FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E GESTÃO INDUSTRIAL

INTERFEROMETRIA *LASER* E MÉTODOS HÍBRIDOS EM MECÂNICA EXPERIMENTAL

Mário Augusto Pires Vaz

PORTO
1995

Mário Augusto Pires Vaz

INTERFEROMETRIA *LASER* E MÉTODOS HÍBRIDOS EM MECÂNICA EXPERIMENTAL

621(043) / VAZm / INT
UNIVERSIDADE DO PORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA
N.º
DEU
30.10.96

Dissertação para Doutoramento apresentada à
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Publicação apoiada pela
Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica

AGRADECIMENTOS

A elaboração da presente tese decorreu paralelamente à criação do Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental do DEMEGI. A fundação deste laboratório e a inclusão das técnicas de interferometria óptica nos *curricula* de Engenharia Mecânica da FEUP são iniciativas do orientador desta tese Professor Joaquim Francisco Silva Gomes. A ele o autor manifesta a sua gratidão, quer pela sugestão do trabalho desenvolvido, quer pelo apoio solidário que sempre manifestou.

Aos professores Armindo Luís Vilar Soares Lage e Augusto Silva Gomes que, no nosso país foram pioneiros na utilização destas técnicas, o autor agradece a sua colaboração neste trabalho e o muito que com eles aprendeu ao longo destes anos de camaradagem.

Ao colega e amigo José Augusto Chousal é também devido um especial agradecimento por toda a colaboração no processamento de algumas das imagens apresentadas nesta tese.

De referir também a grata colaboração do *matemático* amigo, Egidio Augusto Reis Fernandes, no desenvolvimento de algumas rotinas numéricas e na discussão dos vários problemas que foram surgindo no processamento de alguns dados experimentais.

Toda a amizade, colaboração e paciência manifestadas pelo colega e amigo Francisco Queirós de Melo nunca serão suficientemente agradecidas.

Por último um especial agradecimento ao irmão António pela disponibilidade e empenho com que colaborou sempre que a sua ajuda foi solicitada.

SIMBOLOGIA

A	- Vector amplitude complexa
a	- Amplitude de uma onda electromagnética
B	- Vector campo magnético; brilho num ponto de uma imagem *video*
C	- Contraste ; matriz de amortecimento
D	- Matriz de elasticidade
d	- Passo de uma rede espacial
E	- Módulo de Young; vector campo eléctrico
F	- Força; vector global de forças
g	- Ganho de um fotodetector
I	- Intensidade luminosa
J	- Função de Bessel
K	- Matriz de rigidez; matriz de conversão fase-deslocamento em 3D
L	- Matriz diferenciadora
l	- Representa um comprimento
M	- Função de franja; matriz de massa
N	- Ordem de franja; número de imagens; matriz de funções interpoladoras
n	- Versor da normal exterior a uma secção; versor da direcção de propagação de onda electromagnética
P	- Ponto genérico
S	- Matriz de sensibilidade
s	- Vector sensibilidade
T	- Período
t	- Tempo
U	- Vector de deslocamentos
u	- Deslocamento na direcção do eixo x
V	- Sinal *video*; com índice representa o ruído aditivo presente no sinal
v	- Deslocamento na direcção do eixo y
w	- Deslocamento na direcção do eixo z
x,y,z	- Coordenadas

α - Amplitude de um ângulo
Δ - Desfasamento angular
ε - Vector de deformações; com índice representa uma deformação
$\varnothing$ - Fase de um ponto pertencente a uma frente de onda
γ - Declive da zona linear da curva HD; com índices representa uma deformação de corte; parâmetro
φ - Fase de uma onda electromagnética
λ - Comprimento de onda
ν - Frequência de uma radiação; em Mecânica dos Sólidos é o coeficiente de Poisson
ρ - Massa específica
σ - Ruído electrónico; com índice representa a tensão normal
τ - Transmitância de amplitude; com índices representa uma tensão tangencial
ψ - Variação aleatória de fase ao longo de um padrão de *speckle*
ω - Frequência angular

ABREVIATURAS

ADINA - *Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis*
ADIRA - A. Dias Ramos, Máquinas Ferramentas Lda.
ASA - Aproximação Semi-analítica
CCD - *Charge Coupled Devices*
CFRP - *Carbon Fiber Reforced Plastics*
CND - Controlo não destrutivo
CPZ - Cristal piezoeléctrico
DEMEGI - Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
DF - Divisor de feixe
DSPI - *Digital Speckle Pattern Interferometry*
ESPI - *Electronic Speckle Pattern Interferometry*
EUCLID - *European Co-operation for the Long Term in Defense*

FFT	- *Fast Fourier Transform*
HD	- Hurter-Driffield (Curva característica de uma emulsão fotográfica)
I-DEAS	- *Integrated Design Engineering Analysis Software*
LASER	- *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
LOME	- Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental
LUT	- *Look-up Table*
MDF	- Método das Diferenças Finitas
MEF	- Método dos Elementos Finitos
MSF	- Modulação sinusoidal de fase
NA	- Abertura numérica
YAG	- *Yttrium Aluminum Garnet*
SDRC	- *Structural Dynamics Research Corporation*
S/R	- Razão sinal-ruído
TEM_{mn}	- *Transverse Electric and Magnetic Modes*, m e n representam o número de linas nodais que o feixe apresenta ao longo das direcções vertical e horizontal, respectivamente

Sumário

Este trabalho consiste na aplicação de técnicas experimentais baseadas na interferometria holográfica a problemas da Mecânica Estrutural e controlo não destrutivos de materiais (CND). Numa primeira abordagem do problema são apresentadas as várias técnicas disponíveis actualmente, bem como a sua fundamentação teórica; seguidamente é discutida a aplicabilidade destas técnicas aos problemas mais frequentes da Mecânica Estrutural e CND, sendo referidas as suas vantagens e limitações.

O problema do tratamento numérico dos resultados experimentais por forma a serem utilizados como entradas em programas computacionais de cálculo de tensões é também abordado, bem como a utilização híbrida de ambos os procedimentos.

Este trabalho termina com a apresentação de várias aplicações que revelam a utilidade destas técnicas como auxiliares da análise estrutural.

As conclusões deste trabalho e as sugestões para um futuro desenvolvimento encerram esta dissertação.

Sommaire

Ce travail consiste à l' application des tecniques experimentales basées sur l'interferometrie holographique aux problèmes de la Mécanique Structurelle et contrôle non-destructife. Dans une prémière analyse du problème, on introduit les técniques disponibles, bien aussi que leur applicabilité aux problèmes les plus repandus en Mécanique Structurelle; on fait reference aussi à leurs avantages et leurs limitations.

Le problème du traîtement numérique des résultats, de sorte à leur utilization comme des variables d´entrée de logiciels de calcul des contraintes est aussi consideré, de la même façon que l´usage hibride des deux procedures.

Ce travail termine avec la presentation de quelques applications qui révèlent l´avantage de ces técniques comme des outils dans l´analyse structurelle.

Les conclusions de ce travail et les sugestion d´un développement à l´avenir terminent cette dissertation.

Abstract

This work consists on the application of experimental techniques based on the holographic interferometry to problems on Structural Mechanics and non-destructive inspection.

In a first incursion in the problem the available techniques are introduced as well as their theoretical bases; in a second step the applicability of such techniques to the most usual problems of Structural Mechanics is discussed, as well as their advantages and limitations. The problem of numerical treatment of the experimental data to be used as input in computer programs for stress analysis calculations is also considered as well as the hybrid utilization of both procedures.

This work ends with the presentation of several applications that reveal the utility of the techniques described where as important tools in Structural Analysis.

The conclusions and suggestions for future development end this dissertation.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 1

1. INTRODUÇÃO 3

1.1 **Enquadramento e objectivos** 3

1.2 **Desenvolvimento do trabalho** 7

CAPÍTULO 2 11

2. A ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES 13

2.1 **Introdução** 13

2.2 **Tensões e deformações** 15

2.2.1 Conceito de tensão num ponto 15
2.2.2 Conceito de deformação num ponto 19
2.2.3 Relações entre tensões e deformações 22
2.2.4 Equações de compatibilidade 23

2.3 **Técnicas clássicas de análise experimental de tensões** 25

2.3.1 A Extensometria 25
2.3.2 A Fotoelasticidade 29
2.3.3 As técnicas de *Moiré* 34
2.3.4 Outras Técnicas 38

Referências 39

CAPÍTULO 3 41

3. TÉCNICAS DE INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA 43

3.1 Introdução 43

3.2 Breve história da interferometria holográfica 44

3.3 A luz 46

3.4 Relações fundamentais 48

3.5 O Holograma de Gabor 55

3.6 Holograma de Leith e Upatnieks 59

3.7 A interferometria holográfica 64

3.8 Medição de deslocamentos com interferometria holográfica 71

3.9 A interferometria holográfica com dupla referência 76

3.9.1 Técnicas de modulação de fase 76
3.9.2 Técnicas Heteródinas. 81

3.10 A holografia *Moiré* 85

Referências 89

CAPÍTULO 4 93

4. ESPI - *Electronic Speckle Pattern Interferometry* 95

4.1 Introdução 95

4.2 **Holografia/ESPI. Diferenças e semelhanças** 97

4.3 **Interferómetros básicos** 101

4.4 **Modos de funcionamento** 102

4.5 **Obtenção do padrão de interferência** 104

4.5.1 Referência especular 104
4.5.2 Referência de *speckle* 110

4.6 **Obtenção do sinal *video* em ESPI** 112

4.7 **Realização da referência** 119

4.7.1 Cunha 121
4.7.2 Espelho com orifício 122
4.7.3 Espelhos múltiplos 123
4.7.4 Fibra óptica 123

4.8 **Parâmetros de ajuste do sistema de ESPI** 125

4.9 **Limitações do método** 127

Referências 129

CAPÍTULO 5 133

5. **ESTUDO DE FENÓMENOS DINÂMICOS** 135

5.1 **Introdução** 135

5.2 **Técnicas de medição de deslocamentos associados a fenómenos dinâmicos** 137

5.2.1 Fenómenos de baixa velocidade 142

5.2.2 Medições em tempo médio (*time average*) 144
5.2.2.1 Como melhorar o contraste dos padrões de franjas obtidos em tempo médio 152

5.2.3 Modulação de fase do feixe de referência 158

5.2.4 Modulação de amplitude 163

5.2.4.1 Modulação de amplitude com *lasers* de emissão contínua 167
5.2.4.2 Modulação de amplitude com *lasers* de impulsos 169

Referências 174

CAPÍTULO 6 179

6. **TÉCNICAS HÍBRIDAS** 181

6.1 **Introdução** 181

6.2 **Técnicas numéricas de análise de tensões** 182

6.2.1 Método das diferenças finitas 183
6.2.2 Métodos Semi-Analíticos 186
6.2.3 Método dos Elementos Finitos 187
6.2.4 Formulação Estática do Problema de Elementos Finitos 189
6.2.5 Formulação Dinâmica do Problema de Elementos Finitos 193

6.3 **Técnicas híbridas em Mecânica dos Sólidos** 197

6.3.1 Modelação das Condições de Fronteira e do carregamento 197
6.3.2 Técnicas de subestruturação 201

6.3.3 Obtenção directa do campo de deslocamentos 203

6.3.3.1 Obtenção dos deslocamentos a partir de medições discretas sobre registos interferométricos 205
6.3.3.2 Interpolação de medições discretas apresentando ruído 207
6.3.3.3 Obtenção do campo de deslocamentos a partir de medições contínuas 211

Referências 220

CAPÍTULO 7 225

7. **APLICAÇÕES** 227

7.1 **Introdução** 227

7.2 **Análise estática de estruturas** 228

7.2.1 Determinação da deformada de uma placa em consola 228
7.2.2 Determinação da deformada de uma placa circular 240
7.2.3 Determinação da deformada de uma tampa de cárter durante a montagem de um vedante 247
7.2.4 Estudo da deformação de uma guilhotina hidráulica durante o corte 258

7.3 **Análise dinâmica de estruturas com técnicas interferométricas** 267

7.3.1 Análise modal de uma placa rectangular 270
7.3.2 Análise modal de uma placa circular 276
7.3.3 Análise modal de um acessório de um motor automóvel. 278
7.3.4. Medição da amplitude dos deslocamentos efectuada sobre uma peça em vibração sinusoidal com recurso a técnicas de modulação de amplitude 284

7.4 **Ensaios não destrutivos de materiais compósitos com *Shaerography*** 289

Referências 301

CAPÍTULO 8 303

8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURO DESENVOLVIMENTO 305

8.1 Nota final 305

8.2 Perspectivas de trabalho futuro 307

CAPITULO 1

1. INTRODUÇÃO

1. 1 Enquadramento e objectivos

1.2 Desenvolvimento do trabalho

CAPITULO 1

1. INTRODUÇÃO

1. 1 Enquadramento e objectivos.

O grande desenvolvimento da electrónica nas últimas décadas permitiu projectar e construir sistemas de *hardware* com grande capacidade de cálculo. Com o progresso tecnológico então verificado reduziram-se os custos de fabrico e estes tornaram-se acessíveis à maior parte dos investigadores. À divulgação destes sistemas correspondeu um grande incremento na investigação no cálculo computacional, tendo sido desenvolvidas soluções numéricas com aplicações em grande parte dos problemas físicos. A Engenharia Estrutural, que tem como principal objectivo a análise do comportamento das estruturas, foi também contemplada, existindo hoje múltiplos programas numéricos com aplicação às mais variadas situações. Um destaque especial é reservado ao método dos Elementos Finitos, que apareceu no ínicio dos anos sessenta e se converteu numa ferramenta indispensável em quase todos os ramos da Engenharia.

As técnicas de Análise Experimental de Tensões e da Mecânica Experimental em geral, que durante muito tempo foram a única alternativa ao cálculo analítico, ficaram assim com um poderoso concorrente. As técnicas numéricas, embora recorram a métodos de cálculo aproximados, permitem na maior parte das situações obter soluções aceitáveis a custos inferiores aos obtidos por via experimental. O rigor das soluções obtidas pode ser melhorado, quer aumentando o número de elementos envolvidos na discretização, quer utilizando elementos

mais complexos que envolvem maior número de graus de liberdade ou maior ordem de deformação. Além disso, a sua versatilidade permite adaptar facilmente os modelos matemáticos aos vários tipos de problemas.

Contudo, o progresso tecnológico contribuiu também para o aparecimento de novos equipamentos com aplicação na análise experimental, com os quais foi possível melhorar o desempenho das técnicas clássicas, facilitando a sua aplicação a problemas de crescente complexidade. Sistemas de *hardware* hoje disponíveis permitem recolher e tratar automaticamente grandes quantidades de informação, reduzindo o tempo dispendido em cada medição. Os resultados podem ser obtidos sob a forma de ficheiros numéricos e interpretados com a ajuda de *software* gráfico. Foram também desenvolvidos novos transdutores e novas técnicas experimentais envolvendo novos materiais, como por exemplo as fibras ópticas e os semicondutores.

Uma área de grande inovação consistiu no aumento do domínio de aplicação das técnicas de interferometria óptica tornado possível com o aparecimento do *laser*. Com a descoberta da emissão estimulada de luz (*Light Amplification* by *Stimulated Emission* of *Radiation*) no início da década de sessenta, ficou disponível uma fonte de radiação luminosa com elevado grau de coerência, bem adaptada a aplicações na área da metrologia óptica. O método de gravação da fase de uma frente de onda luminosa proposto por Gabor sob a designação de Holografia, embora na altura não tivesse despertado grande interesse na comunidade científica passou, com este novo tipo de radiação, a ser utilizado no desenvolvimento de novas técnicas de medida. Estas técnicas, vulgarmente designadas por técnicas de interferometria holográfica, podem ser aplicadas sem contacto físico e com uma resolução da ordem do comprimento de onda da luz no controlo dimensional de corpos difusos.

