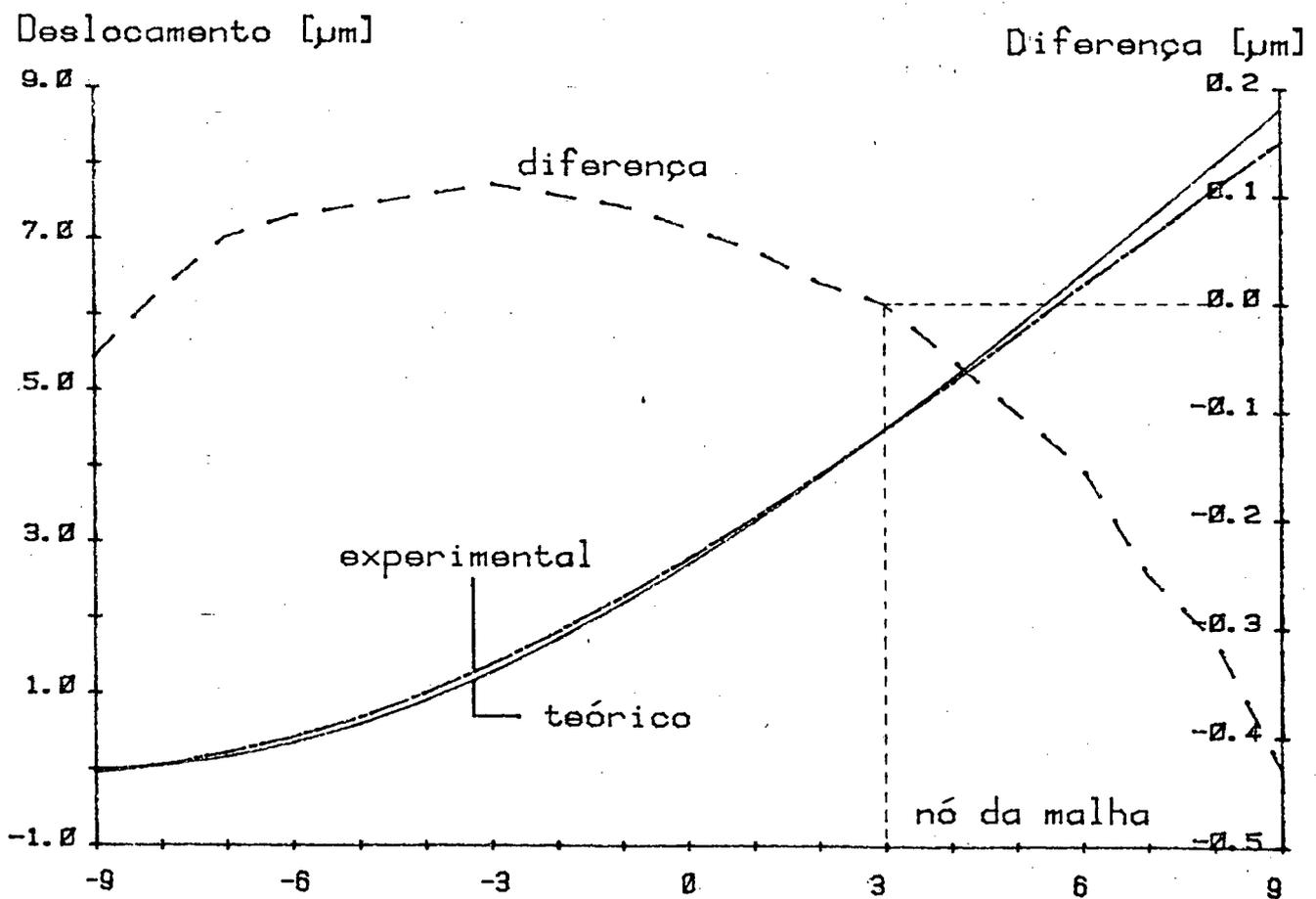


Fig 6.12 - Comparação teórico x experimental

Um aprofundamento no estudo das fontes de erro e seu equacionamento fogem ao escopo do presente trabalho devendo ser um dos aspectos primeiros a se estudar na continuação do desenvolvimento do sistema.

6.1.5.2 - Comparação Teórico-experimental dos Resultados

Aplicando a teoria de vigas no problema estudado chega-se a uma equação para a componente Z do deslocamento ao longo da superfície da peça dada por |46|,

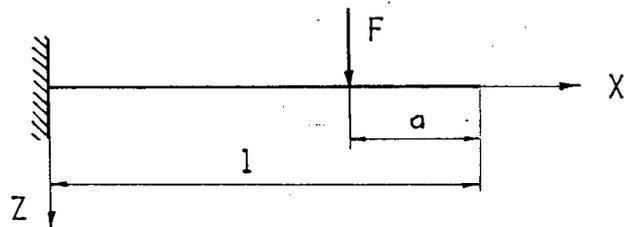
$$Z = \frac{-F}{6 EI} (2 l^3 - 3 l^2 a + a^3) + \frac{F}{2EI} (l - a)^2 x - \frac{F}{6EI} (x - a)^3$$

que aplicada às condições do problema resulta:

$$Z = k [1,74 * 10^7 + 5,88 * 10^4 X - (X - 40,0)^3]$$

onde:

$$k = \frac{-F}{6 EI}$$



Foi atribuído à constante K um valor tal que o deslocamento teórico correspondente ao ponto medido iguale-se ao experimental. Este procedimento é justificado para avaliar o desempenho do sistema ao longo da malha completa. Outro fator que exige tal procedimento, relaciona-se ao fato de que o módulo de elasticidade e da força não são conhecidos com uma precisão suficiente.

O gráfico da figura 6.12 mostra a superposição das curvas teórica e experimental para a componente Z do deslocamento. A curva de erros também é mostrada. A análise do gráfico mostra claramente a existência de um erro sistemático entre a curva teórica e a experimental, o que é evidenciado pela forma da curva de erro. Este erro é aqui atribuído às simplificações da teoria de vigas. Como as dimensões do corpo aproximam-se mais das típicas

de uma placa é razoável esperar que o comportamento experimental seja diferente do comportamento teórico de uma viga. A teoria de placas prediz que estas quando submetidas à flexão apresentam maior rigidez que as vigas [46]. Esta afirmação pode ser comprovada pela análise da forma das curvas do gráfico.

Em síntese, este experimento levou a resultados quantitativos excelentes. Qualitativamente o comportamento da componente Z medido foi muito bom, apresentando uma boa concordância com a formulação teórica.

6.2 - MOVIMENTOS ESPECIAIS DE UM CORPO

Neste experimento uma placa foi submetida a um deslocamento de corpo rígido composto de translação e rotação em torno de um determinado eixo. Através da utilização de transdutores de deslocamento cada parcela do movimento foi devidamente quantificada e o campo de deslocamento equacionado. A comparação com os resultados obtidos pela holografia interferométrica automatizada atestam o bom desempenho qualitativo e quantitativo desta técnica.

6.2.1 - Montagem do Experimento

A figura 6.13 ilustra a montagem utilizada. Em uma base rigidamente fixada a um banco óptico foi montada uma mesa de avanço micrométrico, capaz de transladar ao longo do eixo X, e sobre esta uma mesa com capacidade de realizar uma rotação em torno do eixo vertical definido pela posição do centro de uma esfera (fig. 6.13). Sobre a segunda mesa foi colada uma placa de alumínio de 80 x 58 x 2 mm que constituiu a região estudada. O centro da placa foi tomado como origem do sistema de coordenadas.

A montagem acima descrita possui dois graus de liberdade: translação na direção X e rotação em torno de um eixo vertical. Para quantificar o campo de deslocamento imposto foram usados dois medidores digitais de deslocamento com resolução de 0.1 μm [48].

Devido a considerável parcela de deslocamento esperado na direção X, a superfície da placa foi iluminada obliquamente, com um ângulo de aproximadamente 30° , como forma de obter uma ori

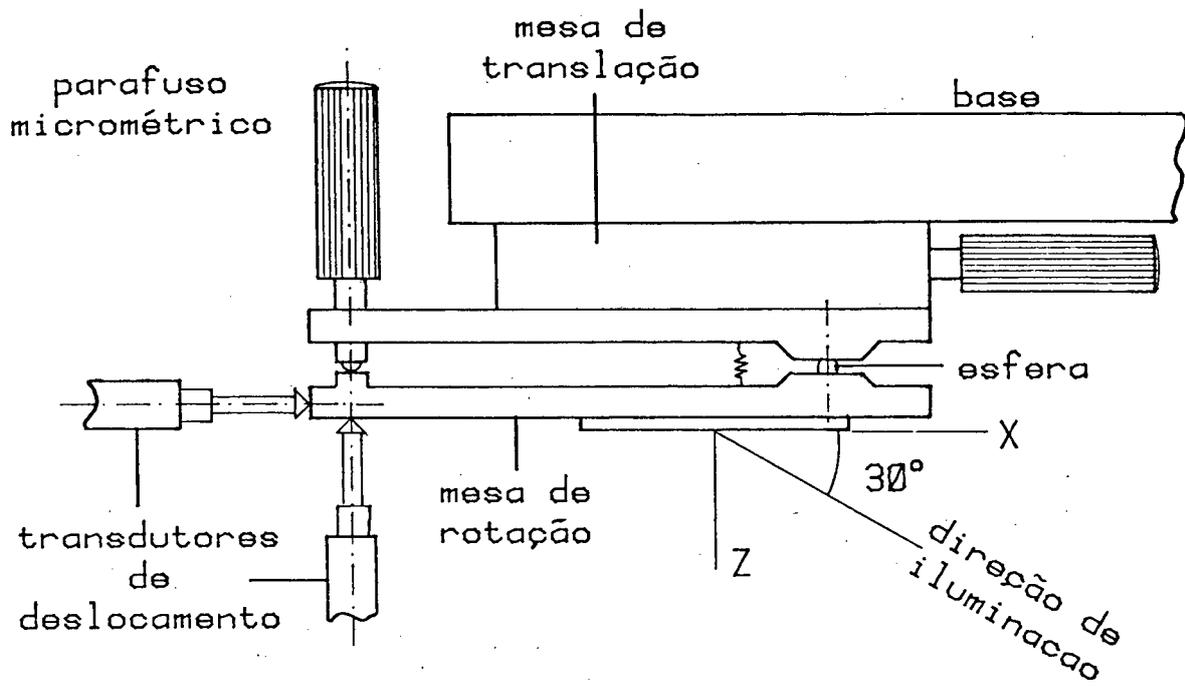
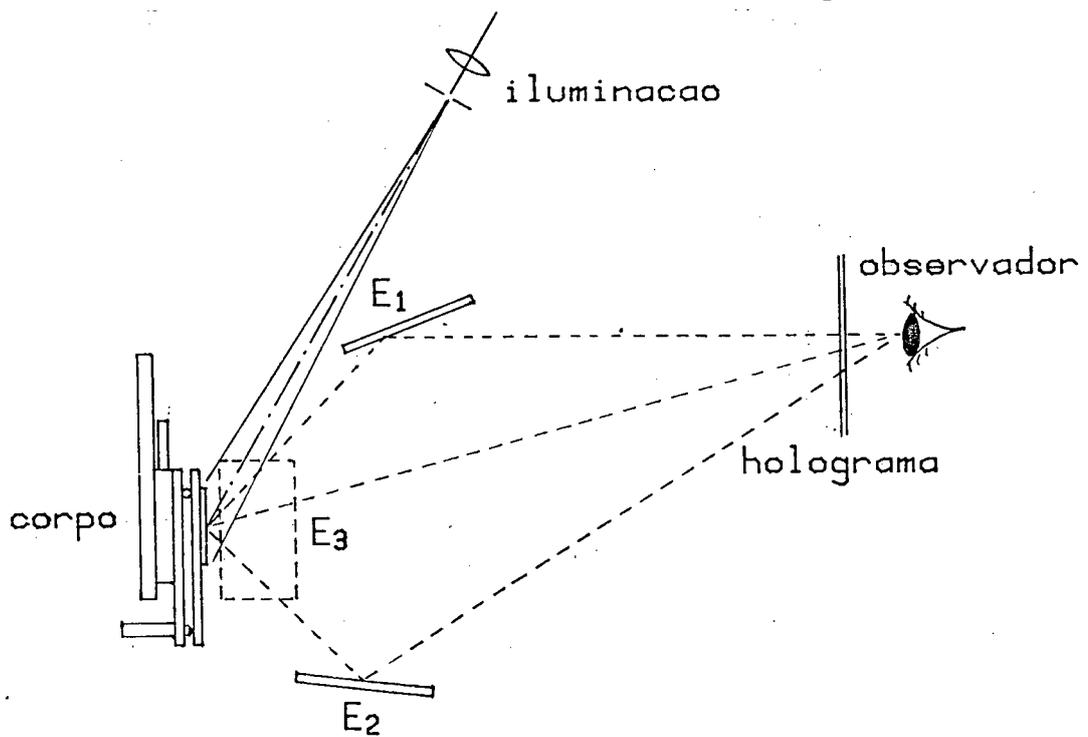


Fig 6.13 - Montagem experimental - vista superior



E_1 e E_2 = espelhor planos laterais

E_3 = espelho plano inferior

Fig 6.14 - Disposição dos componentes ópticos - vista superior

entação do vetor sensibilidade favorável. Foram utilizados três espelhos auxiliares: dois espelhos promovendo vistas laterais e um para obter vista inferior. (fig. 6.14).

6.2.2 - Campo de Deslocamento Teórico

Conhecida a natureza do deslocamento imprimido ao corpo é possível calcular as componentes do deslocamento em qualquer ponto da superfície da placa estudada. Considere a figura 6.15, onde a mesa de rotação é mostrada esquematicamente.

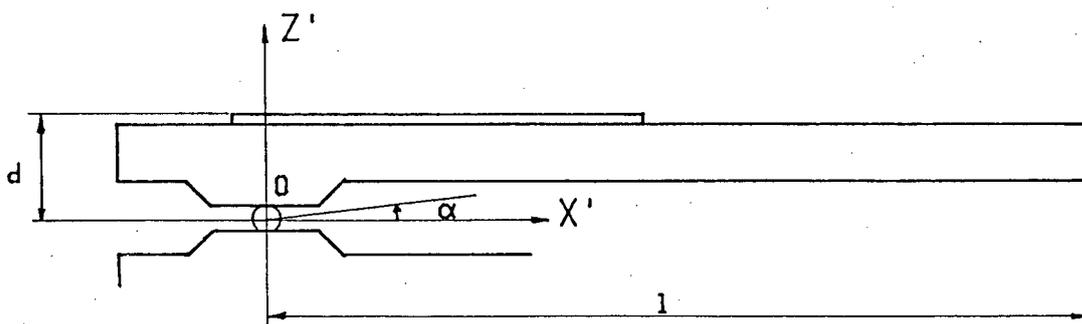


Fig 6.15 - Rotação da mesa em torno do ponto O

A rotação da parte móvel em torno do ponto O pode ser descrita pela matriz:

$$[G] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\text{sen } \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

que aplicada num ponto P:

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

resulta

$$\vec{P}' = [G] \vec{P}$$

que representa as novas coordenadas do ponto P quando a mesa sofre um giro de α . O campo de deslocamento é calculado por:

$$\vec{\Delta} = \vec{P}' - \vec{P} = [G] \vec{P} - \vec{P} \quad (6.3)$$

Aplicando a equação 6.3 ao plano $Z = \alpha$ e efetuando as simplificações, resulta:

$$\vec{\Delta} = \begin{bmatrix} x (\cos \alpha - 1) - d \operatorname{sen} \alpha \\ 0 \\ x \operatorname{sen} \alpha + d (\cos \alpha - 1) \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

A equação 6.4 descreve o campo de deslocamento do plano da placa, em função da coordenada X, quando um giro de α é imposto à mesa de rotação.

O movimento imposto pela mesa de translação corresponde a um deslocamento constante na direção X em todos os pontos.

O campo de deslocamento gerado quando um giro de α é imposto à mesa de rotação e uma translação de t é imposta pela mesa de translação, é dado por:

$$\vec{\Delta} = \begin{bmatrix} x (\cos \alpha - 1) - d \operatorname{sen} \alpha + t \\ 0 \\ x \operatorname{sen} \alpha + d (\cos \alpha - 1) \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Uma tira de material elástico homogêneo foi colada entre uma extremidade da placa e um referencial fixo (fig. 6.16) como forma de proporcionar a determinação da OF absoluta na superfície da placa, uma vez que não há nenhuma região fixa na superfície estudada [34].

A superfície da placa recebeu uma camada de revestimento branco fosco, permitindo que a reconstrução por cada espelho apresente uniformidade na intensidade e bom contraste das franjas. [34]

No momento de posicionar as mesas para a primeira exposição, ambas foram movidas segundo o sentido convencional como crescente. Após a primeira exposição as mesas foram novamente movidas, sempre no sentido crescente, para a posição final. Este procedimento visou minimizar a histerese das mesas utilizadas.

6.2.3 - Resultados Experimentais

Após a primeira exposição a mesa de translação foi deslocada inicialmente e a seguir a mesa de rotação. Os deslocamentos finais medidos foram:

$$\Delta X = 4,8 \text{ } |\mu\text{m}|$$

$$\Delta Z = 6,6 \text{ } |\mu\text{m}|$$

Com estes dados, o valor do ângulo α foi calculado analiticamente como sendo:

$$\alpha = 0,0032^\circ$$

e a componente da translação na direção X como sendo:

$$t = 4,1 \text{ } |\mu\text{m}|$$

A figura 6.17 mostra o resultado do teste 1-D [44]. Neste teste, a direção do deslocamento foi assumida como a mesma do campo de deslocamento descrito pela equação 6.5. A análise deste gráfico revela pequena dispersão da componente Z entre cada uma