Após o aparecimento das técnicas de interferometria holográfica, cedo a comunidade científica se apercebeu das suas potencialidades e lhes dedicou inúmeros trabalhos de investigação no sentido de descobrir novas aplicações e melhorar o seu desempenho. Os meios de registo utilizados na gravação das frentes de onda luminosas envolvidas na interferometria holográfica foram também alvo de progresso. As emulsões fotográficas usadas inicialmente viram a sua resolução aumentada, sendo hoje vulgares as emulsões com capacidade para registar até 5000 linhas/mm. Contudo, a revelação das emulsões fotográficas envolve um processamento químico, pelo que o registo de hologramas neste tipo de suporte é sempre moroso. Com o aparecimento dos termoplásticos fotossensíveis a revelação química das emulsões foi substituida, neste novo

suporte, por um ciclo térmico. Esta simplificação permitiu conceber sistemas holográficos em que os registos são efectuados automaticamente em apenas alguns segundos. Embora normalmente a resolução máxima obtida com estes materiais seja cerca de um terço da obtida com as emulsões (raramente ultrapassam as 1000 linhas/mm), já é hoje possível dispôr de fotopolímeros com resolução semelhante à das emulsões fotográficas cuja revelação é obtida através de uma cura com ultra-violetas. Contudo o autor não tem conhecimento da existência de qualquer sistema comercial de registo automático de hologramas que utilize estes materiais.

A introdução do registo electrónico substituindo os tradicionais meios de registo pelo alvo de uma câmera *video*, veio simplificar enormemente as técnicas de interferometria holográfica. Controlando o ângulo entre os feixes envolvidos no processo interferométrico, é possível registar hologramas em meios de registo de baixa resolução como é o alvo de uma câmera *video*, cuja resolução normalmente não ultrapassa as 50 linhas/mm. Embora neste tipo de registos se percam as características de tridimensionalidade próprias dos registos holográficos, os sistemas com registo electrónico permitem obter hologramas à frequência dos *video*, isto é, 25 hologramas/s (sistema europeu). O aparecimento de fotodetectores baseados em matrizes de células fotossensíveis que amostram os padrões de intensidade de forma discreta, vulgarmente designados por CCD (*charge coupled devices*), permitiu a miniaturização das câmeras de *video*, o aumento da sua sensibilidade e resolução, melhorando o desempenho dos sistemas interferométricos baseados neste suporte.

Também o progresso verificado na indústria electrónica de computadores durante a última década contribuiu para melhorar o desempenho das técnicas de interferometria. O aparecimento de sitemas de processamento digital de imagem que podem ser montados directamente nos barramentos dos computadores pessoais permitiu construir sistemas interferométricos compactos cujos registos podem ser processados numéricamente e guardados em memória magnética. Desta forma é possível, com utilização de técnicas de modulação de fase e sistemas de processamento de imagem, construir sistemas que permitem obter directamente a distribuição espacial dos deslocamentos associados à deformação de uma estrutura. Mesmo algoritmos envolvendo grande volume de cálculo, como são os baseados no cálculo de FFTs (*Fast Fourier Transform*), são hoje de fácil aplicação utilizando aceleradores de processamento. Trabalhos recentemente publicados mostram que, utilizando o processamento digital de imagem e detectores de CCD, é possível registar hologramas convencionais com portadora.

Neste caso a reconstrução da frente de onda gravada é obtida por pocessamento numérico.

A utilização dos novos equipamentos e os trabalhos de investigação desenvolvidos transformaram as técnicas de interferometria holográfica numa ferramenta experimental com aplicação em vários domínios da ciência. Permitindo medir sem contacto grandezas codificáveis numa frente de onda luminosa, estas técnicas têm uma elevada resolução e permitem efectuar directamente medições sobre as superfícies dos objectos a estudar. A sua aplicação à análise de estruturas permite obter medições, com elevada resolução, do campo de deslocamentos em superfícies difusas, quer em situações estáticas, quer em situações dinâmicas. A introdução destas técnicas em Portugal deve-se ao grupo de Óptica Quântica da Faculdade de Ciências do Porto. Este grupo, liderado pelo Professor Olivério D.D. Soares, foi pioneiro no nosso país na investigação nestas técnicas, tendo publicado diversos trabalhos neste domínio entre os quais a tese de doutoramento do Engenheiro Armindo Luís Vilar Soares Lage em 1987, onde são descritas várias técnicas com aplicação na análise dinâmica do comportamento de estruturas.

O progresso verificado nos métodos experimentais e a necessidade de validar os resultados obtidos por via numérica vieram, nas últimas décadas, contribuir para reacender o interesse na experimentação. A necessidade de dispôr de resultados que permitam ajustar os modelos matemáticos, aumentando o rigor das soluções computacionais solicitadas, quer pelo aparecimento de novos materiais, quer por novas soluções construtivas, contribuiu para que aumentasse o número de investigadores dedicados à experimentação. As técnicas experimentais clássicas beneficiaram da introdução de novos equipamentos, enquanto outras mais recentes permitiram divulgar novas aplicações. De entre elas destaca-se a interferometria holográfica, hoje frequentemente utilizada para a análise estrutural que, dispondo de uma grande resolução, permite efectuar medições sem contacto sobre as superfícies de protótipos sem qualquer preparação prévia.

A utilização combinada das técnicas interferométricas com as técnicas numéricas deu um forte contributo para a análise do comportamento das estruturas. Ao obter em simultâneo a informação referente a uma área mais ou menos extensa da superfície em estudo permite detectar e medir zonas de fortes gradientes, enquanto a elevada resolução permite operar com reduzidos níveis de carregamento evitando recorrer à construção de fortes estruturas de carga. Contudo, é o intercâmbio de valores entre ambos os métodos, constituindo as

técnicas normalmente designadas por híbridas, que permite obter melhores resultados e de forma mais expedita

Como na maior parte dos casos de análise de estruturas as tensões constituem o resultado final pretendido, e as técnicas interferométricas conduzem ao campo de deslocamentos, é necessário recorrer à derivação numérica dos dados experimentais para poder obter as tensões. A derivação dos valores experimentais amplifica possíveis erros de medida e conduz a oscilações intoleráveis nos resultados finais, o que implica o recurso a rotinas de amaciamento no tratamento prévio dos resultados das medições. Como no método dos Elementos Finitos grande parte do tempo de cálculo é dedicado à determinação dos deslocamentos, é possível utilizar os valores provenientes da experimentação e desta forma reduzir o tempo computacional envolvido na resolução de um problema. Esta combinação de ambas as técnicas permite afinar devidamente o modelo matemático de cálculo, ajustando o modelo de carregamento e as condições de fronteira no caso de se pretender enveredar pelo cálculo numérico, ou determinar as tensões a partir do cálculo sobre os deslocamentos experimentais, no caso de se escolher a técnica híbrida.

Ultrapassada a fase de desenvolvimento das técnicas interferométricas assiste-se agora à sua utilização nas mais diversas aplicações como são por exemplo o estudo de materiais, a análise estrutural e a medicina entre outros. É convicção do autor que o presente trabalho, realizado durante a montagem do Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, é pioneiro no nosso País na área das aplicações à análise estrutural e controlo não destrutivo. As várias técnicas apresentadas são aquelas que, sendo consideradas como mais relevantes para este tipo de aplicações, se encontram já disponíveis. Desta forma, ao elaborar esta tese considerou-se a possibilidade de futuros investigadores, mesmo sem formação em Mecânica Estrutural, poderem vir a utilizá-la para consulta.

1.2 Desenvolvimento do trabalho.

A apresentação das matérias desenvolvidas na presente tese está estruturada em oito capítulos, sendo neste primeiro capítulo (Introdução) feito o

enquadramento do tema e definidos os objectivos deste trabalho. Segue-se o segundo capítulo onde é apresentado um breve resumo com a notação e as equações normalmente utilizadas na análise de tensões em Mecânica dos Materiais. Embora se trate de relações bem conhecidas para os investigadores com experiência em Mecânica Estrutural, são aqui apresentadas prevendo a possibilidade deste trabalho vir a motivar investigadores de outras áreas. São também descritas sumariamente as técnicas clássicas de análise experimental de tensões disponíveis no LOME, sendo esta descrição ilustrada com algumas aplicações em que o autor participou durante a elaboração desta tese.

O terceiro capítulo é dedicado à apresentação das técnicas de interferometria holográfica e aos fundamentos da sua análise teórica. É feita uma resenha histórica que começa com a introdução do registo holográfico por Gabor na década de 40 e continua, após o aparecimento do *laser*, com os trabalhos de Leith e Upatnieks cerca de duas décadas depois. Este hiato é normalmente atribuido à ausência de uma fonte de luz coerente que permitisse alargar o campo de aplicação dos trabalhos desenvolvidos por Gabor com o intuito de aumentar a resolução do microscópio electrónico. Apresentam-se as equações que definem o vector sensibilidade para medições de deslocamentos no plano e fora deste, e referem-se os cálculos necessários à obtenção das três projecções do vector deslocamento a partir de três medições não colineares. Segue-se a descrição das técnicas que permitem aumentar a resolução da medida de uma ordem de grandeza (técnicas de modulação de fase) ou duas ordens de grandeza (técnicas heterodinas). A elevada resolução das técnicas heterodinas e a morosidade das medições, efectuadas por varrimento discreto ao longo do plano do holograma, implicam que esta técnica tenha grande sensibilidade a perturbações, sendo apenas utilizadas em aplicações laboratoriais. O terceiro capítulo termina com a descrição das técnicas da holografia Moiré que consistem na aplicação das técnicas de Moiré sobre registos holográficos para aumentar a gama de medida.

Dada a grande importância que o registo dos padrões de interferência em *video* tem vindo a adquirir nos últimos tempos o quarto capítulo é inteiramente dedicado a esta técnica. Designada por ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*), holografia-TV, holografia electro-óptica ou DSPI (*Digital Speckle Pattern Interferometry*), consoante os grupos que se dedicaram à investigação nesta técnica e reivindicam contribuições importantes no seu desenvolvimento, o registo electrónico dos padrões de interferência permitiu substituir o moroso processo fotográfico e tornar a utilização das técnicas de interferometria holográfica mais expedita. É também apresentada uma resenha histórica desta

técnica, referindo os vários interferómetros envolvidos e as diferentes formas de realizar a referência. Os parâmetros de ajuste dos sistemas utilizados nas aplicações desta técnica e as suas limitações são também referidos.

O quinto capítulo é dedicado às aplicações das técnicas de interferometria holográfica ao estudo de fenómenos dinâmicos. Começando com o estudo de fenómenos de baixa velocidade, este capítulo termina com a descrição de procedimentos aplicáveis à análise de fenómenos transitórios, como é exemplo o estudo da propagação de uma onda de flexão numa placa submetida ao impacto de um corpo rígido. São também referidas algumas técnicas que, aplicadas nas medições em tempo médio, permitem aumentar a resolução da medida e determinar a fase do movimento sinusoidal. Por último são referidas as técnicas de modulação de fase e de modulação de amplitude, fazendo uma referência à utilização destas últimas com *lasers* de emissão pulsada.

As técnicas híbridas são o assunto tratado no capítulo seis. É feita uma introdução às técnicas numéricas de análise de tensões, descrevendo sumariamente o Método das Diferenças Finitas, os Métodos Semi-Analíticos e o Método dos Elementos Finitos. Para este último são apresentadas as formulações estática e dinâmica, referindo as variáveis envolvidas em cada uma delas. São depois introduzidas as técnicas híbridas aplicadas à Mecânica dos Sólidos, descrevendo também a sua utilização no ajuste das condições de fronteira e como auxiliares na substruturação de problemas de determinação de tensões. Estão ainda englobadas neste capítulo as técnicas de determinação do campo de deslocamentos a partir de medições discretas efectuadas sobre os registos holográficos e as técnicas de modulação de fase que permitem obter directamente a distribuição do campo de deslocamentos ao longo de uma área. São apresentadas algumas rotinas para o amaciamento numérico de resultados experimentais contendo erros e o seu efeito sobre o cálculo das derivadas da função deslocamento.

No sétimo capítulo são descritas algumas aplicações das técnicas de interferometria holográfica no campo da mecânica estrutural e análise não destrutiva. No primeiro trabalho apresentado é determinada a deformação de uma placa em consola recorrendo à interferometria holográfica em tempo real. A análise dos resultados obtidos é efectuada com recurso a rotinas de processamento de imagem, quer para efectuar medições discretas dos deslocamentos, quer recorrendo a rotinas de determinação de fase para obter a distribuição espacial dos deslocamentos. Os valores obtidos são comparados com os resultados da aplicação do Método dos Elementos Finitos ao mesmo problema. No segundo trabalho é

utilizada a técnica de ESPI para realizar o mesmo estudo sobre uma placa circular submetida a uma pressão uniformemente distribuida numa das suas faces. Segue-se a aplicação desta técnica no estudo da deformação de uma tampa de distribuição de um motor automóvel durante a montagem de um vedante (motor RENAULT 1100 cm^3). Os valores experimentais foram utilizados no ajuste de uma malha de elementos finitos destinada a optimizar a geometria por forma a obter a máxima rigidez do componente.

A aplicação que se segue consiste na utilização das técnicas de interferometria holográfica em dupla exposição no estudo comparativo da deformação durante a operação de corte de duas guilhotinas hidráulicas com diferentes geometrias. Este trabalho foi realizado directamente no local de fabrico das máquinas (instalações fabris da A. Dias Ramos, Máquinas Ferramentas Lda. ADIRA). Os registos holográficos de dupla exposição foram reconstruidos em laboratório e analisados com recurso a programas de processamento de imagem.

Segue-se a utilização das técnicas de ESPI na análise modal de algumas estruturas de geometria simples sendo os resultados comparados com os obtidos numericamente. É também apresentada a análise modal do componente de um motor automóvel referido anteriormente. Os resultados obtidos foram utilizados para ajustar uma malha de elementos finitos destinada à análise modal deste componente e comparados com os obtidos por uma análise modal realizada com recurso às técnicas clássicas. Esta aplicação termina com um ensaio de pressão e intensimetria acústica efectuada sobre o motor de um automóvel possuindo o componente estudado que provam a contribuição deste componente no ruído produzido pelo motor.

Este capítulo termina com a aplicação de um sistema de registo electrónico com referência de *speckle* (granitado), vulgarmente designado por *Shearography*, à detecção de defeitos em materiais compósitos. Esta técnica tem vindo a ter uma crescente aplicação em testes não-destrutivos destes materiais, existindo actualmente disponíveis alguns sistemas comerciais desenvolvidos para este fim.

Por fim inclui-se um oitavo capítulo onde se apresentam as conclusões do presente trabalho e se indicam pistas para futuros trabalhos de investigação a realizar nesta área.

CAPÍTULO 2

2. A ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

2.1 Introdução

2.2 Tensões e deformações

2.2.1 Conceito de tensão num ponto
2.2.2 Conceito de deformação num ponto
2.2.3 Relações entre tensões e deformações
2.2.4 Equações de compatibilidade

2.3 Técnicas clássicas de análise experimental de tensões

2.3.1 A Extensometria
2.3.2 A Fotoelasticidade
2.3.3 As técnicas de *Moiré*
2.3.4 Outras Técnicas

Referências

CAPÍTULO 2

2. A ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

2.1 Introdução

A Análise Experimental de Tensões tem como principal objectivo a determinação experimental do estado de tensão em meios sólidos. Esta área de Engenharia tem carácter interdisciplinar e revela-se de grande utilidade quer na validação de novos modelos de cálculo quer na construção de soluções híbridas obtidas pela sua combinação com modelos analíticos conhecidos. Recorrendo ao estudo experimental da distribuição de tensões em elementos estruturais é possível obter soluções em problemas de difícil tratamento teórico, melhorar soluções analíticas já existentes ou validar novas técnicas numéricas de análise estrutural.