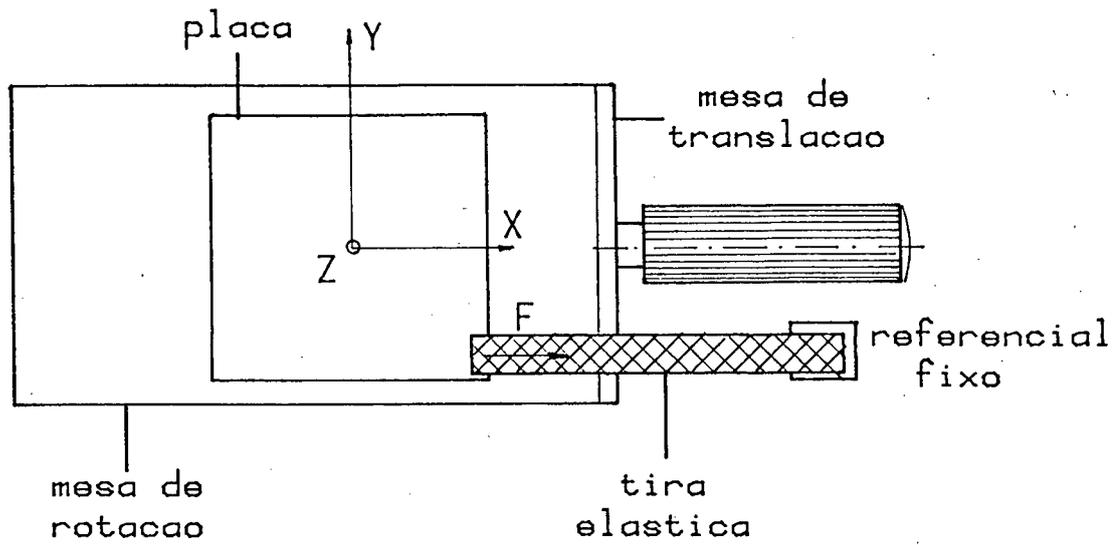


Fig 6.16 - Força excêntrica

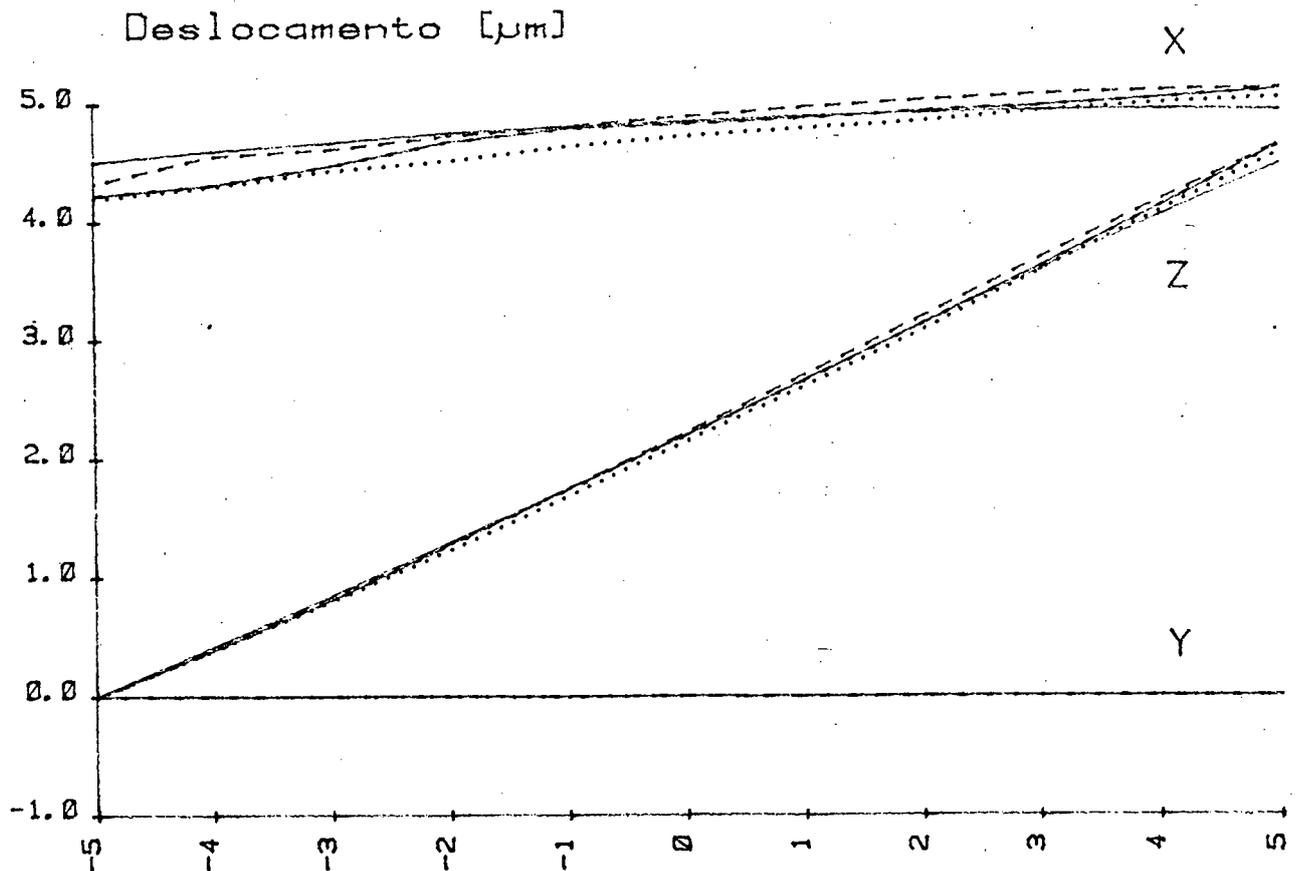


Fig 6.17 - Resultados do teste 1-D

das quatro vistas consideradas. Entretanto, a componente X variou um pouco, apresentando uma dispersão mais acentuada na parte esquerda do gráfico, onde a faixa de dispersão atingiu um valor máximo de cerca de $0.3 \text{ } |\mu\text{m}|$.

O gráfico da figura 6.18 mostra as três componentes do deslocamento ao longo da linha $Y = 0$ da malha. Em linha cheia estão representados os resultados experimentais enquanto que por linha tracejada o campo de deslocamento descrito pela equação 6.5. A comparação dos resultados experimentais com os descritos pela equação 6.5 atesta a mesma tendência, principalmente para as componentes Y e Z. A diferença máxima entre os dois não atinge $0.3 \text{ } |\mu\text{m}|$ na componente X. A análise do gráfico atesta a existência de um erro sistemático, principalmente para a componente X, como será analisado em detalhes no item 6.2.4.

A figura 6.19 mostra uma vista oblíqua em perspectiva da posição final da placa. Em linha tracejada está representada a posição prevista pela equação 6.5 supondo deslocamentos ideais. Em linha cheia são representados os resultados experimentais.

A figura 6.20 representa uma vista frontal da placa. Esta figura é conveniente para uma análise das componentes do deslocamento no plano XY. Existe um erro sistemático entre os valores experimentais e teóricos. A diferença na componente Y cresce no sentido positivo do eixo Y. A componente X medida difere da teórica à medida que afasta-se da origem ao longo do eixo X.

Os valores das componentes do deslocamento em cada ponto da malha são mostrados na tabela 6.4. Estes dados estão apresentados em grupamentos de três linhas, correspondendo às componentes nas direções X, Y e Z respectivamente, em μm .

A figura 6.21 apresenta as curvas de deslocamento na direção Z constante (curvas de nível). A forma e a posição das curvas de nível qualificam e quantificam o campo de deslocamentos na direção Z. É patente a uniformidade e a coerência deste resultado parcial, como aliás, pode também ser concluído pela figura 6.17. O relativo paralelismo e a uniformidade do espaçamento indicam a forma plana da posição final da placa e a orientação do eixo de giro.

As curvas de deslocamento na direção X constante são mos

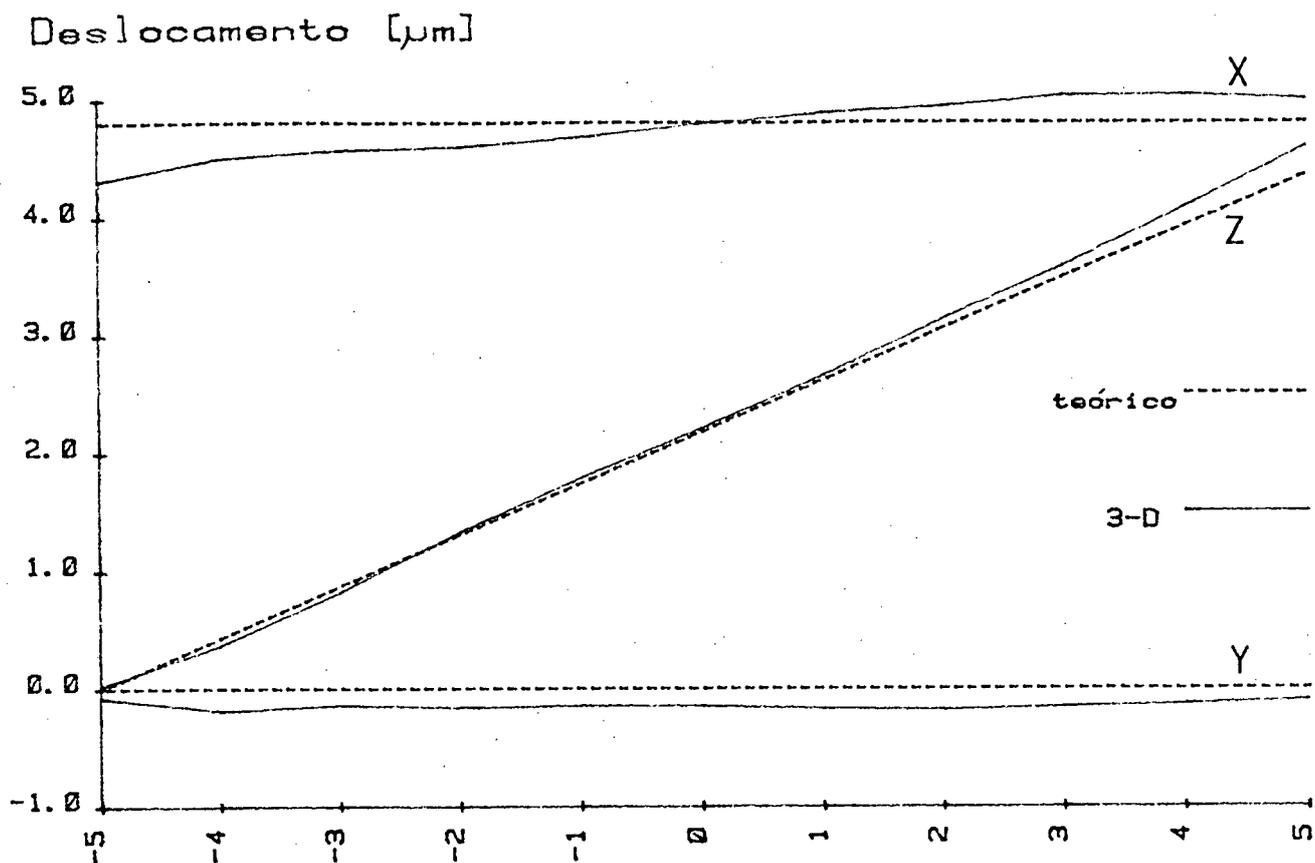


Fig 6.18 - Comparação teórico x 3-D

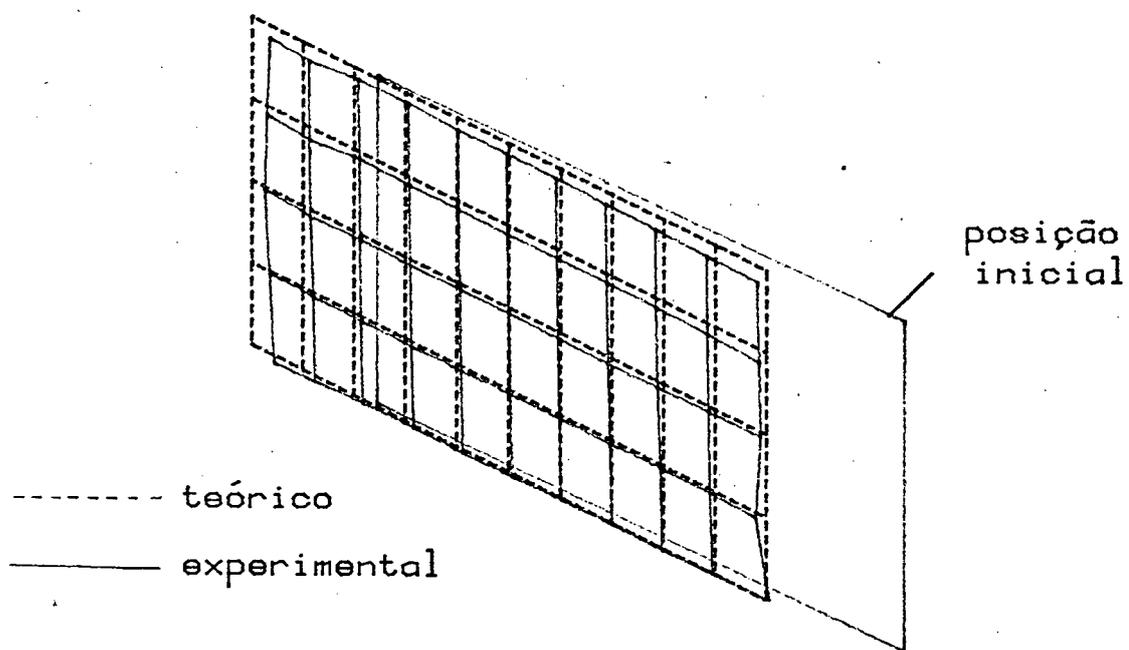


Fig 6.19 - Comparação teórico x 3-D

Tabela 6.4 - Componentes do deslocamento

	Y=-2	Y=-1	Y=0	Y=1	Y=2
X= -5	-4.10 0.31 -0.20	-4.22 0.21 -0.12	-4.31 0.08 -0.03	-4.09 0.06 -0.11	-3.89 0.17 -0.31
X= -4	-4.58 0.40 -0.37	-4.55 0.32 -0.37	-4.50 0.19 -0.37	-4.38 0.12 -0.41	-4.31 0.15 -0.43
X= -3	-4.67 0.26 -0.79	-4.60 0.18 -0.83	-4.57 0.14 -0.82	-4.52 0.12 -0.83	-4.46 0.10 -0.82
X= -2	-4.69 0.23 -1.31	-4.64 0.21 -1.33	-4.60 0.16 -1.33	-4.55 0.12 -1.33	-4.46 0.07 -1.37
X= -1	-4.77 0.28 -1.78	-4.75 0.21 -1.78	-4.68 0.14 -1.79	-4.63 0.11 -1.80	-4.55 0.09 -1.81
X= 0	-4.89 0.27 -2.21	-4.84 0.23 -2.21	-4.79 0.15 -2.21	-4.73 0.10 -2.23	-4.65 0.07 -2.25
X= 1	-5.00 0.29 -2.63	-4.93 0.23 -2.65	-4.88 0.17 -2.66	-4.83 0.09 -2.65	-4.75 0.05 -2.68
X= 2	-5.04 0.31 -3.11	-5.00 0.21 -3.12	-4.93 0.18 -3.13	-4.85 0.10 -3.16	-4.75 0.03 -3.19
X= 3	-5.12 0.33 -3.56	-5.09 0.22 -3.56	-5.03 0.15 -3.58	-4.90 0.07 -3.61	-4.83 0.04 -3.64
X= 4	-5.13 0.37 -4.06	-5.10 0.26 -4.06	-5.04 0.13 -4.08	-4.97 0.08 -4.09	-4.87 0.01 -4.12
X= 5	-5.14 0.39 -4.54	-5.06 0.33 -4.58	-5.00 0.10 -4.60	-5.18 0.13 -4.49	-4.63 -0.07 -4.85

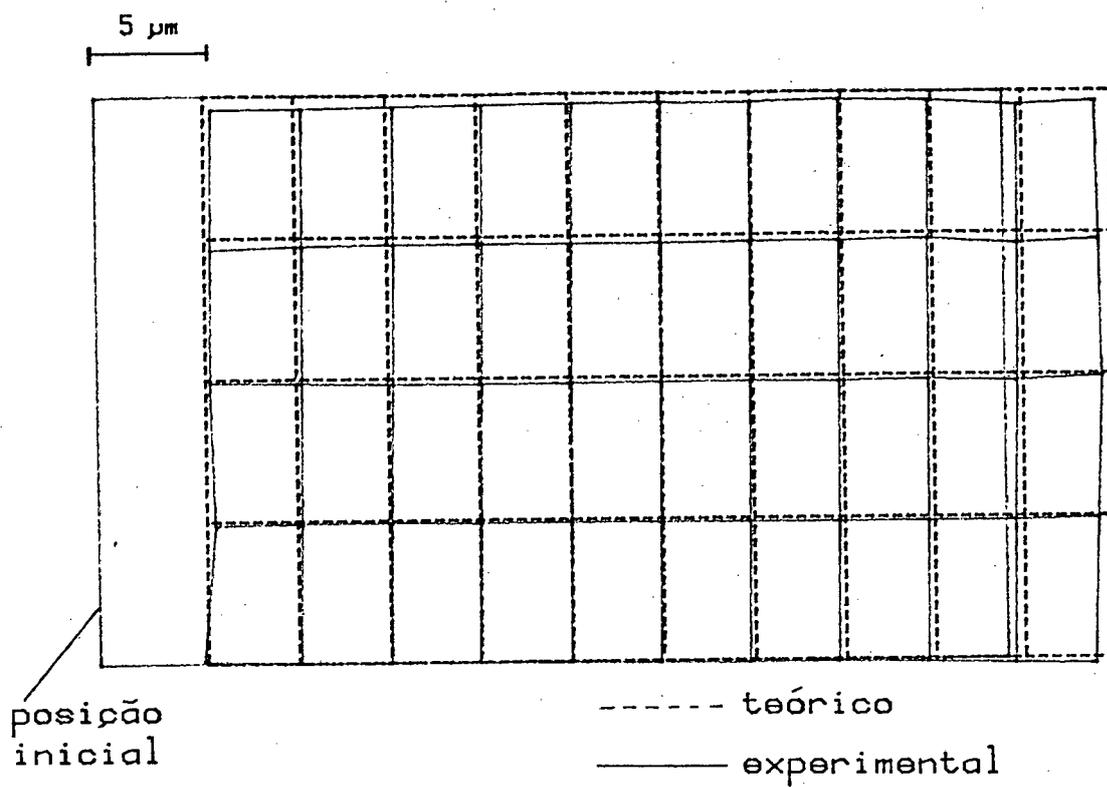


Fig 6.20 - Comparação teórico x 3-D

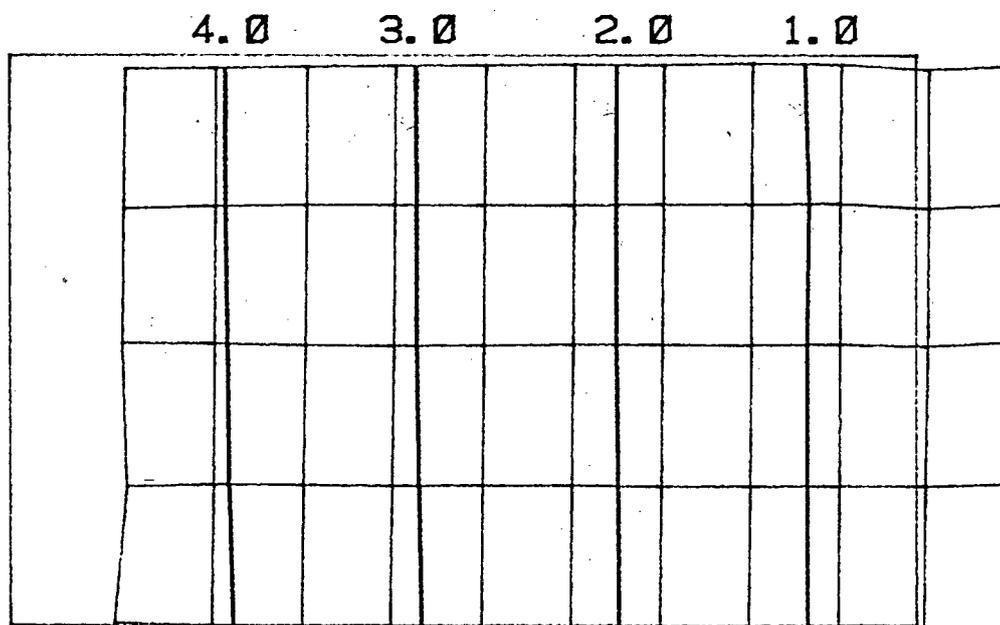


Fig 6.21 - Curvas de nível: Z constante

tradas na figura 6.22. A forma destas curvas indicam alguma irregularidade no campo de deslocamento nesta direção. Teoricamente, espera-se um deslocamento quase constante em toda a superfície da placa, entretanto há uma diferença máxima de $1,2 \text{ } \mu\text{m}$. Os fatores que levaram a estes resultados são descritos no próximo item.

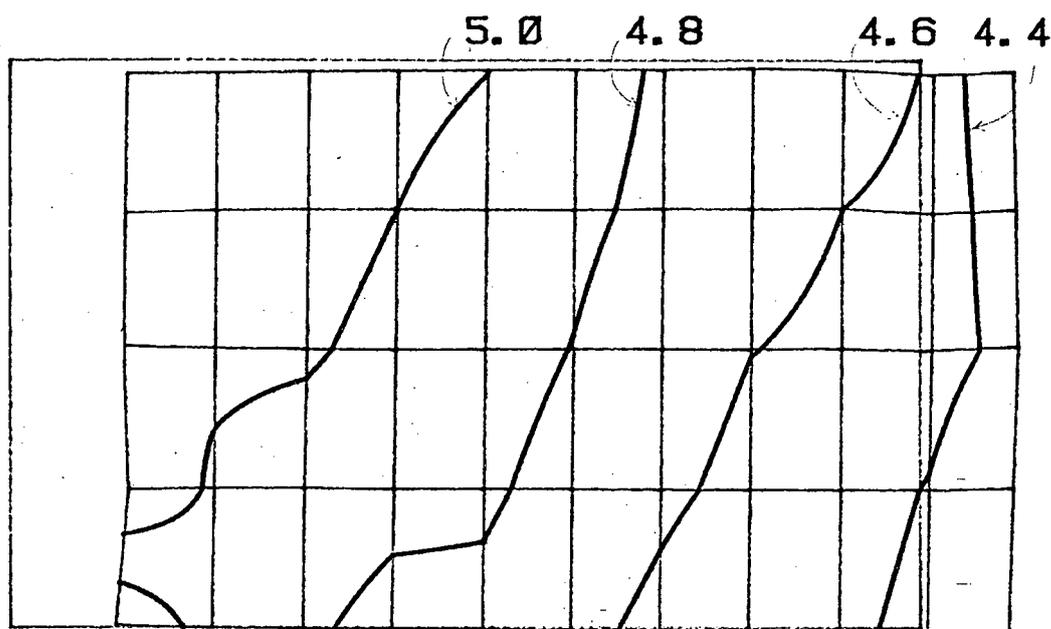


Fig 6.22 - Curvas de nível: X constante

6.2.4 - Análise do Desempenho

Inicialmente, alguns fatores podem ser apontados como causadores das distorções nos resultados apresentados. A existência de erros nas trajetórias das mesas de rotação e translação, que foram consideradas ideais para a formulação da equação 6.5. Erros na determinação dos parâmetros dos espelhos e da disposição dos componentes ópticos na mesa. Erros inerentes ao processo de digitalização automática do padrão de franjas. Erros nos deslocamentos

mentos medidos pelos apalpadores.