Para a determinação do estado de tensão num ou vários pontos de um componente estrutural foram sendo desenvolvidas ao longo dos tempos várias técnicas experimentais que, aplicadas em modelos ou directamente em protótipos, permitem medir as tensões à custa de outras grandezas facilmente convertíveis a partir do conhecimento das propriedades dos materiais envolvidos e das relações de escala. Diferindo nos padrões de medida, nas grandezas e no carácter da medição, que pode ser pontual ou global, existem hoje múltiplas técnicas experimentais, pelo que é possível escolher aquela que melhor se adapta a cada tipo de aplicação.

A construção cuidada dos modelos, a selecção dos materiais garantindo semelhança com os utilizados nas estruturas reais, o processo fastidioso de

recolha e análise das medidas, exigindo normalmente pessoal qualificado e o elevado preço dos equipamentos, fazem com que a análise experimental seja normalmente dispendiosa e, por isso, só desenvolvida nas Universidades, laboratórios estatais ou empresas de grande dimensão.

O aparecimento dos computadores na década de sessenta veio aumentar enormemente a capacidade de cálculo facilitando o recurso aos modelos matemáticos já conhecidos para, de uma forma menos dispendiosa e mais expedita, obter a distribuição de tensões em componentes estruturais. A necessidade de desenvolver novos modelos matemáticos e validar as soluções numéricas contribuiu para que o interesse pelas técnicas experimentais fosse mantido, quer na procura de novas técnicas, quer no desenvolvimento de novos métodos de recolha e análise de resultados.

Com estes meios de cálculo foi possível o desenvolvimento de modelos matemáticos com destaque para o método dos elementos finitos (MEF) que, na análise de tensões em estruturas, permite excelentes resultados mesmo em situações de alguma complexidade.

Na aplicação dos elementos finitos, os componentes são modelados por um conjunto de elementos que os discretizam. As cargas aplicadas aos componentes e as ligações ao exterior são simuladas por funções matemáticas. Do número de elementos envolvidos na discretização depende o rigor do resultado que será tanto mais próximo da solução exacta quanto maior for o número destes. O aumento do número de elementos, refinamento da malha, conduz a discretizações que envolvem o manuseamento de maior quantidade de informação, aumentando assim o tempo de processamento e o seu custo. A escolha das funções matemáticas para modelar, quer as ligações ao exterior, quer os carregamentos, condiciona também o rigor do resultado. Desta forma, na maioria das aplicações, é indispensável a comparação das soluções obtidas com resultados de reconhecida credibilidade aferindo assim o desempenho do modelo matemático.

Com a descoberta do L.A.S.E.R. [1] (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - laser*, termo consagrado na designação deste tipo de radiação) ficou disponível uma nova fonte de radiação luminosa que, pelas suas caracteristícas de coerência e largura de banda de emissão, tornou possível a aplicação das técnicas de interferometria na Análise Experimental de Tensões e noutras áreas da Mecânica Experimental. Utilizando o comprimento de onda da luz como padrão, estas técnicas, permitem efectuar medições de caracter global,

com elevada precisão, sobre superfícies sem qualquer preparação prévia e não necessitando de qualquer contacto físico.

O crescimento exponencial da indústria de componentes de electrónica tornou possível a divulgação dos microcomputadores com elevada capacidade de cálculo e do *hardware* para aquisição e processamento de informação. Este equipamento, aplicado na recolha e análise dos resultados obtidos na exprimentação, permite tratar com facilidade grandes quantidades de informação com apresentação de resultados de forma gráfica que pode ser facilmente analisada.

O aparecimento de novos materiais, apresentando combinações de propriedades pouco vulgares nos materiais de construção tradicionais e substituindo-os com vantagem em muitas aplicações, exigiu o desenvolvimento de métodos de análise de tensões que permitissem a sua caracterização e pudessem contribuir para o desenvolvimento de novos modelos de cálculo.

As técnicas híbridas de análise de tensões resultam da associação dos métodos experimentais com os métodos numéricos [2]. A utilização conjunta de ambas as técnicas permite, de forma interactiva, ajustar as condições de fronteira, optimizar o refinamento da malha, verificar a aplicabilidade de simplificações devidas a simetria e afinar o modelo matemático por forma a poder ser utilizado para obtenção de soluções com intervalos de tolerância conhecidos. O desenvolvimento das técnicas híbridas tem provado que a coexistência das técnicas experimentais e numéricas é desejável, na medida que aumenta consideravelmente as capacidades da análise estrutural.

2.2 Tensões e deformações

2.2.1 Conceito de tensão num ponto

A maior parte dos materiais usados em construção possui, em maior ou menor grau, a propriedade física designada por elasticidade. Esta propriedade caracteriza a capacidade de um corpo, dentro de determinados limites, retomar a sua forma e dimensões primitivas depois de retiradas as forças que o deformaram. Quando sobre um corpo elástico actua um sistema de forças, este

deforma-se, desenvolvendo um sistema de forças interiores que depende da sua geometria, das suas propriedades físicas e satisfaz o teorema da energia de deformação mínima.

Em grande parte das aplicações de Engenharia Estrutural são envolvidos materiais que podem ser considerados homogéneos, isto é, por menor que seja o elemento de volume considerado este conserva todas as suas propriedades físicas características. Esta propriedade não é verificada pelos materiais compósitos os quais, como o nome indica, apresentam uma estrutura mista. A isotropia, propriedade que caracteriza os materiais que apresentam as mesmas características físicas segundo qualquer direcção, é também muito comum nos materias de construção, embora não seja verificada em compósitos nem em metais submetidos a determinados processamentos tecnológicos, como por exemplo: laminagem e embutidura.

As forças, cuja acção sobre os corpos provoca tensões, dividem-se basicamente em dois tipos: forças de superfície e forças de volume. As primeiras actuam directamente sobre as superfícies e são transmitidas por contacto, enquanto as forças de volume actuam sobre toda a massa do corpo. São exemplo destas últimas as forças resultantes da acção de campos como por exemplo: a força gravítica, a força electromagnética e a força centrífuga. As forças de volume são normalmente de menor grandeza e, por isso, o seu efeito é frequentemente desprezado em relação às forças de superfície, sem com isso introduzir erros apreciáveis.

Considere-se um corpo elástico, homogéneo e isotrópico, em equilíbrio estático sob a acção de um sistema de forças $F_1,F_2,...,F_n$, como se representa na figura 2.1. À acção do conjunto das forças exteriores corresponde o desenvolvimento de um sistema de forças no interior do corpo que, respeitando o teorema da energia mínima [3], garante a situação de equilibrio. Para analisar a distribuição das forças internas, admite-se que o corpo é seccionado pela superfície mn, definida pela sua normal exterior $\vec{n}$, e são mantidas as forças exteriores. A manutenção da situação de equilibrio da parte seleccionada implica o aparecimento de um sistema de forças internas distribuidas ao longo de toda a secção. Considerando apenas a área elementar ΔA em torno do ponto P, obtém-se para resultante das forças interiores actuantes nessa área a força $\Delta\vec{f}_n$. A orientação da resultante geralmente não coincide com a direcção da normal exterior à secção nesse ponto.

A tensão em P, designada por $\vec{T}_n$, é obtida tomando o limite para que converge a razão $\Delta\vec{f}_n$ / ΔA quando se faz tender ΔA para zero. $\vec{T}_n$ tem a direcção

de $\Delta\vec{f}_n$ e pode ser projectada segundo as direcções normal e paralela à superfície de corte. A projecção perpendicular à secção é designada por tensão normal e representa-se por σ enquanto à projecção paralela se dá o nome de tensão de corte e é representa por τ [4].

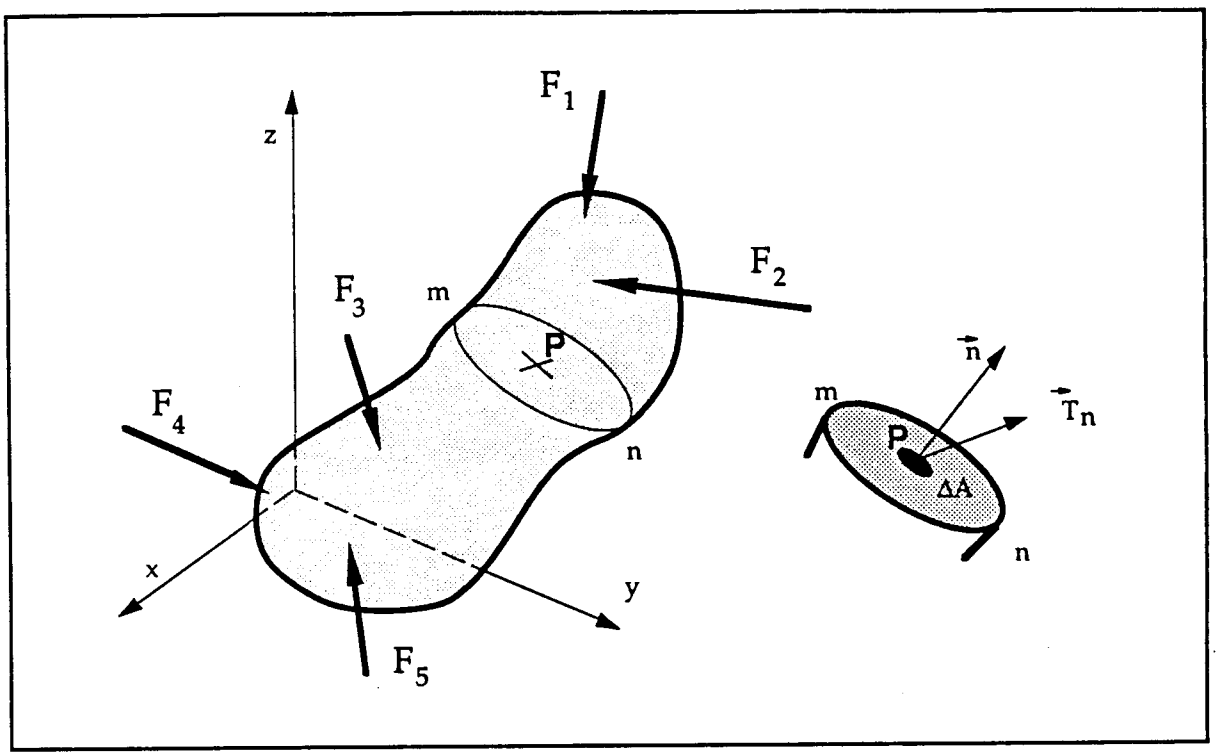


Figura 2.1 Referencial e corpo com indicação da secção e do sistema de forças.

Centrado em P pode ser definido um elemento de volume dV com lados dx,dy e dz infinitamente próximos. Cada face pode ser tomada como sendo uma secção efectuada no corpo cuja normal é definida por cada um dos eixos. Projectando a tensão resultante em cada uma das faces elementares segundo esse referencial obtém-se a matriz tridimensional de tensão para o ponto P que se representa na figura 2.2

As faces visíveis na figura 2.2 são designadas por faces positivas sendo as faces opostas designadas por faces negativas. São consideradas positivas todas as tensões normais que actuando numa face positiva tenham o sentido positivo do eixo correspondente à normal exterior a essa face, ou actuando numa face negativa tenham o sentido negativo do mesmo eixo. Existem três tensões normais que são normalmente designadas por σ_{xx}, σ_{yy} e σ_{zz}.

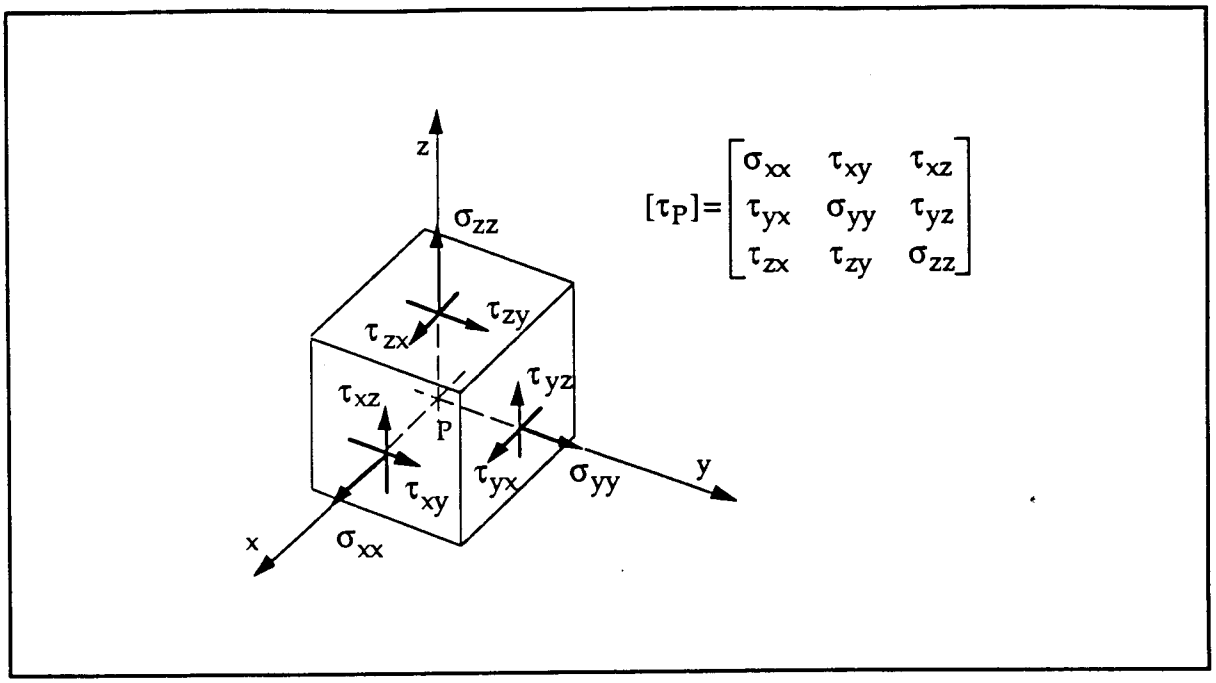


Figura 2.2 Matriz de tensão num ponto e sua representação num elemento de volume.

A projecção da tensão segundo o plano paralelo à superfície conduz ao aparecimento de duas tensões de corte em cada face, segundo os eixos perpendiculares ao eixo que define a face. Estas tensões são representadas por τ_{ij} em que o primeiro indíce se refere ao eixo normal à face onde actua a tensão e o segundo indica a direcção desta. A matriz de tensão num ponto inclui seis tensões de corte: τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yx}, τ_{yz}, τ_{zx} e τ_{zy} cujos sentidos positivos são determinados como para as tensões normais, isto é, serão positivas as tensões de corte que actuando na face positiva têm o sentido positivo do eixo que tem a mesma direcção e as que actuando nas faces negativas têm o sentido negativo do eixo. Todas as tensões representadas no figura 2.2 são positivas.

O estabelecimento das equações de equilibrio de forças, para o elemento de volume considerado, conduz às equações diferenciais de equilibrio de tensões [4]:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z}+F_x=0\\
&\frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z}+F_y=0\\
&\frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z}+\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}+F_z=0
\end{aligned} \qquad (2.1)$$

onde Fx, Fy e Fz representam as forças de volume. As equações de equilibrio de momentos conduzem às relações de igualdade entre as tensões de corte que convergem numa mesma aresta, isto é:

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} \qquad (2.2)$$

Como a tensão num ponto depende da orientação da secção é possível definir planos de corte cuja normal exterior tenha direcção coincidente com a tensão. Nestes planos, designados por planos principais, as tensões de corte são nulas e o módulo das tensões normais é estacionário. Em cada ponto é possível definir três planos mutuamente perpendiculares onde só existem tensões normais. As direcções perpendiculares a estes planos são designadas por direcções principais e às tensões é atribuida a designação de tensões principais. A estas tensões correspondem os valores estacionários das tensões normais e são representadas por σ_1, σ_2 e σ_3, com $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

Conhecidas as três direcções principais ficam também determinadas três direcções mutuamente perpendiculares, cada uma delas num plano perpendicular e orientada por forma a que os ângulos com as direcções principais nesse plano sejam de 45°, e às quais correspondem secções com os valores estacionários das tensões de corte: $(\sigma_1 - \sigma_2)$, $(\sigma_2 - \sigma_3)$ e $(\sigma_3 - \sigma_1)$

Um estado de tensão particularmente importante e muito frequente é o chamado estado plano de tensão, assim conhecido por serem nulas todas as componentes da matriz de tensão que envolvem uma das direcções. Este estado de tensão existe na superfície livre dos corpos quando sobre ela não são aplicadas forças e, se considerarmos que o eixo z é perpendicular à superfície, corresponderá a uma matriz de tensão com valores nulos para σ_z, τ_{zx} e τ_{zy}.

2.2.2 Conceito de deformação num ponto

Quando um corpo elástico é sujeito à acção de um sistema de forças exteriores sofre uma deformação, alterando a posição relativa dos seus pontos, até recuperar a situação de equilibrio. O movimento de cada ponto pode ser representado por um vector deslocamento com origem na posição inicialmente ocupada pelo ponto e com a extremidade na posição por este ocupada após

deformação. Cada vector deslocamento pode ser representado por três componentes u, v e w segundo as direcções dum triedro de referência previamente definido.

O movimento de um corpo pode ser decomposto num movimento de corpo rígido mais um movimento relativo das particulas do corpo umas em relação às outras. Enquanto num movimento de corpo rígido o corpo se desloca sem alterar a sua forma, a variação das distâncias relativas entre os seus pontos implica a sua deformação com eventual alteração de forma. Como os movimentos de corpo rígido não produzem tensões não são considerados na mecânica dos sólidos deformáveis.

Uma classificação homóloga da que foi usada na caracterização das tensões normais e de corte é habitualmente adoptada para as deformações. A deformação normal ou linear é definida como sendo a razão entre a variação de comprimento de um segmento de recta unindo dois pontos e o comprimento inicial desse segmento. A deformação de corte é definida como sendo a variação ângular originalmente ortogonal.

Para o estabelecimento das relações entre deslocamentos e deformações pode considerar-se que um elemento de volume dV com dimensões infinitésimais dx, dy e dz se deforma como se representa na figura 2.3. Se o paralelipípedo elementar sofrer uma deformação definida pelo vector deslocamento (u,v,w), assumindo que estas quantidades são muito pequenas e variam continuamente ao longo do volume do corpo, o deslocamento do ponto A, adjacente de P, será dado por:

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \qquad (2.3)$$

tomando apenas os termos até á primeira ordem em dx.

Sendo $(\partial u/\partial x)dx$ o aumento sofrido pela função u com a variação da coordenada x, a variação de comprimento (elongação ou deformação linear) do elemento PA devido à deformação é $(\partial u/\partial x)dx$. Desta forma a deformação unitária, ou deformação linear segundo a direcção x será a razão entre a variação de comprimento e o comprimento inicial, representa-se por ε_x e é determinada por $(\partial u/\partial x)$. Da mesma forma se obtêm as deformações lineares segundo os eixos y e z, isto é:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \qquad (2.4)$$

Se, por uma questão de facilidade, for considerada a projecção do elemento de volume no plano 0xy a distorção do ângulo entre os dois segmentos de recta PA e PB pode ser calculada a partir dos deslocamentos dos pontos P, A e B. Ao ponto P corresponde o vector deslocamento (u,v,w), o segmento PA sofre uma rotação em torno de z dada por $\partial v/\partial x$ e a rotação do segmento PB será $\partial u/\partial y$.

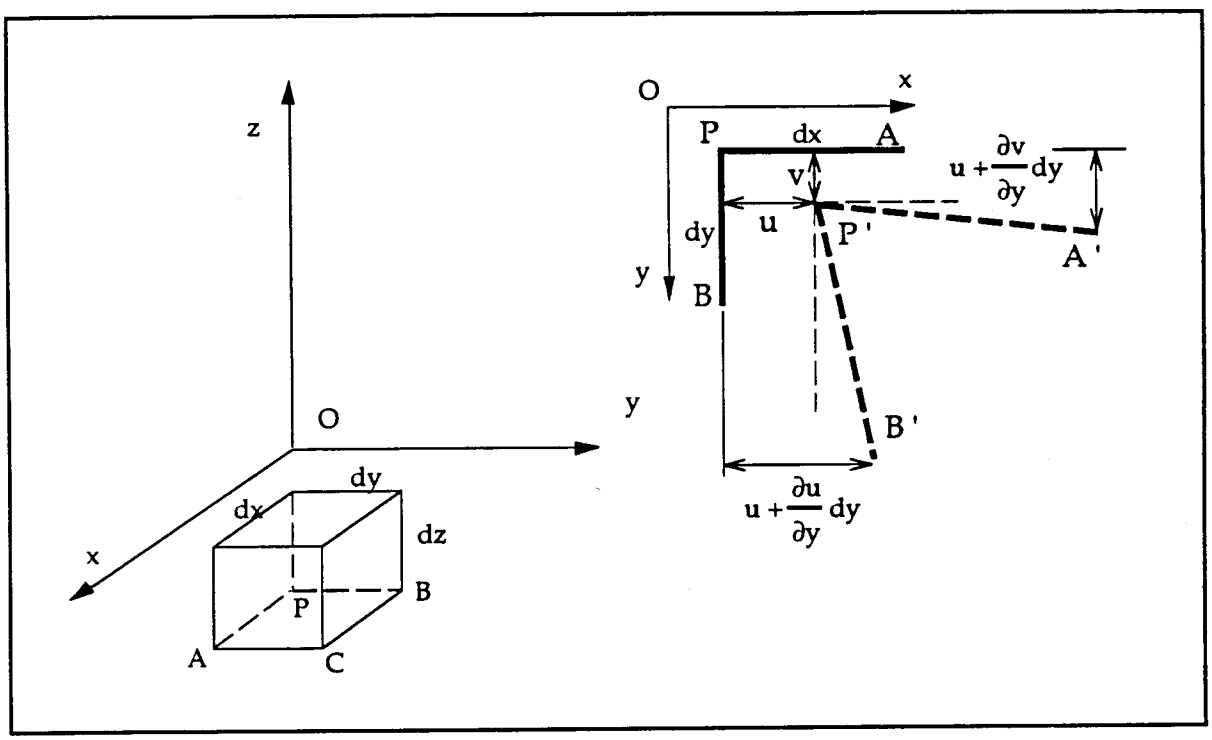


Figura 2.3 Definição das elongações e das distorções a partir da deformada de um cubo elementar.

Desta forma a variação relativa do ângulo (distorção ou deformação de corte) entre os dois segmentos será determinada pela soma das duas contribuições. Utilizando também as projecções nos planos 0xz e 0yz obtêm-se todas as deformações de corte que são determinadas por:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}; \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \qquad (2.5)$$

As deformações lineares serão representadas por ε_i e as deformações de corte por γ_{ij} sendo atribuido a i e j o mesmo significado que tinham na representação das tensões 2.2.1. A cada ponto fica assim associado um estado de deformação, caracterizado pela respectiva matriz de deformação:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \qquad (2.6)$$

Tal como nas tensões, em cada ponto é sempre possível identificar três direcções perpendiculares segundo as quais as deformações apresentam valores estacionários.

2.2.3 Relações entre tensões e deformações

A qualquer estado de tensão está sempre associado um estado de deformação que se relaciona com aquele através de um conjunto de relações lineares que são normalmente designadas por lei de Hooke e envolve um conjunto de constantes elásticas que caracterizam o meio físico onde está instalado. Tomando um elemento de volume paralelipipédico de material isotrópico, com as faces paralelas aos eixos de um referencial ortogonal, e submetendo-o a uma tensão normal uniformemente distribuida ao longo de duas faces opostas verifica-se que, dentro de determinados limites, a tensão e a deformação são proporcionais. A constante de proporcionalidade entre a tensão normal e a deformação linear num estado uniaxial de tensão é designada por módulo de elasticidade ou módulo de Young e representa-se por E. A expressão que traduz esta proporcionalidade é:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \qquad (2.7)$$

onde σ_x representa a tensão axial e ε_x a deformação linear na mesma direcção. A extensão do elemento de volume segundo a direcção axial é acompanhada pela sua contracção nas duas direcções perpendiculares de acordo com a relação:

$$\varepsilon_y = -\nu\frac{\sigma_y}{E} \tag{2.8}$$

onde a constante ν é designada por coeficiente de Poisson, sendo as equações 2.7 e 2.8 também válidas em compressão. Tratando-se de materiais contínuos e isotrópicos, numa situação tridimensional, a lei de Hooke conduz a um conjunto de equações 2.9, [4] que relacionam as tensões com as deformações e envolvem os parâmetros elásticos préviamente definidos; módulo de Young e coeficiente de Poisson. Nestas expressões a constante E/2(1+ν) é designada por módulo de rigidez e traduz a proporcionalidade entre as tensões e as deformações de corte. Esta constante é normalmente representada por G.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E}\left[\sigma_{xx} - \nu\left(\sigma_{yy} + \sigma_{zz}\right)\right] \\
\varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E}\left[\sigma_{yy} - \nu\left(\sigma_{zz} + \sigma_{xx}\right)\right] \\
\varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E}\left[\sigma_{zz} - \nu\left(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}\right)\right] \\
\gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy} \\
\gamma_{yz} &= \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{yz} = \frac{1}{G}\tau_{yz} \\
\gamma_{zx} &= \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{zx} = \frac{1}{G}\tau_{zx}
\end{aligned} \tag{2.9}$$

2.2.4 Equações de compatibilidade

Partindo de qualquer campo de deslocamentos é sempre possível obter de forma unívoca o campo de deformações que lhe está associado. Contudo, um

campo de deformações fixado de forma arbitrária pode não ser fisicamente aceitável, isto é, pode conduzir a um campo de deslocamentos a que corresponda o aparecimento de vazios ou descontinuidades no interior do corpo. A continuidade do campo de deslocamentos é garantida se as componentes da matriz de deformação satisfizerem um conjunto de equações designadas por equações de compatibilidade. As equações de compatibilidade são um conjunto de equações diferenciais de segunda ordem envolvendo as deformações lineares e de corte e são representadas da seguinte forma [4]:

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} \\
&\frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} = \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} \\
&\frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x} = \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} \\
&2\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z}\right) \\
&2\frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x} = \frac{\partial}{\partial y}\left(-\frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x}\right) \\
&2\frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial z}\left(-\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y}\right)
\end{aligned}
\qquad (2.10)
$$

Para a interpretação física destas equações considere-se um corpo plano constituido por um conjunto de elementos rectangulares. Submetendo o corpo à acção de forças exteriores os diversos elementos que o constituem deformam-se de modo a manter a continuidade do corpo. A deformação de cada elemento pode ser obtida derivando o campo de deslocamentos. Considerando o problema inverso, isto é, partindo de um conjunto de elementos já deformados tomados separadamente, só é possível reconstruir o corpo inicial se as deformações dos vários elementos respeitarem as equações de compatibilidade, condição necessária e suficiente.

2.3 Técnicas clássicas de análise experimental de tensões

2.3. 1 A Extensometria

Uma das técnicas clássicas de análise experimental de tensões é a extensometria. Nesta técnica o levantamento do estado de tensão em pontos da superfície do corpo é feito a partir da medição directa dos deslocamentos/deformações. Os transdutores normalmente utilizados são designados por extensómetros e permitem medir o deslocamento entre dois pontos préviamente fixados segundo uma direcção bem definida. O deslocamento medido é amplificado e, por vezes, convertido na variação de outra grandeza por forma a facilitar a sua medição [5]. Uma das caracteristícas essenciais do extensómetro é o seu comprimento de referência ou comprimento de sonda, que condiciona a sua utilização. O deslocamento medido é sempre a integração do deslocamento ao longo desse comprimento pelo que, em zonas de elevados gradientes de deformação, este comprimento deverá ser o menor possível.

Como foi definida em 2.2.2 a deformação linear ε_i é obtida tomando dois pontos sobre uma recta paralela à direcção i e dividindo a variação da distância entre esses pontos pela distância inicial. Se numa superfície forem conhecidas as direcções principais, a medição da deformação principal segundo uma dessas direcções pode ser feita tomando dois pontos sobre essa direcção e medindo o seu deslocamento relativo. Neste caso a deformação linear é calculada por:

$$\varepsilon_i = \frac{l_f - l_o}{l_o} = \frac{\Delta u}{\Delta x} \qquad (2.11)$$

em que l_o é o comprimento inicial de referência e l_f é o comprimento após deformação. O valor obtido para ε_i não é exacto pois a sua determinação é feita a partir de uma distância finita, sendo o erro envolvido dependente do valor de l_o e do gradiente da função deslocamento. Admitindo que o valor calculado para a deformação é atribuido ao ponto médio do segmento de recta de comprimento l_o o erro envolvido para os diferentes gradientes de deformação pode ser facilmente calculado [6]. Se a deformação é constante ou apresenta um gradiente linear ao

longo da direcção i o erro cometido é nulo. Para uma variação quadrática da deformação dada por:

$$\varepsilon_x = k_1 x^2 + k_2 x + k_3 \tag{2.12}$$

onde k_1,k_2 e k_3 são constantes, a deformação linear medida será:

$$\varepsilon_x = \frac{\int_0^{l_o} \left(k_1 x^2 + k_2 x + k_3\right) dx}{l_o} \tag{2.13}$$

A deformação no ponto médio x= $l_o/2$ é calculada por 2.11 e vale,

$$\varepsilon_x = \frac{k_1 l_o^{\,2}}{4} + \frac{k_2 l_o}{2} + k_3 \tag{2.14}$$

pelo que o erro cometido na medição de ε_x é dado por:

$$\Delta\varepsilon = \frac{k_1 l_0^2}{12} \tag{2.15}$$

Neste exemplo o valor do erro está dependente da constante k_1 e do comprimento de referência l_o. Se k_1 tiver um valor elevado o erro será significativo caso não seja usado um comprimento de referência suficientemente reduzido. Outras situações poderiam ser analisadas, envolvendo funções de tensão de grau superior ao segundo. Contudo, da dependência do erro do comprimento de referência utilizado, conclui-se que quanto mais este se aproximar da medição pontual maior é a garantia de rigor da medida. Esta condição é válida em qualquer campo de deformações pois, no limite, a medição pontual corresponde à derivada no ponto.

O estado de deformação num ponto é completamente caracterizado pelas seis componentes da matriz de deformação ou, alternativamente, pelas três deformações principais e as respectivas direcções. No caso particular de um ponto sobre uma superfície, estado plano de tensão, é possível caracterizar completamente o estado de deformação a partir do conhecimento de duas deformações principais no plano tangente à superfície nesse ponto e das suas direcções. A direcção normal é uma direcção principal de deformação e o seu

valor pode ser calculado a partir do estado de tensão na superfície. Obtendo sobre a superfície as componentes do campo de deslocamentos e utilizando as equações 2.4 e 2.5 bem como as equações 2.9 é possível calcular a matriz de tensão para qualquer ponto nela situado.