Como uma tira de material elástico foi colada entre a superfície da placa e um referencial fixo, esta exerceu uma força excêntrica sobre as mesas de translação e rotação. Este procedimento pode ter imposto sobre as trajetórias das mesas erros adicionais. (fig. 6.16)

Os desvios das trajetórias das mesas, em relação às ideais, juntamente com a existência da força excêntrica, justificam a existência de uma pequena componente Y praticamente constante ao longo das linhas $Y = \text{cte.}$ e uma pequena inclinação nas curvas de nível Z constante. A diferença na componente X pode ter sido também influenciada pela força excêntrica.

Comportamentos semelhantes são observados entre cada uma das curvas da componente X no teste 1-D (fig. 6.17), confirmando a ocorrência de um deslocamento diferente do descrito pela equação 6.5, uma vez que cada uma das quatro linhas se origina de discretizações totalmente independentes.

A influência dos erros na quantificação dos parâmetros dos espelhos (inclinação, alinhamento e posicionamento) e dos principais componentes ópticos (fonte de iluminação e pontos de observação) certamente contribuem para a existência de um erro sistemático como o caracterizado neste caso.

O teste 1-D (fig. 6.17) não revela diferença de comportamento relativa entre as quatro vistas. Uma vista foi discretizada diretamente, sem espelhos, e as demais, uma por cada espelho. Erros nos valores dos parâmetros de um espelho levariam a uma diferença significativa de comportamento da curva correspondente em relação às demais, o que não foi observado. Portanto o resultado do teste 1-D permite descartar a possibilidade de erro significativo na quantificação dos parâmetros dos espelhos, entretanto não descarta a possibilidade de erros na determinação da posição do ponto de observação e da fonte de iluminação.

Os erros inerentes ao processo de digitalização automática são de influência bastante pequena, conforme ensaios auxiliares demonstraram: a mesma imagem foi digitalizada duas vezes independentemente e os dados obtidos foram comparados. A diferença absoluta das OF nos dois casos não foi superior a 0.3, o que, no

caso, corresponde aproximadamente a um erro de $0,09 \text{ } |\mu\text{m}|$ no deslocamento.

Com base na repetibilidade das medições do deslocamento e nas características metrológicas dos medidores digitais de deslocamento [48] pode-se afirmar que o erro na medição dos deslocamentos não foi superior a $0,1 \text{ } |\mu\text{m}|$.

Das prováveis fontes de erro citadas acima, a fidelidade da trajetória real das mesas em relação à ideal, e os erros dos parâmetros de posicionamento da fonte de iluminação e/ou do ponto de observação, são consideradas precípuas.

Entretanto os resultados experimentais não diferiram significativamente do descrito pela equação 6.5. A diferença entre estes resultados não chegou a $0,5 \text{ } \mu\text{m}$ na componente X, não passou de $0,4 \text{ } \mu\text{m}$ na componente Y e teve um valor máximo na componente Z inferior a $0,3 \text{ } \mu\text{m}$. As diferenças constatadas encontram-se na ordem de grandeza dos erros geométricos provocados pela própria rugosidade superficial das guias das mesas micrométricas. Para servir de padrão, dever-se-ia ter um dispositivo que garantisse erros inferiores a $0,02 \text{ } \mu\text{m}$, o que não foi possível obter no espaço de tempo disponível.

7 - APLICAÇÕES GERAIS DO SISTEMA

Neste capítulo são apresentadas algumas aplicações da holografia interferométrica automatizada. Os exemplos aqui apresentados ilustram a versatilidade e a elevada resolução da técnica desenvolvida na determinação de deformações de diferentes corpos, três em condições estáticas e um em dinâmicas. Nos exemplos estáticos foram estudados campos de deformação de origem mecânica. Na aplicação dinâmica foram levantadas a forma e a amplitude de um dos modos de vibração de uma viga excitada por uma força variável senoidalmente.

O caráter dos exemplos apresentados neste capítulo é apenas ilustrativo, não visando comparações quantitativas com outras técnicas.

7.1 - FLEXÃO DE UMA VIGA ENGASTADA

O problema estudado é semelhante ao mostrado no item 6.1, diferindo no tocante às dimensões típicas e ao material (aço). Consiste de uma viga engastada em uma extremidade sujeita a uma força F na extremidade livre, como é visto na figura 7.1, onde também aparece a malha de discretização utilizada.

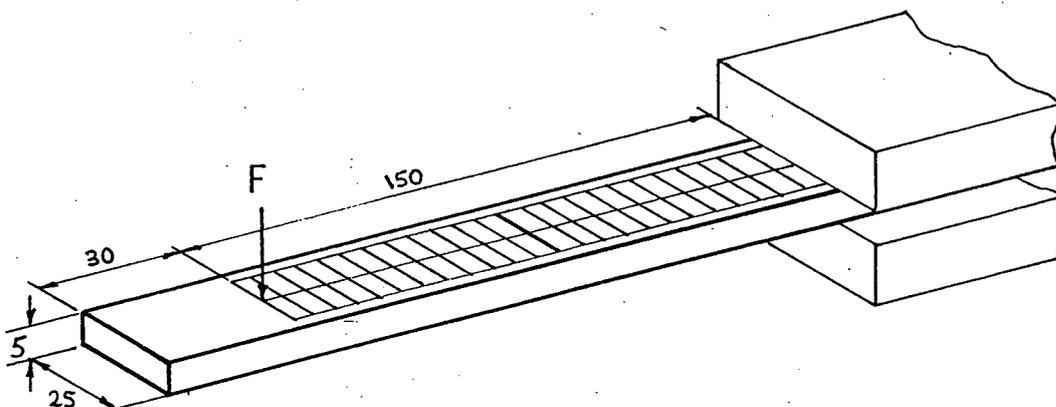


Fig 7.1 - Corpo de prova utilizado

A figura 7.2 mostra uma vista em perspectiva do campo de deslocamentos determinado pela holografia interferométrica automatizada. Estão representadas as curvas de nível do deslocamento na direção normal à superfície da viga. Esta forma de representação gráfica proporciona uma idéia espacial da forma do campo de deslocamento ao mesmo tempo que o caracteriza quantitativamente por meio das curvas de nível.

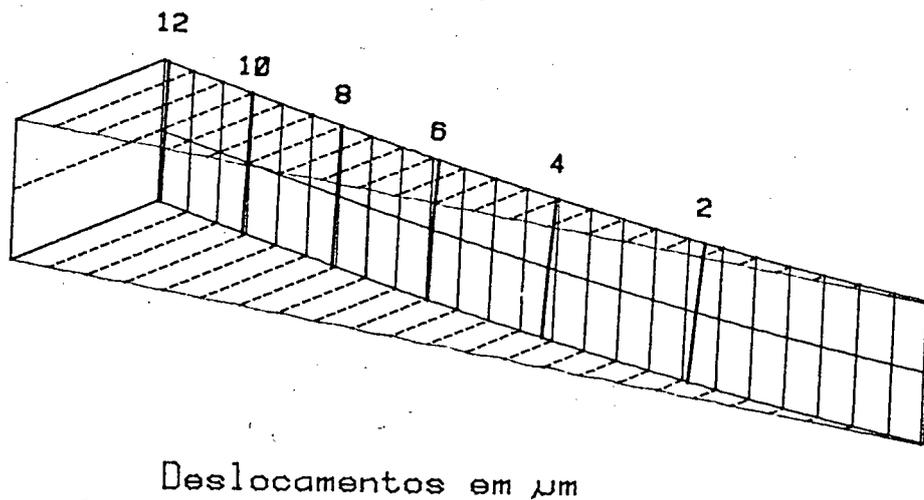


Fig 7.2 - Representação gráfica dos resultados

7.2 - FLEXÃO DE UMA PLACA BIENGASTADA

Este problema consiste de uma placa de alumínio fixa por dois parafusos e solicitada como mostra a figura 7.3. A força F é normal à superfície da placa e é provocada pelo leve aperto de um parafuso pelo lado posterior da placa.

A região estudada foi digitalizada apenas uma vez, sem espelhos auxiliares. O método 1-D foi usado no processamento, visto serem de interesse apenas os deslocamentos na direção normal à superfície estudada.

A figura 7.4 mostra uma vista em perspectiva do campo de deslocamento encontrado. Aparecem também as curvas de nível correspondentes.