Como as deformações normalmente são quantidades muito pequenas, a redução do tamanho do comprimento de referência acarreta a diminuição do transdutor utilizado, o extensómetro, o que implica o fabrico de peças mecânicas de reduzidas dimensões com tolerâncias tão apertadas que torna a sua construção proibitiva. A utilização de transdutores mecânicos com partes móveis limita a sua aplicação em situações dinâmicas. A existência de folgas e a inércia das peças em movimento introduzem erros que podem mascarar completamente as leituras.

Em meados do século XVIII William Thomson, mais tarde conhecido por Lord Kelvin, descobriu que certos metais variam a sua resistência eléctrica quando submetidos a uma deformação. Este efeito foi, em meados deste século, aproveitado para construir aquele que é hoje o transdutor mais divulgado para a medição de deformações, o extensómetro de folha metálica. Com um tamanho menor do que o de um selo de correio e uma espessura de alguns centésimos de milímetro, este transdutor é colado sobre as superfícies nos pontos onde se pretende medir a deformação. Integrado num circuito eléctrico, vulgarmente num ramo de uma ponte Wheatstone, este transdutor converte a deformação da superfície numa diferença de tensão eléctrica que, após uma calibração apropriada, conduz à tensão mecânica. O seu pequeno tamanho e o facto de ficar intimamente colado às superfícies permite a sua aplicação fiável na medição de tensões dinâmicas.

Como a sensibilidade dos extensómetros de folha é normalmente orientada segundo uma direcção bem definida o levantamento do estado de deformação num ponto obriga à utilização de, no caso mais geral, três extensómetros próximos e orientados segundo direcções não paralelas. Este conjunto de extensómetros é designado por roseta e pode ser obtido comercialmente em várias configurações e tamanhos [7].

O carácter pontual da medida faz com que esta técnica obrigue à utilização de grande número de transdutores para fazer o levantamento do estado de tensão numa superfície , ver figura 2.4, ou em alternativa, à utilização de uma técnica preliminar para detecção das zonas de maiores gradientes de tensão com vista a seleccionar as zonas a instrumentar.

O acessório tubular, toroide, representado na figura 2.4 foi estudado para levantamento das tensões longitudinais e circunferenciais ao longo de uma secção recta. A solicitação utilizada consistiu na aplicação de um momento flector fora do plano de curvatura do toroide. Não tendo qualquer informação prévia sobre as direcções principais de tensão, o acessório foi instrumentado com sete rosetas de três extensómetros a 45°. Os pontos de medida seleccionados distribuem-se ao longo de meio perimetro da secção recta situada no plano de simetria transversal do toroide. Para a aquisição das medidas foi utilizada uma ponte P-3500 da *Vishay* e três caixas de comutação SB-30, do mesmo fabricante, com capacidade para dez canais cada. Trata-se de um equipamento portátil, próprio para trabalho de campo, que inclui uma ponte de Wheatstone para cada um dos dez canais, um amplificador e um *display* onde, após ajuste de acordo com os parâmetros do extensómetro em uso, se lê directamente o valor da deformação.

Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os resultados numéricos obtidos com um programa de Elementos Finitos como se pode ver na figura 2.5. Nesta figura representam-se os valores das tensões obtidos numericamente ao longo da geratriz do acessório bem como as medições discretas efectuadas com extensometria.

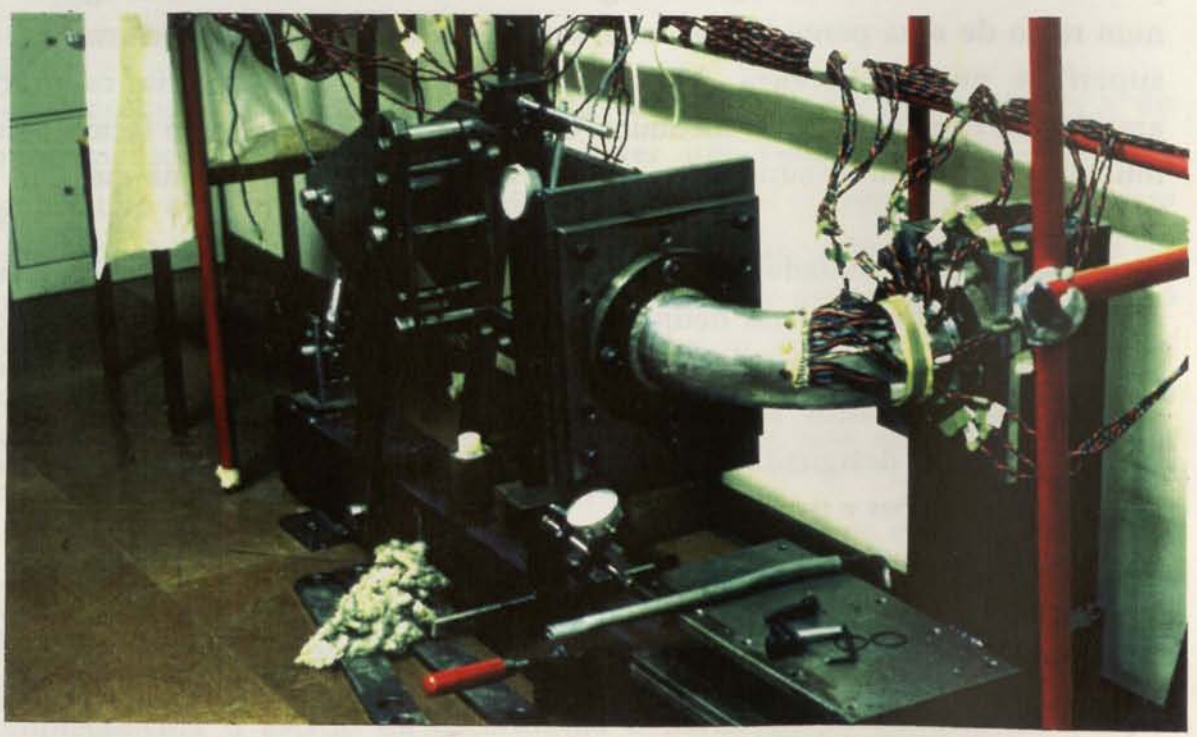


Figura 2.4 Acessório tubular instrumentado para ensaio de extensometria.

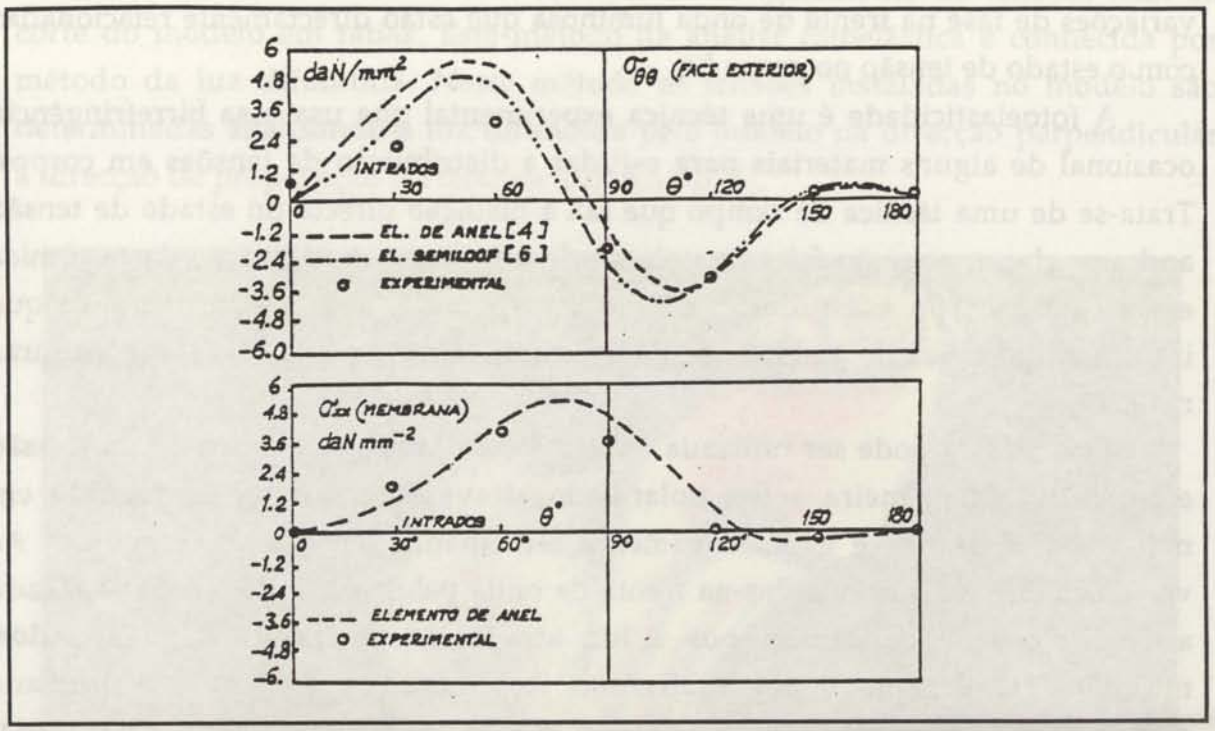


Figura 2.5 Comparação da distribuição de tensões ao longo da parede da secção obtida numéricamente e resultante de medições experimentais por extensometria [8].

A divulgação dos sistemas de aquisição de dados instaláveis nos barramentos dos microcomputadores torna possível a sua utilização na aquisição das medidas facilitando as medições com extensometria. Desta forma é possível efectuar medições em problemas dinâmicos utilizando múltiplos canais de leitura rápida. O registo das medidas sob a forma digital permite o seu pós processamento imediato em computador, o que facilita a análise dos resultados obtidos.

2.3.2 A Fotoelasticidade

Alguns materiais transparentes alteram o seu indíce de refracção quando submetidos a um estado de tensão. Esta anisotropia óptica é conhecida por birrefringência acidental ou ocasional e consiste na variação proporcional do índice de refracção com a tensão aplicada. Qualquer frente de luz polarizada que atravesse o material será transmitida a velocidades diferentes que dependem das

tensões principais e das direcções principais de tensão. São assim introduzidas variações de fase na frente de onda luminosa que estão directamente relacionadas com o estado de tensão no corpo [9].

A fotoelasticidade é uma técnica experimental que usa essa birrefringência ocasional de alguns materiais para estudar a distribuição de tensões em corpos. Trata-se de uma técnica de campo que faz a medição directa do estado de tensão ao longo de uma secção feita no volume de um corpo. A utilização desta técnica exige que o corpo a estudar, além de transparente, seja birrefringente o que introduz limitações no âmbito da sua utilização directamente sobre as estruturas reais.

Esta técnica pode ser utilizada em duas configurações distintas: transmissão e reflexão. Na primeira a luz polarizada atravessa o modelo construido em material fotoelastico e geométricamente semelhante à estrutura a estudar. As variações de fase introduzidas na frente de onda pelo campo de tensões aplicado ao modelo são analisadas após a luz atravessar um segundo polarizador, normalmente designado por analisador. A segunda configuração é utilizada directamente em protótipos aos quais é colada uma fina camada de material birrefringente com espessura constante. Para a colagem é utilizada uma mistura de cola com pó de aluminio que permite obter uma superfície reflectora, não despolarizante. A luz difundida, após atravessar duas vezes o revestimento, é detectada de modo semelhante em ambas as configurações. A fotoelasticidade de reflexão é a que mais se adapta ao estudo de estruturas reais, existindo equipamentos portáteis que permitem a sua utilização em estaleiro, enquanto a fotoelasticidade de transmissão, pelas limitações que impõe, só é utilizável laboratorialmente.

Para analisar componentes tridimensionais com a fotoelasticidade de transmissão são construídos modelos das estruturas a uma escala conveniente em materiais birrefringentes susceptíveis de dupla cura. Os modelos são obtidos por vazamento dos materiais enquanto líquidos. Após a primeira cura são desenformados e submetidos a uma segunda cura em ambiente controlado e na presença das cargas que se pretendem estudar. A segunda cura "congela" o estado de tensão aplicado o que permite seccionar o modelo em fatias e analisar cada uma delas. Na figura 2.6 está representado o padrão de franjas isocromáticas obtido na análise fotoelástica tridimensional de um modelo de um fémur humano.

Quando um feixe atravessa um modelo fotoelástico sofre um espalhamento que permite a sua detecção noutras direcções além da direcção de propagação. A

utilização desta luz permite analisar a distribuição de tensões em modelos fotoelásticos tridimensionais sem recorrer ao congelamento de tensões nem ao corte do modelo em fatias. Este método de análise fotoelástica é conhecida por método da luz difundida. Neste método as tensões instaladas no modelo são determinadas analisando a luz difundida pelo modelo na direcção perpendicular à direcção de propagação do feixe de iluminação [6].

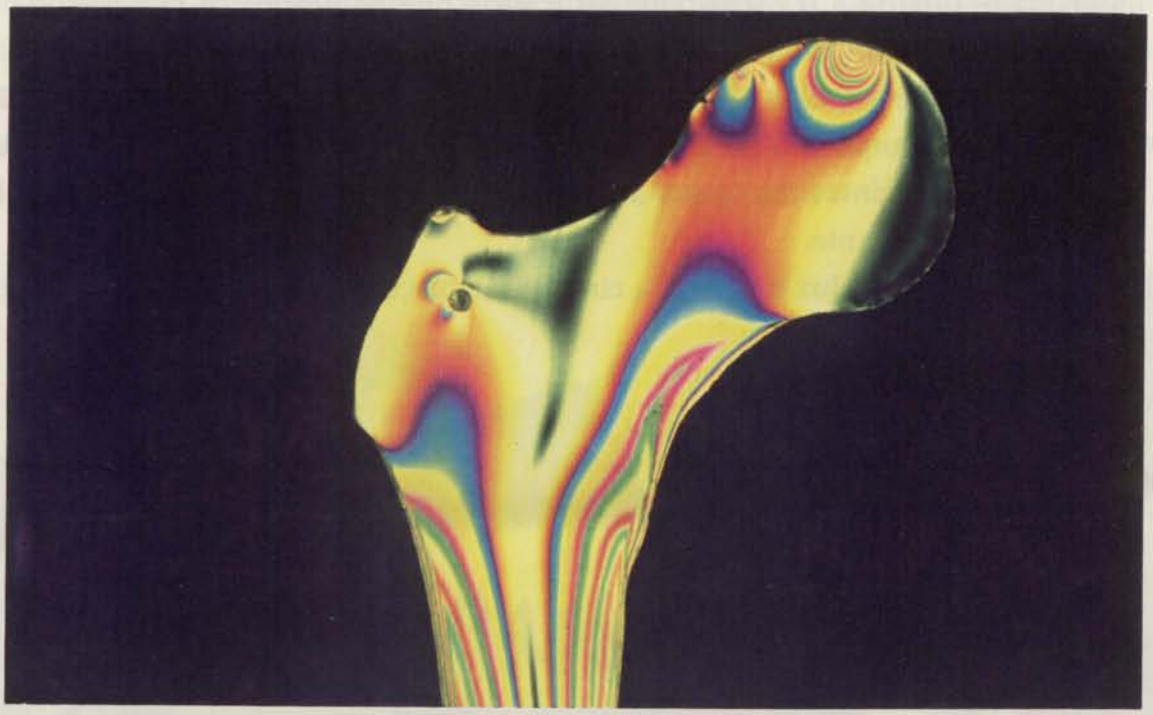


Figura 2.6 Padrão de isocromáticas obtido na análise por fotoelasticidade tridimensional de um modelo de um fémur humano [10].

Quer na fotoelasticidade de transmissão quer na fotoelasticidade de reflexão a informação contida na frente de onda após esta atravessar o analisador consiste num conjunto de zonas ao longo das quais a intensidade luminosa é constante. A anulação de intensidade luminosa depende da polarização da luz utilizada e é o resultado da codificação das direcções principais de tensão, franjas isoclínicas, e máxima tensão de corte no plano perpendicular à direcção de propagação, franjas isocromáticas, se a luz for polarizada plana, e apenas da máxima tensão de corte no plano se a luz for polarizada circular.

Utilizando luz polarizada plana, a distribuição de intensidade luminosa será descrita pela equação [6]:

$$I = K\text{sen}^2 2\alpha \,\text{sen}^2 \frac{\Delta}{2} \qquad (2.16)$$

nesta expressão, K é uma constante, α é o ângulo entre o eixo de polarização e uma das direcções principais de tensão e Δ é o desfasamento entre as duas frentes de onda que se propagam segundo os dois eixos principais. À anulação da intensidade devida a α correspondem franjas que se designam por isoclinícas e identificam o lugar geométrico dos pontos em que as direcções principais são paralela e perpendicular ao eixo de polarização da luz. Quando a anulação é devida a Δ as franjas são designadas por isocromáticas e correspondem ao lugar geométrico dos pontos em que a diferença entre as direcções principais no plano do modelo é constante.

Se for utilizada luz polarizada circular a equação 2.16 é substituida por [6]:

$$I = K\text{sen}^2 \frac{\Delta}{2} \qquad (2.17)$$

se o eixo do analisador for perpendicular ao eixo do polarizador, ou por [6]:

$$I = K\cos^2 \frac{\Delta}{2} \qquad (2.18)$$

se os eixos do analisador e do polarizador forem paralelos. Com luz polarizada circular a intensidade luminosa só é anulada devido à diferença de fase entre as frentes de onda que se propagam segundo as direcções principais. Em 2.17 obtêm-se as franjas em que essa diferença é um múltiplo inteiro de 2π, enquanto na segunda expressão são obtidas as diferenças de fase correspondentes a valores de Δ iguais a $(2n+1)\pi/2$ com n=0,1,2,...

No sentido de aumentar as capacidades de medição da fotoelasticidade foram desenvolvidos alguns métodos auxiliares que, alterando a posição relativa dos elementos ópticos ou utilizando acessórios, permitem aumentar a gama de medida; tais métodos são designados por métodos de compensação.

Os métodos de compensação aumentam a resolução da medida, por rotação do analizador no método de Tardy [11] ou por introdução de uma birrefringencia conhecida no método de Babinet [12].

Os métodos de multiplicação de franjas, utilizados com materiais de baixa sensibilidade, permitem aumentar o número de franjas sem variar a carga

aplicada, utilizando elementos semi-reflectores que obrigam a frente de onda a atravessar várias vezes o modelo [13], [14].

Como a informação contida nas isocromáticas se refere à diferença das tensões principais no plano da medida, que equivale à máxima tensão de corte nesse plano, foram desenvolvidos métodos que permitem obter separaradamente cada uma delas. No método da incidência oblíqua, único que permite medir directamente sobre o modelo cada uma das tensões, são utilizados prismas ópticos para medir a ordem da isocromática no mesmo ponto e em simultâneo segundo duas direcções de incidência distintas. Cada uma das tensões principais é calculada a partir dos valores obtidos na medição, tendo em atenção a espessura do modelo, o ângulo de incidência da luz e a constante fotoelástica do material.



Figura 2.7 Padrão de isocromáticas obtido da análise fotoelástica de uma engrenagem [15].

Como se trata de uma técnica de campo, o resultado das medições efectuadas em fotoelasticidade corresponde a uma distribuição espacial da grandeza medida, pelo que envolve grande quantidade de informação. A fotografia é uma das técnicas auxiliares de análise de resultados. Utilizando filmes com diferentes curvas HD e técnicas fotográficas como a dupla exposição, obtêm-se fotografias dos padrões de franjas que permitem o levantamento da distribuição de tensões. Como a informação está codificada em franjas a determinação da ordem da franja

associada a um ponto exterior obriga a recorrer a um método de compensação ou a uma interpolação linear entre as duas franjas mais próximas.

A divulgação dos sistemas de processamento de imagem integrados em computadores pessoais tornou disponível uma ferramenta poderosa para a análise de resultados. O processamento de imagem associado aos métodos de fase, descritos num outro capítulo desta tese, permitiu desenvolver programas numéricos de análise de imagem com os quais se obtém directamente a fase para qualquer dos pontos da área em observação [16].

2.3.3 As técnicas de *Moiré*

Por *Moiré* designa-se o fenómeno que ocorre quando duas redes espaciais com frequências muito próximas estão colocadas por forma que uma seja observada através da outra. É um fenómeno geométrico que resulta do efeito que o batimento entre as frequências espaciais das duas redes provoca sobre a luz [17]. As técnicas de *Moiré*, aplicadas na análise experimental de tensões, utilizam este fenómeno para medir os deslocamentos associados à deformação de uma superfície.

Nesta técnica de campo, as superfícies a estudar são codificadas por redes de fase ou amplitude (rede objecto) que, interrogadas por uma rede de referência com frequência convenientemente ajustada e mantida indeformável, conduzem ao aparecimento de padrões de franjas de baixa frequência directamente relacionáveis com as deformações ocorridas no objecto.

A resolução deste método depende da frequência espacial das redes utilizadas, enquanto a direcção de medida dependente da orientação. Se for utilizada como referência uma rede de linhas verticais alternadamente opacas e transparentes com passo p (passo designa a distância correspondente a um período da rede), tendo sido préviamente gravada no objecto uma rede de igual frequência, a cada franja de *Moiré* corresponderá um deslocamento da rede objecto cuja dimensão é um múltiplo do passo da rede e segundo a direcção perpendicular à rede de referência, como se representa na figura 2.8. Se a rede de referência for orientada paralelamente à direcção y será:

$$u(x) = N.p \qquad (2.19)$$

onde u(x) é o deslocamento segundo a direcção perpendicular à rede, p é o passo e N a ordem da franja no ponto. Se a rede objecto for uma quadricula com igual frequência nas duas direcções perpendiculares, uma rotação de 90° na rede de referência permite obter os deslocamentos na direcção y.

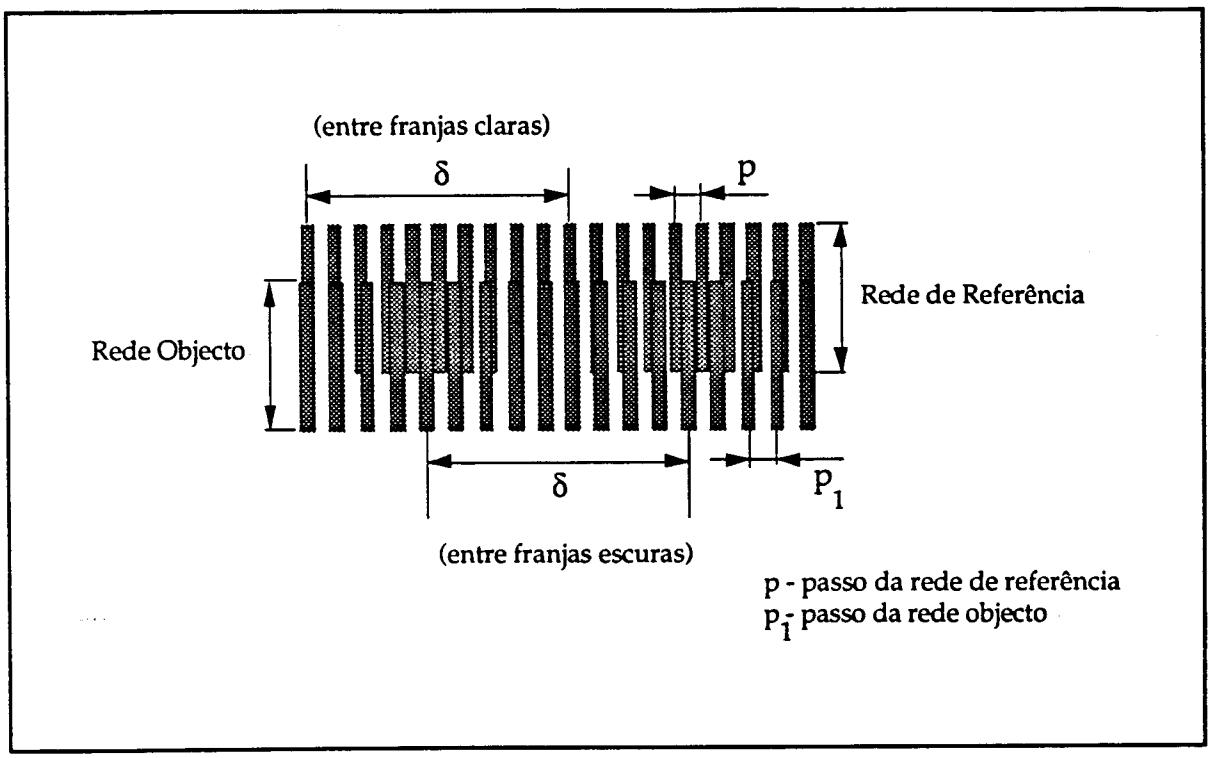


Figura 2.8 Formação das franjas de *Moiré*.

A utilização do *Moiré* geométrico tem como principal vantagem a sua simplicidade, sendo a sua resolução limitada pelo passo da rede. Fenómenos de difracção da luz não permitem a utilização de redes com frequências espaciais superiores a 40 linhas/mm. Com esta técnica, que não exige contacto físico com as superfícies em estudo, é possível estudar deformações com amplitudes que poderão ultrapassar o limite de cedência em ambientes hostis como é por exemplo o estudo da fluência de um material exposto a altas temperaturas. A utilização de pares de redes com frequências espaciais ligeiramente diferentes permite introduzir uma portadora na medida, aumentando-lhe a resolução e facilitando a interpretação dos padrões de franjas.

Substituindo a fonte de luz ordinária por um *laser*, radiação monocromática, polarizada e coerente, é possível criar no espaço uma rede de amplitude, como se representa na figura 2.9. Trata-se de uma rede sinusoidal

criada pela interferência entre dois feixes provenientes da mesma fonte de luz que existirá no espaço de sobreposição de ambos e terá uma frequência que depende do ângulo entre eles através da relação:

$$f=\frac{2}{\lambda}\text{sen}\,\alpha \qquad (2.20)$$

Nesta expressão f é a frequência espacial da rede, α é o ângulo entre cada um dos feixes e a normal à superfície e λ é o comprimento de onda da radiação coerente utilizada. Com este processo, variando o ângulo entre os feixes e utilizando como meio de registo substratos fotográficos de elevada resolução (como são por exemplo as placas holográficas), é possível obter redes com frequências espaciais que podem alcançar as 4000 linhas/mm. Se sobre a superfície do objecto, préviamente revestida por uma emulsão fotográfica, for gravada uma rede deste tipo, poderá utilizar-se como referência a frente de onda utilizada na sua gravação. Esta técnica, designada por interferometria *Moiré* [18], tem maior resolução que o *Moiré* puramente geométrico e pode também ser utilizada na medição de deslocamentos fora do plano. A natureza da rede de referência, composta por planos que existem no espaço de sobreposição dos feixes, faz com que esta técnica tenha uma boa profundidade de campo e não seja sensível a movimentos de translação do corpo na direcção paralela aos planos que definem a rede, ver figura 2.9.

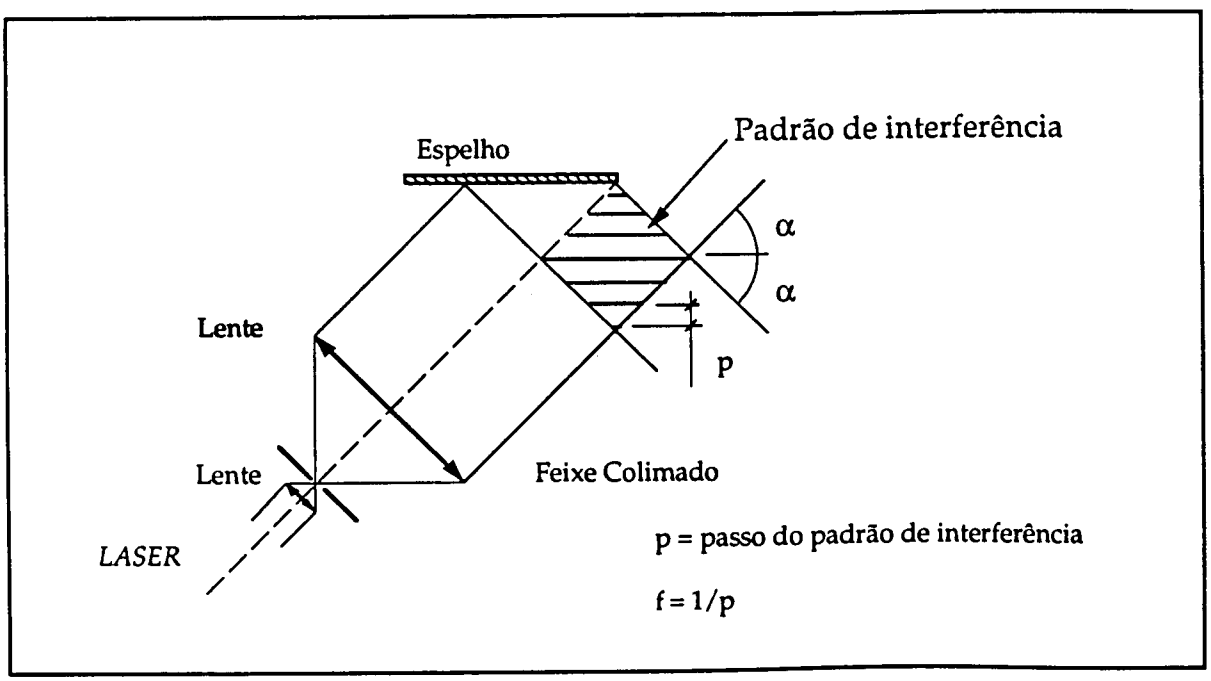


Figura 2.9 Rede de referência obtida por interferência com radiação coerente [18].

Na análise dos resultados podem utilizar-se técnicas de processamento de imagem. Recorrendo a filtragens no plano de Fourier para isolar as frequências portadoras da informação, é possível analisar directamente a deformada da rede objecto sem necessitar de uma rede de referência. Como a resolução desta técnica depende do passo da rede, é possível seleccionar aquela que melhor se ajusta a cada aplicação.

Esta técnica é ainda particularmente bem adaptada ao levantamento de formas geométricas tridimensionais sem contacto [19]. Projectando uma rede de amplitude sobre a superfície a medir, é possível obter a sua geometria através do processamento efectuado sobre as imagens da superfície codificada pela projecção da rede. A imagem obtida é descodificada para obter um conjunto de franjas que correspondem às curvas de nível da superfície. Na figura 2.10 representa-se um levantamento da topografia de uma superfície obtido com esta técnica. Existem disponíveis comercialmente sistemas que, utilizando triangulações e técnicas de modulação de fase, permitem obter a forma geométrica de um corpo tridimensional.