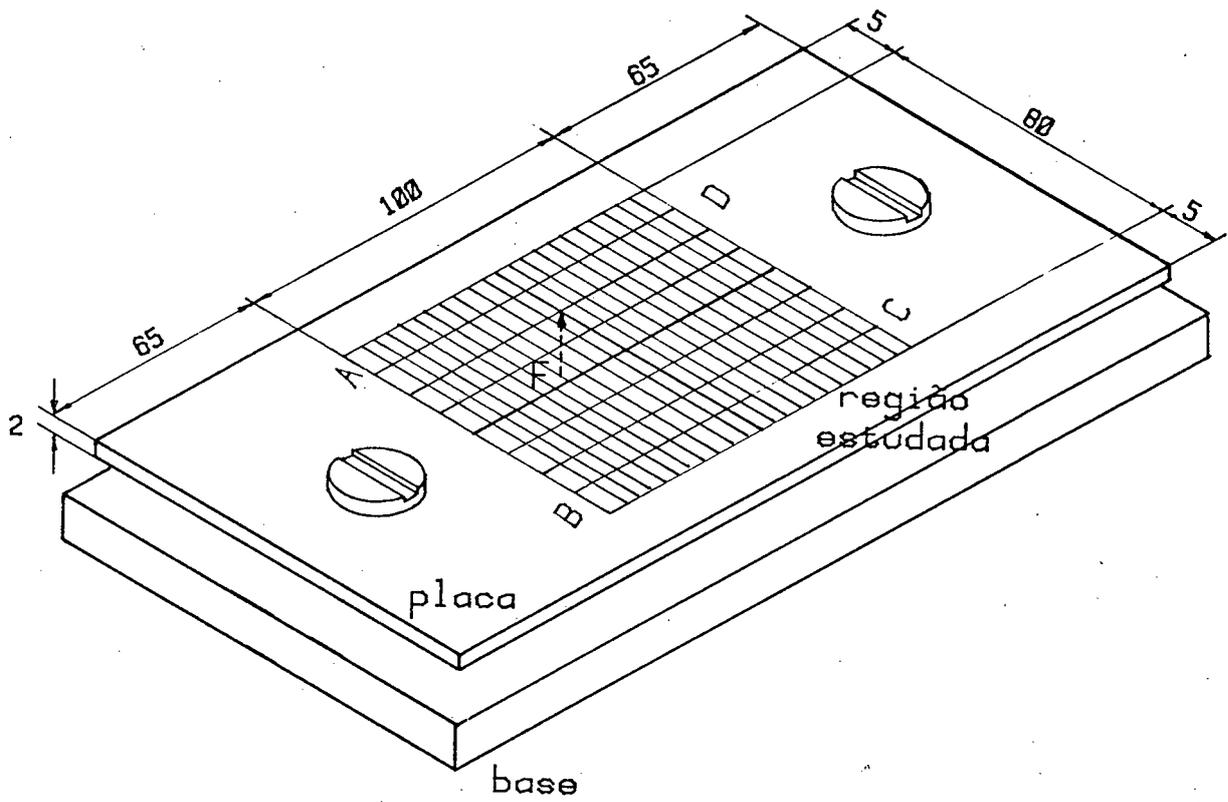


Fig 7.3 - Corpo de prova utilizado

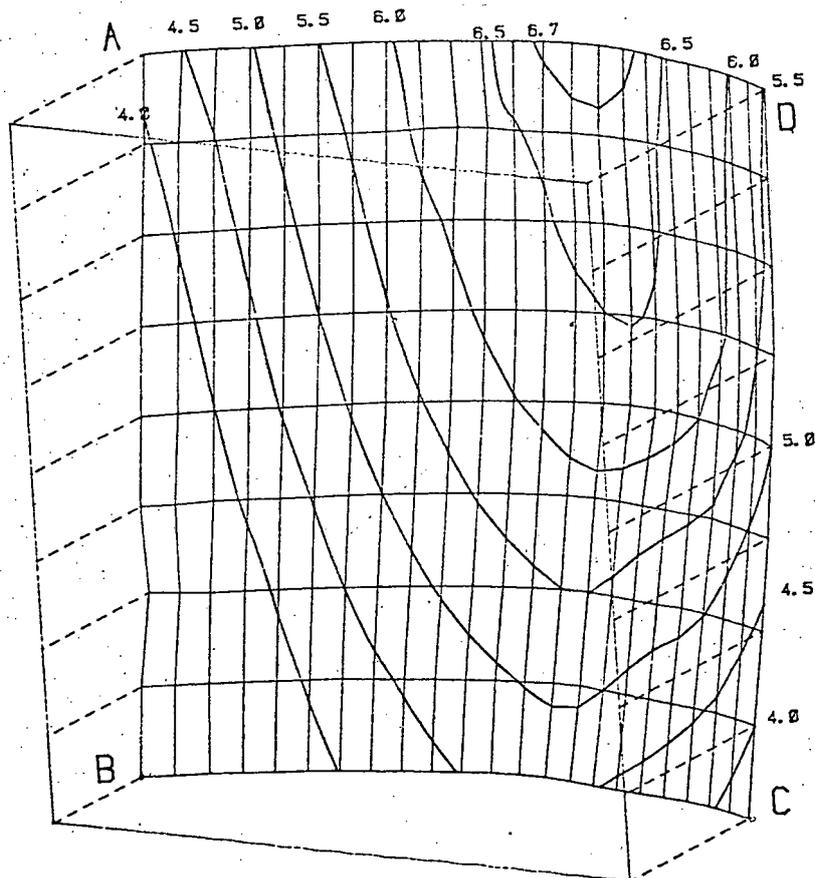


Fig 7.4 - Campo de deslocamento determinado

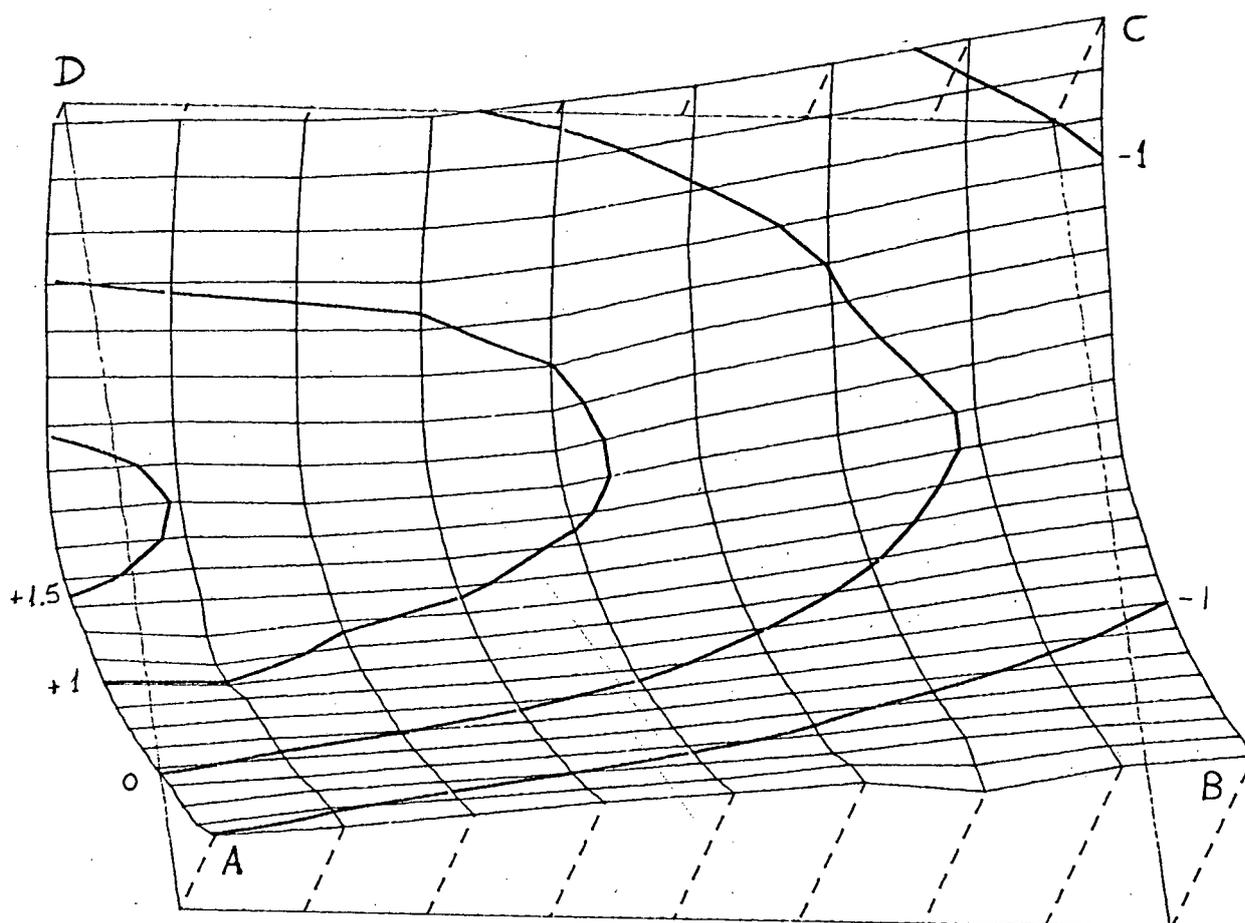


Fig 7.5 - Mudança de forma e inclinações da superfície

A figura 7.5 mostra uma vista do mesmo problema na qual foi eliminada a componente do deslocamento de corpo rígido na direção Z. Nesta figura a deformação e a inclinação da superfície são facilmente identificáveis e quantificáveis. O deslocamento médio foi assumido como o nível zero.

7.3 - FLEXÃO DE UMA PLACA APOIADA EM TRÊS PONTOS

Neste exemplo foi digitalizado o mapa de franjas resultante do campo de deslocamento gerado pela flexão de uma placa de aço apoiada em três pontos. A figura 7.6 ilustra o modo como a placa foi solicitada.

Também aqui apenas uma vista foi digitalizada e o método 1-D foi usado no processamento. O resultado desta experiência aparece na figura 7.7. A forma da curva de nível correspondente