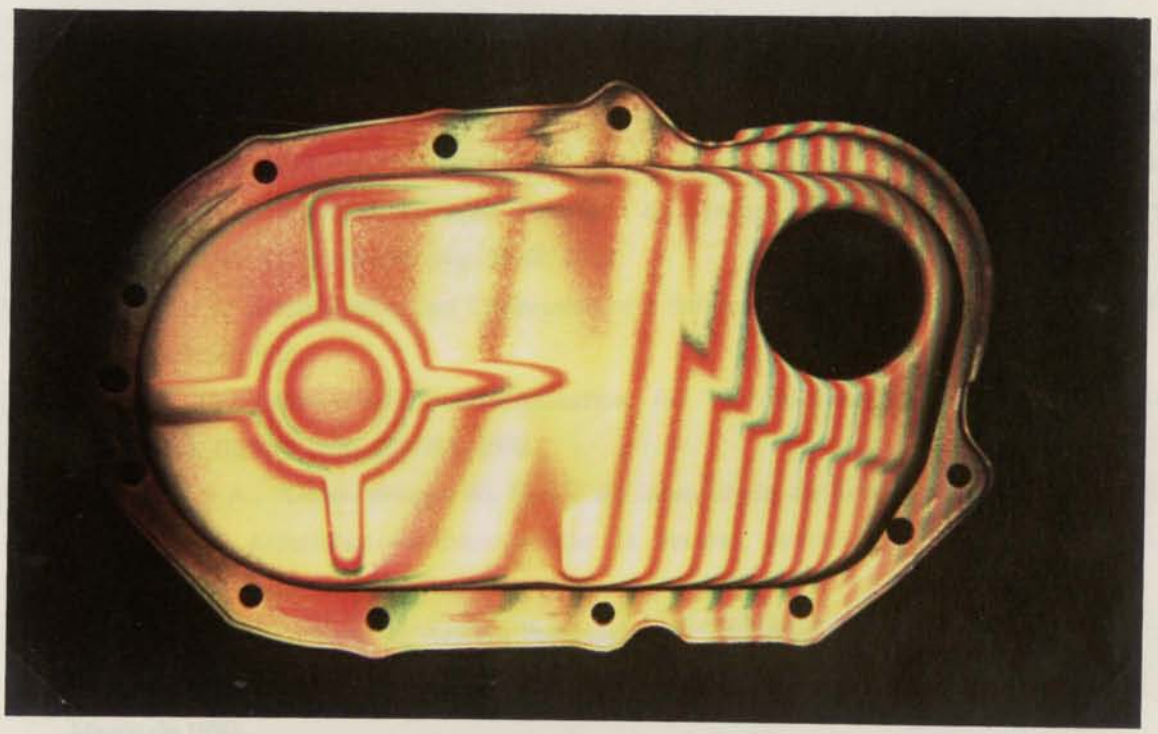


Figura 2.10 Técnicas de *Moiré* para determinação de forma (*Contouring*).

2.3.4 Outras Técnicas

Outras técnicas clássicas de análise experimental de tensões poderiam ainda ser referidas tais como: o método dos vernizes frágeis, caústicas,etc. No entanto não se pretende neste trabalho efectuar uma análise exaustiva de todas as técnicas experimentais, mas apenas referir de entre aquelas de que o LOME dispõe, as que foram utilizadas pelo autor durante a realização do presente trabalho.

Referências

[1] Mainman, T. H. , "Stimulated Optical Radiation in Ruby", Nature , Vol. 187, nº 4736, pág. 493-494, 1960.

[2] Gomes, J.F.S., "Análise Experimental de Tensões de Novo um Tema Actual", Proc. 2º Encontro Nacional sobre Análise Experimental de Tensões, LNEC, Lisboa 12 a14 Março de 1990, 2ºVol., pág.1-36.

[3] Araújo, F. C. ; "Elasticidade e Plasticidade", (edição do autor), Imprensa Portuguesa,1962.

[4] Timoshenko, S.P.; Goodier J.N., "Theory of Elasticity", McGraw-Hill Int. Book Co., 3ª edição, 1983.

[5] Hetényi, M.,"Handbook of Experimental Stress Analysis", John Wiley & Sons, New York, 1950.

[6] Dally, J.W.; Riley, W.F., "Experimental Stress Analysis", McGraw-Hill, Kogakusha, 2ª edição, 1978.

[7] Hottinger Baldwin Messtechnik, "Strain Gauges and Acessories", Cátalogo , 1993.

[8] de Melo, F.J.M.Q; Vaz, M.A.P.; Esteves, J.L.S.; Gomes, J.F.S. ;"Estudo Analítico e Experimental da Solicitação de Tubos Curvos de Parede Fina por Flexão Fora do Plano de Curvatura", 2ª Jornadas da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões. Lisboa 12 a 14 de Março de 1990.

[9] Frocht, M.M., "Photoelasticity", John Wiley & Sons, New York, Vol.1, 1941.

[10] Simões, J.A.O.; Chousal, J.A.G.; Vaz, M.A.P.; Costa, A.N.V.; "A Preliminary 3D Photoelastic Analysis of the Stress Distribution on a Proximal Femur", Proc. da Conferência "Recent Advances in Experimental Mechanics" (ed. Silva Gomes et al), pág. 1361-1367, Lisboa, 1994.

[11] Tardy, M.H.L., "Méthod Pratique d'examen de Mesure de la Biréfringence des Verres d'Optique ", Rev. Opt., Vol 8, pág. 59-69, 1929.

[12] Jerrard, H.G., "Examination and Calibration of a Babinet Compensator", J. Sci. Instrum, Vol. 27, pág. 62-66, 1950.

[13] Post, D. "Photoelastic-Fringe Multiplication: for Tenfold Increase in Sensitivity", Exp. Mech., Vol. 10, nº 8, pág. 305-312, 1970.

[14] Quinta, N.R.A., "Determinação do Factor de Intensidade de Tensão a partir de Medições Fotoelásticas Afastadas da Extremidade da Fenda", apêndice 2, Tese de Mestrado , Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994.

[15] Ribeiro, J.A.; Gonçalves, V.;"Análise Fotoelástica de uma Engrenagem de Dentado Recto", 2ª Jornadas da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões. Lisboa 12 a 14 de Março de 1990.

[16] Chousal, J.A.G., "Processamento de Imagem na Interpretação de Franjas Interferométricas em Análise Experimental de Tensões", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1991.

[17] Theocaris, P.S. "Moiré Fringes in Strain Analysis", Pergamon Press, New York, 1969.

[18] Post, D., "Moiré Interferometry", Cap. 7, Handbook of Experimental Mechanics, ed. A.S.Kobayashi, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1987).

[19] Gomes, A.O.S.; "Técnicas de Análise de Forma por Varrimento de um Feixe de Laser Modulado em Amplitude", Tese de Doutoramento,Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1989.

CAPÍTULO 3

3. TÉCNICAS DE INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA

3.1 **Introdução**

3.2 **Breve história da interferometria holográfica**

3.3 **A luz**

3.4 **Relações fundamentais**

3.5 **O holograma de Gabor**

3.6 **O holograma de Leith e Upatnieks**

3.7 **A interferometria holográfica**

3.8 **Medição de deslocamentos com interferometria holográfica**

3.9 **A interferometria holográfica com dupla referência**

3.9.1 Técnicas de modulação de fase
3.9.2 Técnicas Heterodinas

3.10 **A holografia*Moiré***

Referências

CAPÍTULO 3

3. TÉCNICAS DE INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA

3.1 Introdução.

A Interferometria Holográfica é uma técnica de Metrologia Óptica que consiste na medição de grandezas físicas a partir de variações de fase numa radiação luminosa coerente. Estas variações são detectadas pelo aparecimento de franjas de interferência resultantes da comparação de registos referentes a dois estados diferentes de um corpo. Uma das aplicações desta técnica é em Análise Experimental de Tensões, onde a sua utilização mais vulgar consiste na medição de campos de deslocamentos em superfícies de corpos sujeitos a deformação.

Utilizando uma radiação coerente para iluminar a superfície, é gravada a frente de onda difundida por esta, recorrendo à sua sobreposição com uma frente de onda de referência proveniente da mesma fonte de luz. Da sobreposição das duas frentes de onda coerentes resultam fenómenos de interferência, franjas primárias, que registam as distribuições espaciais de amplitude e fase. Estes registos contêm toda a informação sobre a frente de onda e permitem reconstrui-la integralmente quando iluminados com a mesma frente de onda de referência. Da comparação de dois registos, referentes a estados distintos de uma mesma superfície, resulta um padrão de franjas de interferência normalmente designadas por franjas secundárias. A análise destes padrões permite obter os deslocamentos da superfície com uma resolução da ordem do comprimento de onda da radiação utilizada.

Nos interferómetros ópticos utilizados na metrologia de superfícies a medição é efectuada por comparação da superfície a medir com uma superfície padrão. Neste caso, a selecção dessa superfície e dos elementos ópticos a utilizar deverá ser suficientemente cuidada por forma a evitar distorções nas frentes de onda que interfiram no resultado da medição. Na Interferometria Holográfica são comparados dois estados de uma mesma superfície, sendo a própria superfície a referência da medição da sua deformada. A qualidade dos componentes ópticos e a forma da frente de onda de referência não interferem no resultado final, desde que se mantenham constantes ao longo de todo o processo.

Sendo uma técnica de campo, não destrutiva e aplicável sem contacto físico sobre superfícies não preparadas préviamente, a Interferometria Holográfica tem tido uma cada vez maior aplicação na Análise Experimental de Tensões, principalmente em ensaios não destrutivos.

A informação presente no holograma pode ser utilizada quer para uma análise qualitativa da deformação sofrida pela superfície, quer para medições quantitativas dos deslocamentos. A medição quantitativa é normalmente realizada de forma discreta, o que torna o processo de medida fastidioso. A utilização de sistemas de processamento de imagem na análise dos resultados permite recolher e processar de forma expedita a elevada quantidade de informação presente em cada registo. Associando o processamento de imagem às técnicas de modulação de fase, é possível obter ficheiros numéricos de deslocamentos susceptíves de serem utilizados como entradas em programas numéricos de cálculos de tensões.

3.2 Breve história da Interferometria Holográfica.

Em 1960 Mainman [1] descobriu que excitando com um feixe de luz branca muito intenso um cristal de rubi (crómio em corindo), este emitia uma radiação monocromática com um comprimento de onda de 6943 Å. Esta radiação luminosa, obtida por emissão estimulada, apresenta caracteristícas de coerência que a distinguem da luz ordinária e foi designada por radiação L.A.S.E.R (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*- vulgarmente designada por *laser*). Com a descoberta do *laser* aumentou o interesse pelas técnicas de metrologia óptica, desenvolveram-se novos métodos e técnicas que exploram as

caracteristícas geométricas e ondulatórias desta radiação e retomou-se a investigação nas técnicas ópticas, onde a coerência da radiação é característica indispensável.

Dennis Gabor, em 1948 [2], havia proposto uma técnica de registo que permite gravar toda a informação presente numa frente de onda, isto é, as distribuições espaciais de amplitude e de fase. Nesta técnica, que Gabor designou por Holografia [3] (do grego *Holos* - o todo), a fase da frente de onda é gravada em modulações de amplitude resultantes da interferência com uma frente de onda de referência. Do registo obtido, o holograma, é possível recuperar a frente de onda inicial, utilizando apenas o feixe de referência utilizado na gravação. A necessidade de utilizar uma fonte de radiação coerente fez com que esta técnica não tivesse tido, nessa altura, uma grande divulgação. De referir que a fonte de luz coerente mais utilizada era a lâmpada de vapor de mercúrio que, com o auxilio de filtros, permitia um comprimento de coerência de apenas 0.03 a 0.2 mm. O reduzido comprimento de coerência da fonte de luz e a baixa resolução dos meios de registo de então apenas permitia a gravação de hologramas de objectos transparentes.

Com a descoberta do *laser*, com comprimentos de coerência que vão desde alguns centímetros até vários metros, ficou disponível a radiação ideal para esta aplicação. Leith e Upatnieks, em 1962 [4], retomaram as experiências de Gabor e pela primeira vez o registo e reconstrução da frente de onda foram explicados de acordo com a teoria das telecomunicações. Ao introduzirem uma portadora no registo da informação separaram espacialmente os termos com informação do termo de ordem zero, permitindo assim a gravação de hologramas de objectos difusos. Em 1963 [5] estes dois investigadores publicaram o primeiro artigo em que o feixe de referência e o feixe objecto não eram co-axiais e em 1964 [6] publicaram o primeiro holograma obtido por reflexão de objectos opacos tridimensionais.

Embora a Holografia deva parte da sua grande divulgação a ter sido encarada como curiosidade científica, devido à espectacularidade das imagens obtidas, alguns investigadores cedo se aperceberam das potencialidades desta técnica, nomeadamente em aplicações de metrologia óptica. Seguindo os trabalhos de Leith e Upatnieks, dois investigadores da mesma equipa publicaram em 1965 [7] [8] um trabalho sobre a aplicação da Holografia interferométrica ao estudo de vibrações. Nesse trabalho eram apresentadas imagens de padrões de franjas correspondentes aos diferentes modos próprios de um objecto de aluminio. Haines e Hildebrand, em 1966 [9], aplicaram pela primeira vez esta técnica ao

estudo de deformações estáticas e publicaram a fundamentação teórica da análise dos padrões de franjas obtidos.

Depois destes trabalhos pioneiros, muitos grupos de investigação se têm dedicado à utilização destas técnicas nos mais variados domínios, tendo esta descoberta permitido que Dennis Gabor fosse agraciado com o prémio Nobel da Física em 1971.

3.3 A Luz.

A natureza electromagnética da luz é conhecida desde o final do século XIX, devido ao trabalho de J. C. Maxwell. As leis da Electrodinâmica clássica permitem prever que a energia se propaga continuamente através de ondas electromagnéticas. Contudo, as interações electromagnéticas e os fluxos de energia podem também ser descritos como conjuntos de partículas elementares destituidas de massa, os fotões, que Max Planck designou por quanta de energia. A existência de fenómenos como a emissão e a absorção, que só o modelo quântico descreve consistentemente, fez com que as duas teorias acabassem por coexistir, sendo a luz explicada como consistindo de um fenómeno *dual* que apresenta caracteristícas de onda e caracteristícas de partícula.

Na maioria dos fenómenos ópticos são envolvidos fluxos de luz com energia suficiente para que não se manifeste a sua natureza discreta, pelo que é o modelo electromagnético aquele que melhor se ajusta à sua descrição. A interferência da luz é um dos fenómenos que melhor atesta a sua natureza ondulatória. Este fenómeno consiste na redistribuição espacial da densidade de energia na região de sobreposição de dois ou mais feixes de luz. A primeira descrição de fenómenos de interferência verificou-se no século XVII, tendo Boyle, Grimaldi e Hooke descrito pela primeira vez o aparecimento de franjas coloridas quando a luz é reflectida por placas transparentes de reduzida espessura. O primeiro estudo experimental detalhado deste fenómeno pertence a Newton [10], que estudou as franjas de interferência que se formam quando uma lente convexa é encostada a uma placa de vidro plana. Tais franjas são hoje designadas por anéis de Newton. Contudo, como Newton tinha aderido á teoria corpuscular, explicou este fenómeno admitindo a interação da luz com a matéria.

Os princípios fundamentais da interferência da luz como resultado da soma de oscilações luminosas foram formulados por Young [11] e depois

desenvolvidos por Fresnel [12], os quais podem ser considerados os fundadores da óptica ondulatória. A experiência da dupla abertura realizada por Young em 1802 confirma de uma forma simples o comportamento ondulatório da luz. Nesta experiência, uma fonte de luz é coberta por um alvo opaco onde existe um orifício de reduzidas dimensões. Com a fonte de luz pontual assim obtida é iluminado um segundo alvo provido de dois orifícios idênticos ao primeiro e separados de uma determinada distância. Obtêm-se assim duas fontes de luz pontuais que, na sua zona de sobreposição, criam um conjunto de franjas de interferência perfeitamente visíveis quando projectadas num alvo. Estas franjas, cujo número varia com a distância entre os orifícios, só existem quando a luz passa por ambos e não podem ser explicadas pela simples sobreposição das duas frentes de onda. De acordo com Young e Fresnel as franjas são devidas à soma das frentes de onda provenientes da mesma fonte de luz tendo em atenção as respectivas fases.