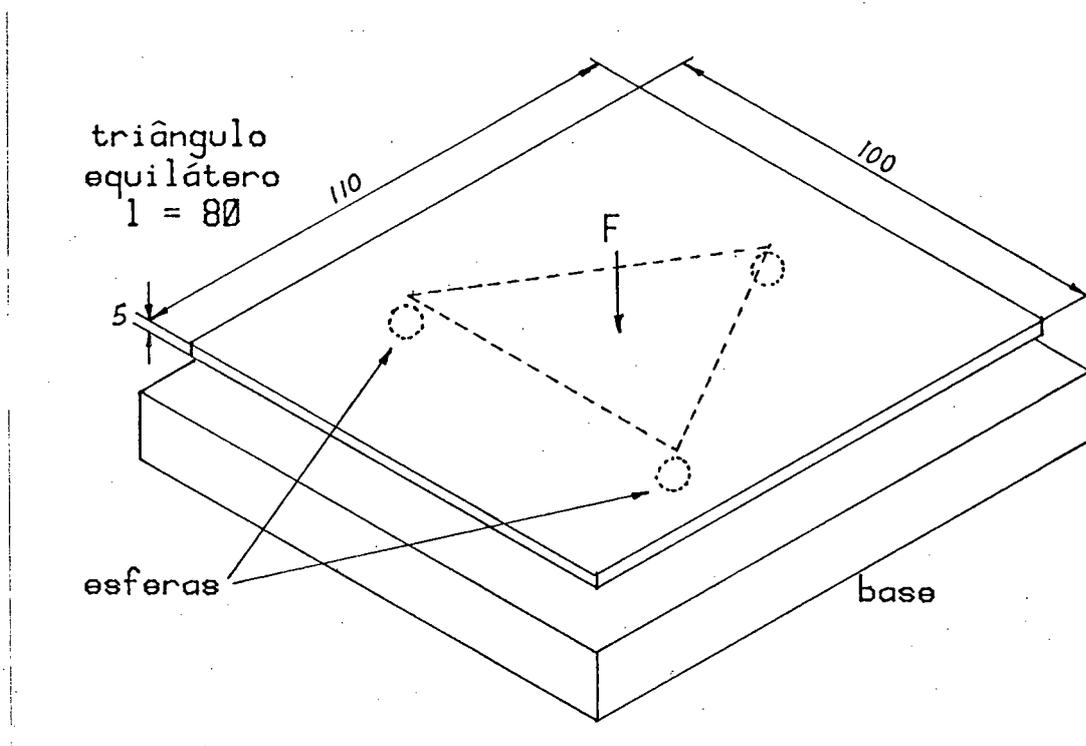


Fig 7.6 - Flexão de uma placa apoiada em três pontos

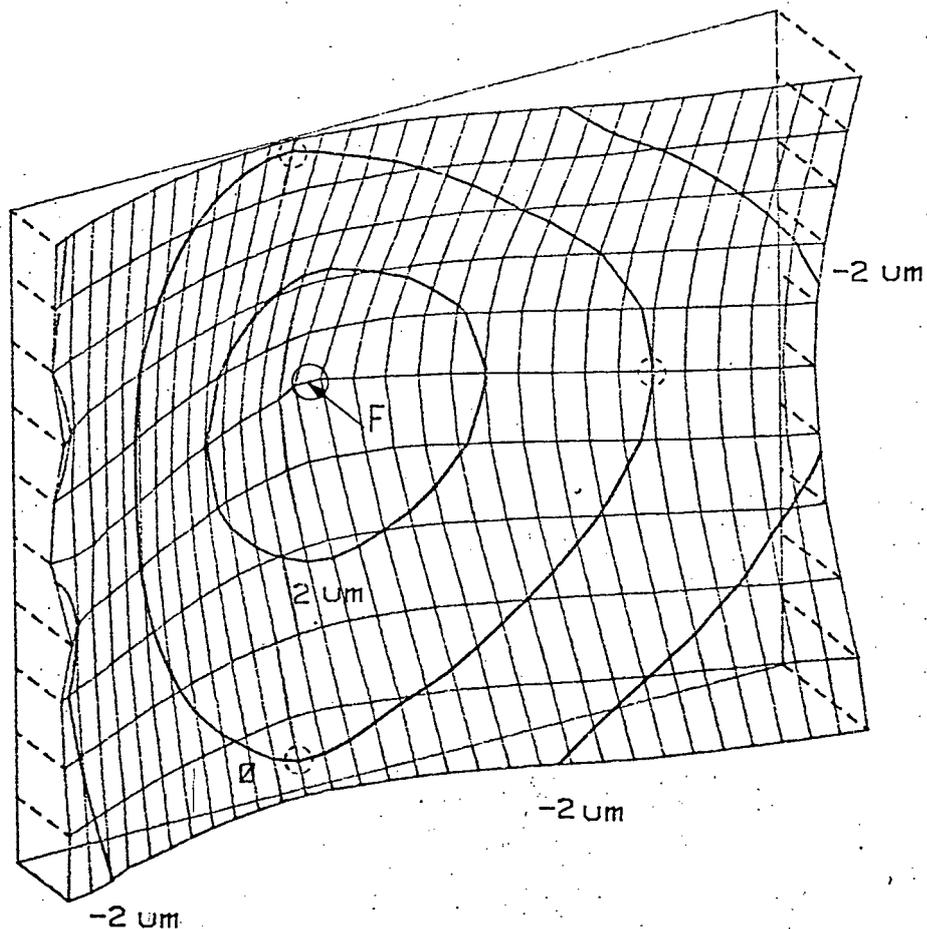


Fig 7.7 - Campo de deslocamentos medido

ao nível zero molda de maneira bem definida o triângulo equilátero em cujos vértices se encontram os pontos de apoio. Na região interna a curva do nível zero a forma das curvas de nível tendem a circular, verificando de certo modo o princípio de Saint-Venant.

Esta experiência mostra, de maneira excepcional, o desempenho da holografia automatizada em um problema de difícil solução analítica. A continuidade e a compatibilidade entre todos os pontos da malha atestam qualitativa e quantitativamente a capacidade da técnica em levantar campos de deslocamento com excelente definição, mesmo quando envolve valores tão pequenos de deslocamento, como é o caso.

Como não há limitações quanto ao material com o qual é confeccionada a placa, um problema envolvendo materiais compostos (reforçados com fibras) pode ser estudado com o mesmo grau de facilidade. A existência de furos, rasgos, ressaltos, espessura variável ou outras características, praticamente não impõe dificuldades adicionais.

7.4 - MODO DE VIBRAÇÃO DE UMA VIGA

Neste exemplo foi estudado um trecho de uma viga (200 x 30 x 5 mm) engastada vibrando no segundo modo, em função da excitação gerada através de um eletroímã, alimentado por um oscilador; conforme mostrado na figura 7.8.

O trecho estudado abrange os dois nós de deslocamento ao longo da viga. A figura 7.9 mostra o resultado desta análise. O holograma foi feito em tempo médio. Uma única vista foi digitalizada e os dados foram processados pelo método 1-D. Os valores correspondentes as curvas de nível representam o deslocamento a partir da posição de equilíbrio da viga (metade da amplitude).

Observa-se um pequeno efeito torcional sobre a viga, causado provavelmente por assimetria do corpo estudado e/ou pela descentralização da força de excitação.

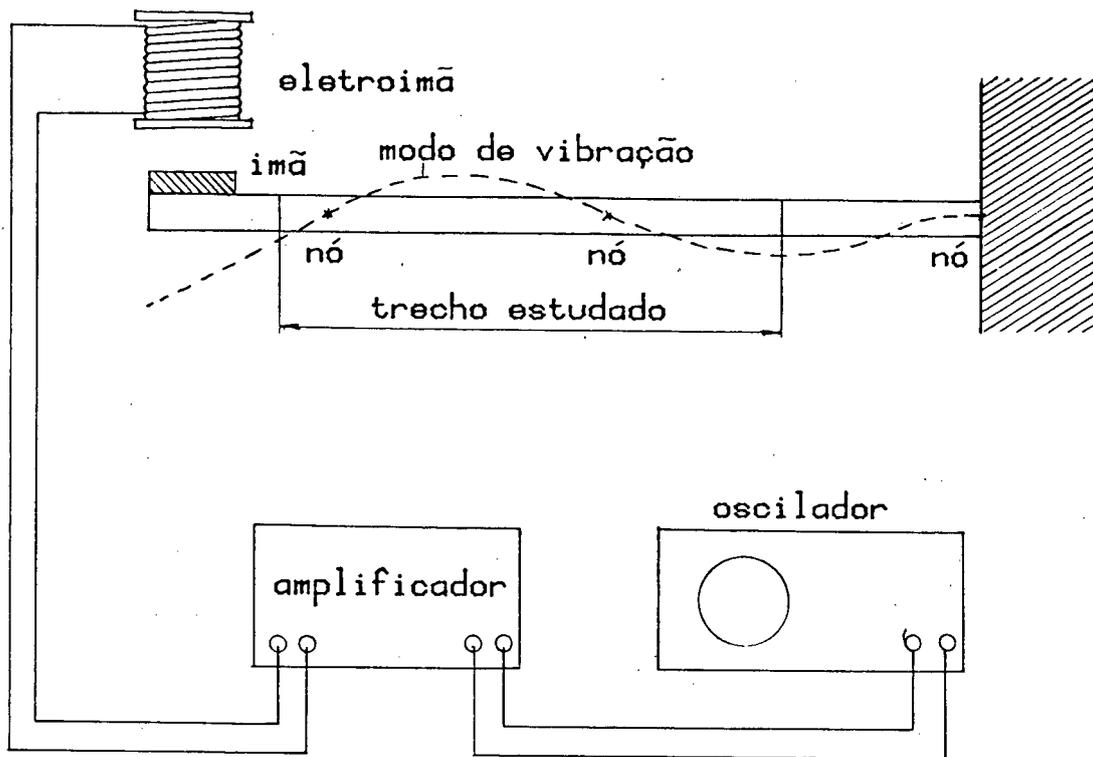


Fig 7.8 - Excitação do segundo modo de vibração de uma viga engastada

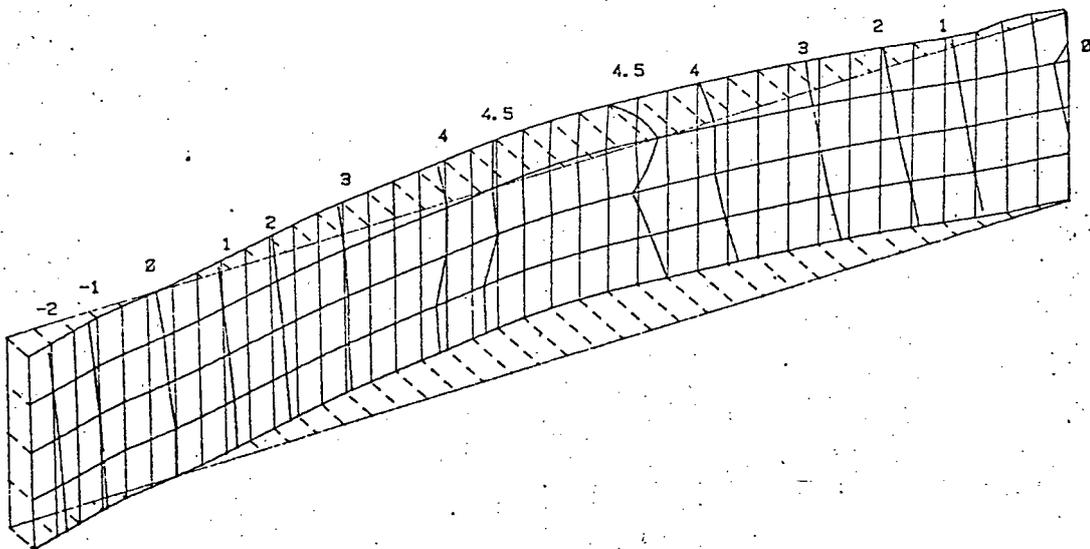


Fig 7.9 - Campo de amplitude determinado

8 - CONCLUSÃO

A holografia interferométrica tem sido reconhecida como uma valiosa ferramenta na mecânica experimental. Sua aplicação, no entanto, tem sido restrita devido à morosidade com que é feita a quantificação de um problema e pelas parcelas de erro introduzidas na determinação visual dos dados básicos.

A versatilidade da metodologia desenvolvida praticamente torna universal sua aplicação aos problemas da mecânica experimental que envolvem campos de microdeslocamentos/deformações. As aplicações mostradas nos capítulos 6 e 7, por sua diversidade, atestam esta versatilidade da metodologia desenvolvida.

A redução de tempo proporcionada pela automatização pode ser avaliada com o auxílio do quadro 8.1 relativo a um ensaio de complexidade mediana, executado por um operador com bastante prática, envolvendo campo de deslocamentos bidirecional.

A automatização também proporciona melhora considerável na resolução e confiabilidade dos resultados. Além de possibilitar análise por um número maior de pontos de observação, o que aumenta consideravelmente a confiabilidade dos resultados, proporciona a execução de um auto teste, que avalia a faixa de erro de cada componente do resultado.

Os resultados de ensaios realizados mostraram que com a holografia interferométrica automatizada uma resolução de $0,1 \mu\text{m}$, ou até melhor, pode ser atingida. Em alguns ensaios as faixas máximas de erro atingiram a casa de 1%. Entretanto os problemas de natureza complexa não apresentaram resultados tão bons, chegando a diferenças da ordem de 5% em relação ao padrão adotado, que porém, como concluído, não pode ser tomado como tal e seja eventualmente o próprio responsável de grande parcela das diferenças constatadas. Faz-se necessário um estudo detalhado das fontes de erro e o desenvolvimento de padrões com nível de precisão suficiente para servirem de referência na avaliação do processo.

Por meio da metodologia desenvolvida neste trabalho a holografia interferométrica pode ser usada em ambiente de laboratório, de forma bastante prática, versátil, confiável e precisa co-

Quadro 8.1 - Vantagens da Automatização

ETAPA	AUTOMATIZADO	NÃO AUTOMATIZADO POR FOTOGRAFIA	SALDO	OBS.
ALINHAMENTO DOS COMPONENTES ÓPTICOS	60	60	0	a
OBTENÇÃO DO HOLOGRAMA	30	30	0	b
PREPARAÇÃO PARA AQUISIÇÃO	30	120	+90	c
AQUISIÇÃO DE DADOS	30	150	+120	d
PROCESSAMENTO	5	120	+115	e
DOCUMENTAÇÃO	45	150	+105	f
TOTAL	200	630	+430	

Tempo em minutos

Observações:

- a) Pressupondo a disponibilidade e montagem prévia de todos os componentes, acessórios e especialmente dispositivos de atuação sobre o corpo.
- b) Pelo método da dupla exposição considerando infraestrutura fotográfica preparada.
- c) Montagem, interligação dos periféricos e ajustes no processo automatizado. Traçado da malha, fotografia, processamento fotográfico e confecção de planilhas no método não automatizado.
- d) Através de uma malha bastante grosseira no processo não automatizado, enquanto que o método automatizado considera um refino muito maior.
- e) Com calculadora, algoritmo e planilhas preparadas.
- f) No método não automatizado, fazendo apenas gráficos simplificados sem curvas de nível e perspectiva, o que elevaria o tempo enormemente. No caso automático indica-se o tempo para obtenção dos diversos gráficos.

mo uma valiosa ferramenta na qualificação e quantificação de campos de microdeslocamentos/deformações.

Entretanto algumas imposições de caráter técnico ou analítico restringem as aplicações quanto a:

- forma da região estudada: regiões retangulares ou quase retangulares.
- natureza da região estudada: plana ou com pequena curvatura (máxima inclinação relativa cerca de 20°).
- deslocamento máximo: limitado pela concentração de franjas (até $20 \mu\text{m}$ em peças grandes).
- dimensões máximas da região estudada: limitada pela potência do laser (até cerca de $200 \times 200 \text{ mm}$ para o laser HeNe de 35 mW).

Como sugestão para futuros trabalhos, usando como base a metodologia apresentada, pode-se citar alguns tópicos que contribuirão à expansão das potencialidades da holografia interferométrica automatizada:

- estudo de erros e sua minimização
- discretização segundo malhas não retangulares
- estudos em superfícies não planas
- determinação de tensões a partir do campo de deslocamentos
- otimizar a qualidade da imagem real para aumentar a resolução da detecção fotoeletrônica das franjas
- processamentos específicos para problemas como:
 - * mecânica da fratura
 - * concentração de tensões
 - * estudo experimental de materiais compostos
 - * tensões residuais
 - * combinação entre fotoelasticidade e holografia interferométrica para separação das tensões principais.

9 - REFERÊNCIAS

- | 1| Gabor, D. A New Microscopic Principle
Nature 161, 177-8 mai/48
- | 2| Gabor, D. Microscopy by Reconstructed Wave-
fronts
Proc. Roy. Soc. 197A, 454-87 jul/49
- | 3| Leith, E. Reconstructed Wavefront and Comunication
Uptanieks, J. Theory
J. Opt. Soc. Am. 52, 1123-30 out/62
- | 4| Leith, E. Wavefront Reconstruction with Conti-
Uptanieks, J. nuos Objects
J. Opt. Soc. Am. 53, 1377-81 dez/63
- | 5| Leith, E. Wavefront Reconstruction with Diffu-
Uptanieks, J. sed Illumination and Three-dimensio -
nal Object
J. Opt. Soc. Am. 54, 1292-301 nov/64
- | 6| Ennos, A. Holography and its Application
Contemporary Physics 8, nº2 mar/67
- | 7| Dhir, S. K. An Improved for Obtaining the Gene-
Sikora, J. P. ral-displacement Field from Hologra-
phic Interferogram
Exp. Mec. 323-7 ago/72
- | 8| Der, V. K. A Technique for Reducing the Fringe
Holloway, D. C. Frequency in Large Displacement Holo-
Fourney, W. L. graphy
Exp. Mec. 286 jul/74
- | 9| Sciammarella, P. M. Holographic-moirè Technique to Ob-
Gilbert, J. A. tain Separated Paterns for Compon-
ents of Displacement
Exp. Mec. 215-20 jun/76
- | 10| Sikora, J. P. A Three-dimensional Displacement Ana-
lysis from an Image Plane Hologram
Exp. Mec. mar/78

- [19] Enos, A. Measurement of In-plane Surface Strain by Hologram Interferometry
J. Sci. Instr. 1, 731-4 - 1968
- [20] Sciammarella, C.A. Holographic Interferometry Applied to the Solution of a Shell Problem
Chang, T. Y. Exp. Mec. - 217 - jun/74
- [21] Larninat, P. M. A Fringe Compensation Technique for Stress Analysis by Reflection Holographic Interferometry
Wei, R. P. Exp. Mec. - 241-8 - jul/76
- [22] Vest, C. M. Holographic Interferometry in Material Testing
IN: Francis, P. H. & Lindholm, U. S. "Advanced Experimental Techniques in the Mechanics of Materials"- Journal of Nondestructive Testing - 1973
- [23] Hsu, T. R. "Measurement of Thermal Distortion of Composite Plates by Holographic Interferometry"
Lewac, R. Exp. Mec. - 182-7 - mai/76
- [24] Dudderar, T. D. The Determination of Mode/Stress-Intensity Factors by Holographic Interferometry
Gorman, H. J. Exp. Mec. - 145 - abr/73
- [25] Meyer, M. D. Material Properties using Holographic Interferometry
Spetzler, H. A. Exp. Mec. - 434-8 - nov/76
- [26] Dudderar, T. D. Holographic Interferometry in Materials Research and Fracture Mechanics
O'Regan, R. IN: Francis, P. H. & Lindholm, U. S. "Advanced Experimental Techniques in the Mechanics of Materials"- Journal of Nondestructive Testing - 1973

- |27| Dudderar, T. D. A Study of Effective Crack Length
Doerries, E. M. using Holographic Interferometry
Exp. Mec. - 300-4 - ago/76
- |28| Holloway, D. C. Application of Holographic Interfero
Patacca, A. M. metry to a Study of Wave Propagation
Forney, W. L. in Rock
Exp. Mec. 281-9 - ago/77
- |29| Hazell, C. R. Vibration Analysis of Plates by Real
-Time Stroboscopic Holography
Exp. Mec. - 339 - ago/73
- |30| Tuschak, P. A. Axisymmetrical vibrations of a Cilin-
Allaire, R. A. drical Resonator Measured by Hologra
phic Interferometry
Exp. Mec. - 81 - mar/75
- |31| Butters, J. N. Laser Holography and Speckle Pat-
terns in Metrological Techniques of
Nondestructive Testing.
IN: Francis, P. H. & Lindholm, U. S.
"Advanced Experimental Techniques in
the Mechanics of Materials"- Journal
of Nondestructive Testing - 1973
- |32| Sampson, R. C. Holographic-Interferometry Applica-
tions in Experimental Mechanics
Exp. Mec. 313-20 - ago/70
- |33| Hsu, T. R. Large-Deformation Measurements by
Real-Time Holographic Interferometry
Exp. Mec. - 408 - out/74
- |34| Gonçalves Jr., A.A. Guia Prático de Holografia
Labmetro - UFSC - 1984
- |35| Smith, H. M. Principles of Holography
New York, Wiley-Interscience - 1969
- |36| Collier, R. J. Optical Holography
New York, Academic Press - 1971

- | 37| Taylor, C. H. Holography
Manual of Sperimental Stress Analysis
SESA - 70-9
- | 38| Hecht, E. Optics
Zajac, A. Massachusctts, Addison-Wesley
490 - 501 - 1979
- | 39| Trapet, E. Ein Beitrag zur Verringerung der
Messunsicherheit von Fluchtungsmes -
systemen aut Laserbasis
Doktor-Ingenieurus Genehmigte Disser -
tation - 1982
- | 40| Kreitlow, H. Untersuchung quantitativer Zusammen -
hänge in der holografischen Interfe -
rometric insberondere im Himblick
auf eine Auswertung holografischer
Interferenzmuster.
Doktor Ingenieur genehmigte Disser -
tation
- | 41| Gonçalves Jr., A.A. Solução de Sistemas de Equações Li -
neares pelo Método dos Mínimos Qua -
drados
Labmetro - UFSC - 1984
- | 42| United Detector UDT - PIN - SDP - 212-1
Technology
- | 43| Gonçalves Jr., A.A. Manual de Operações do Programa Digi -
talizador
Labmetro - UFSC - 1984
- | 44| Gonçalves Jr., A.A. Manual de Operações do Programa de
Processamento
Labmetro - UFSC - 1984
- | 45| Gonçalves Jr., A.A. Reflexão em Espelhos Planos
Labmetro - UFSC - 1984
- | 46| Roark, R. J. Formulas for Stress and Strain
Young, W. C. McGraw Hill Kogakusha - 1980

- [47] TESA Apalpador indutivo transversal
modelo GT - 31
- [48] Dr. Johannes Heidenhain Apalpador MT - 30 com indicação digital