A natureza ondulatória da luz ficou definitivamente consagrada nas equações propostas por Maxwell para descrever a teoria electromagnética. Apoiando-se em trabalhos anteriores realizados por Oersted, Faraday e Henry sobre as relações entre electricidade e magnetismo, Maxwell concluiu que a luz é uma perturbação electromagnética que se propaga sob a forma de ondas a uma velocidade finita que, no vazio, tem um valor aproximado de $3x10^8 m/s$.

Uma onda electromagnética corresponde à propagação simultânea de um campo eléctrico e um campo magnético perpendiculares que variam sinusoidalmente em fase. Para descrever a propagação de uma onda electromagnética, Maxwell propôs as seguintes equações:

$$\nabla^2 E=\mu_o\varepsilon_o\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad ; \quad \nabla^2 B=\mu_o\varepsilon_o\frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \tag{3.1}$$

onde E e B representam, respectivamente, os campos eléctrico e magnético, ε_0 é a permitividade eléctrica do vazio ($\varepsilon_0 = 8.8542.10^{-12}\ C^2\ N^{-1}\ m^{-2}$), μ_0 é a permeabilidade do vazio ($\mu_0 = 4\pi.10^{-7}\ Ns^2\ C^{-2}$), t é o tempo e o operador ∇^2 corresponde a:

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2} \tag{3.2}$$

No presente trabalho é utilizada a teoria ondulatória, pelo que a luz será considerada uma onda electromagnética que se propaga num determinado meio óptico com uma velocidade finita. A razão entre a velocidade de propagação da luz no vazio e a velocidade de propagação nesse meio é designada por índice de refracção do meio, é sempre superior à unidade e é normalmente representada por n.

3.4 Relações fundamentais.

A propagação de uma onda electromagnética implica a existência de um campo eléctrico e de um campo magnético perpendiculares entre si, vibrando em fase e permanentemente perpendiculares à direcção de propagação. Como na maior parte dos fenómenos ópticos envolvidos na Interferometria Holográfica é o campo eléctrico que é alterado na interacção entre as várias ondas de luz, o campo magnético será omitido nas equações utilizadas para a descrição destes fenómenos. O espectro visível é uma reduzida parte do espectro electromagnético, pelo que todas as expressões desenvolvidas para descrever a emissão e propagação da luz são válidas para o restante espectro electromagnético e *vice-versa*.

A teoria proposta por Joseph Fourier, hoje conhecida por teoria de Fourier, permite exprimir qualquer onda como uma soma de funções trignométricas, pelo que uma onda de luz monocromática, isto é, com uma só frequência, pode ser descrita por uma função do tipo:

$$\vec{E}(x,y,z,t)=\vec{a}(x,y,z)\cos\left(\omega t+\varphi(x,y,z)\right) \qquad (3.3)$$

nesta expressão $\vec{E}(x,y,z,t)$ é o vector campo eléctrico para um determinado ponto do espaço (x,y,z) e instante t, ω é a frequência angular da oscilação, $\vec{a}(x,y,z)$ é a amplitude do vector e $\varphi(x,y,z)$ é a fase inicial para esse ponto. A frequência angular ω pode ser relacionada com a frequência ν, o período T, o comprimento de onda λ e a velocidade de propagação da luz no meio óptico em causa v, pelas relações:

$$\omega=2\pi\nu=\frac{2\pi}{T}=\frac{2\pi\nu}{\lambda} \tag{3.4}$$

Uma onda de luz é também caracterizada pelo seu vector de onda $\vec{k}$, o qual tem uma direcção coincidente com a direcção de propagação e, num meio com isotropia óptica, é sempre perpendicular à frente de onda. Por frente de onda é designada a superfície ao longo da qual a fase é constante e, no caso da propagação em meios homogéneos, corresponde também a superfícies de igual amplitude. Quando as superfícies de igual fase são planos, a frente de onda é designada por plana. Embora tais frentes de onda sejam aquelas cujo tratamento analitíco é mais simples, revelam-se de grande importância se admitirmos que qualquer frente de onda pode ser obtida pelo somatório de várias frentes de onda planas, cada uma com a sua amplitude e direcção de propagação própria.

Admitindo uma frente de onda plana S a propagar-se num meio isotrópico e homogéneo, como se representa na figura 3.1, tendo fase δ na origem e no instante t=0, o valor da fase no ponto P, pé da perpendicular a S que passa pela origem, será determinado pela expressão:

$$\varphi(P)=\delta-\frac{2\pi l}{\lambda} \tag{3.5}$$

onde λ é o comprimento de onda da luz e l é a distância OP. A quantidade $2\pi/\lambda$ é o módulo do vector de onda $\vec{k}$ e será designado por k. Qualquer ponto P sobre a superfície S terá um vector de posição $\vec{r}$ que pode ser relacionado com l da seguinte forma:

$$l=\vec{r}\cdot\vec{n} \qquad \text{com} \qquad \vec{n}=\frac{\vec{k}}{k} \tag{3.6}$$

sendo $\vec{n}$ o versor da direcção de propagação da onda. A equação (3.5) pode ser substituida por :

$$\varphi(P)=\delta-\frac{2\pi}{\lambda}(\vec{r}\cdot\vec{n})=\delta-\vec{r}\cdot\vec{k} \tag{3.7}$$

e a equação (3.3), no caso de uma onda plana, pode ser substituída por

$$\vec{E}(r,t)=\vec{a}\left(\vec{r}\cdot\vec{k}\right)\cos\left(\omega t+\delta-\vec{r}\cdot\vec{k}\right) \tag{3.8}$$

Quando a direcção de propagação coincide com um dos eixos coordenados, por exemplo o eixo z, $\vec{r}.\vec{k}= z\,k$ a equação (3.8) pode ainda ser substituída por:

$$\vec{E}(r,t)=\vec{a}(z)\cos(\omega t+\delta-r\cdot z) \qquad (3.9)$$

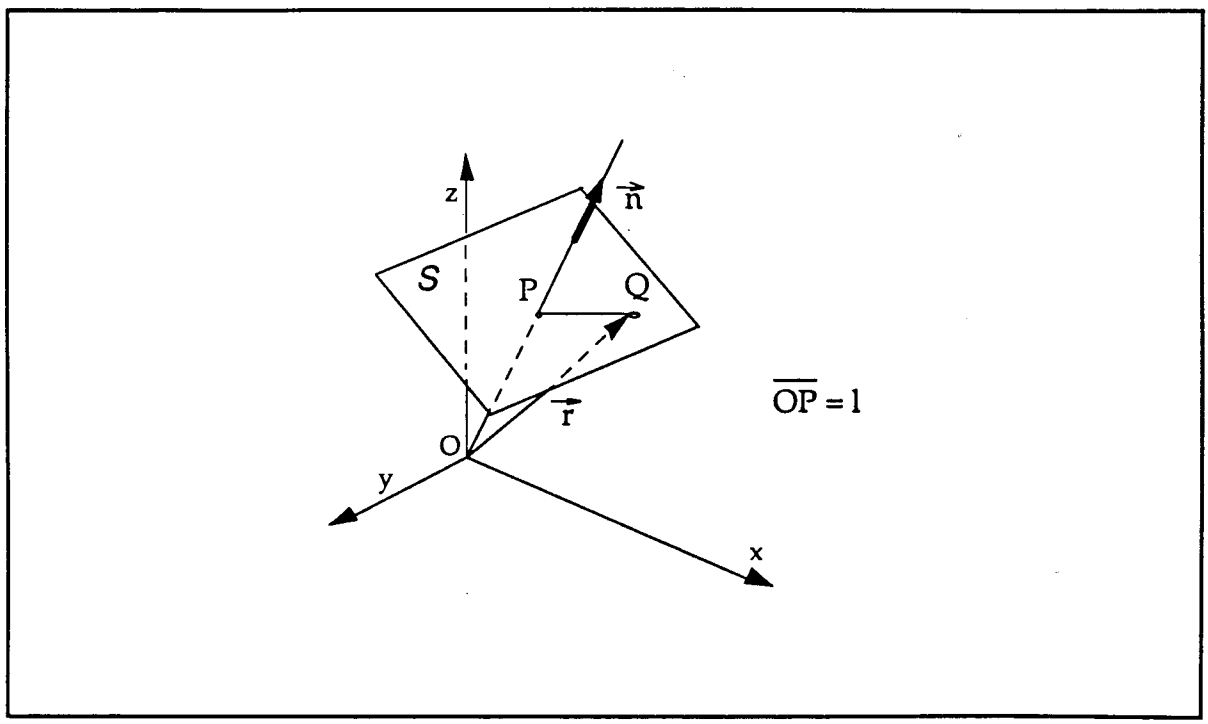


Figura 3.1 Representação esquemática de uma frente de onda plana.

De igual forma, uma frente de onda esférica emanando de uma fonte de luz pontual centrada na origem (ponto 0), terá todos os pontos situados a uma distância r do ponto 0 com a mesma fase e a equação (3.3) para este caso será:

$$\vec{E}(r,t)=\vec{a}(r)\cos(\omega t+\delta-r\cdot k) \qquad (3.10)$$

Uma frente de onda luminosa é completamente caracterizada pela sua amplitude, comprimento de onda, fase, polarização e direcção de propagação. A velocidade v relaciona-se com a frequência ν e o comprimento de onda λ através da relação:

$$v=\nu\lambda \qquad (3.11)$$

Quando, ao longo da direcção de propagação, o vector campo eléctrico é restringido na sua orientação, a frente de onda é designada por polarizada. Se a sua orientação se mantém constante a frente de onda é polarizada plana. A polarização poderá ainda ser circular quando o vector descreve uma hélice cilíndrica, sendo a polarização elíptica utilizada para designar qualquer polarização entre estas duas situações extremas.

Uma propriedade da luz muito importante para a sua aplicação em Interferometria Holográfica é a coerência. Esta propriedade mede a capacidade de interferência de uma determinada radiação e está intimamente ligada com a largura da banda de emissão da fonte de luz que a produziu. Se uma fonte ideal emitir pontualmente uma onda luminosa com uma só frequência, a diferença de fase $\Delta\phi$ entre qualquer par de pontos fixos, tomados ao longo da direcção de propagação, é independente do tempo. Define-se assim a coerência temporal ou longitudinal da radiação. De igual forma, qualquer par de pontos fixos situados num plano perpendicular à direcção de propagação terá uma diferença de fase independente do tempo, se a radiação luminosa for espacialmente coerente. A coerência espacial é também designada por coerência transversal.

Embora nos modelos teóricos seja admitido que a uma fonte de luz monocromática corresponde uma só frequência, na realidade as emissões de luz são efectuadas numa determinada largura de banda. A coexistência de várias frequências reduz a coerência da radiação, pelo que o comprimento de coerência das fontes de luz reais não é infinito. Na tabela 3.1 estão representadas várias fontes de luz coerente com os respectivos comprimentos de coerência máximos $d_{máx}$.

A acção de uma onda luminosa sobre os detectores de radiação é normalmente quantificada pela sua intensidade, valor médio da densidade de fluxo energético integrada ao longo de um determinado intervalo de tempo. Do cálculo da intensidade conclui-se que esta é proporcional ao quadrado da amplitude do vector campo eléctrico [14], o que pode ser traduzido por:

$$I \propto [a(x,y,z)]^2 \qquad (3.12)$$

sendo, por isso, os detectores normalmente designados por quadráticos. Estes detectores não têm capacidade para reconhecer a fase.

Fonte	λ (nm)	ν (THz)	Δν	d máx.
Luz branca	400 - 600	700 - 450	250 THz	< 1 μm
Laser iónico multimodo	515	482	10 GHz	1 cm
Lâmpada de mercúrio	546	550	300 MHz	30 cm
Díodo laser monomodo	780	380	50 MHz	2 m
Laser de He-Ne (monomodo)	633	473	1 MHz	100 m
Laser de He-Ne estabilizado	633	473	50 KHz	2 Km

λ – comprimento de onda da radiação
ν – frequência
Δν – largura da banda de emissão
d máx. - comprimento de coerência

Tabela 3.1 [13].

A adopção da notação complexa para representar as ondas de luz permite separar a dependência temporal da dependência espacial. As operações envolvendo funções trigonométricas são substituidas por operações com exponênciais, o que na maior parte dos casos conduz a equações de mais fácil tratamento, pelo que, será essa a notação utilizada neste trabalho. A representação complexa de uma onda de luz pode ser obtida através da expressão seguinte:

$$\vec{E}(x,y,z,t)=\vec{a}(x,y,z)e^{-i\varphi(x,y,z)}e^{-i\omega t}=\vec{A}(x,y,z)e^{-i\omega t} \qquad (3.13)$$

onde na quantidade $\vec{A}(x,y,z)$, designada por vector amplitude complexa, está incluida toda a dependência espacial. Desta forma a intensidade de uma onda luminosa passa a ser obtida por:

$$I=\vec{E}\cdot\vec{E}^{*}=EE^{*}=\vec{A}\vec{A}^{*}=AA^{*} \qquad (3.14)$$

onde o asterisco indica o complexo conjugado.

Quando, num meio óptico, se propagam simultâneamente várias ondas luminosas obtém-se, de acordo com o princípio da sobreposição, um campo resultante que pode ser descrito por:

$$\vec{E}(x,y,z)=\vec{A}e^{-i\omega t}=e^{-i\omega t}\sum_{j=1}^{n}\vec{A}j \qquad (3.15)$$

Desta expressão resulta óbvio que, no caso de todas as ondas luminosas envolvidas terem a mesma frequência, é possível isolar o termo dependente do tempo. O vector campo eléctrico resultante pode ser obtido da soma dos vários vectores amplitude complexa. Para a situação particular de todos os vectores serem paralelos, situação comum quando se usa luz polarizada plana, o resultado final pode ser obtido por simples adição algébrica das várias amplitudes complexas, isto é, tendo em atenção as respectivas fases. Como na maior parte das situações referidas neste trabalho os vectores envolvidos são paralelos, o sinal de vector será omitido.

Considerem-se duas ondas luminosas monocromáticas e com frentes de onda planas a propagarem-se segundo duas direcções que fazem entre si um angulo α, como se representa na figura 3.2. Admitindo que são ambas polarizadas planas e têm como direcção de polarização a perpendicular ao plano da figura é possível obter a distribuição de intensidade na zona de sobreposição utilizando a expressão (3.14). Desta forma, se as ondas forem representadas por:

$$\vec{A}_1=\vec{a}_1 e^{-i\left(\delta_1-\vec{r}\cdot\vec{k}_1\right)} \quad e \quad \vec{A}_2=\vec{a}_2 e^{-i\left(\delta_2-\vec{r}\cdot\vec{k}_2\right)} \qquad (3.16)$$

a intensidade resultante na zona de sobreposição será dada por:

$$I(r)=A(\vec{r})A^{*}(\vec{r})=a_1^2+a_2^2+2a_1a_2\cos\left[\vec{r}\cdot\left(\vec{k}_1-\vec{k}_2\right)-\left(\delta_1-\delta_2\right)\right] \qquad (3.17)$$

Da análise da expressão (3.17) pode concluir-se que a intensidade total varia periodicamente. A redistribuição espacial da intensidade, devida a fenómenos de interferência entre as duas ondas, conduz a um conjunto de pontos onde a intensidade é máxima (antinodos) que corresponde:

$$\vec{r}\cdot\left(\vec{k}_1-\vec{k}_2\right)-\left(\delta_1-\delta_2\right)=2m\pi \qquad \text{com } m=0,1,2,\ldots,n \quad (3.18)$$

e a um conjunto de pontos onde a intensidade é mínima (nodos), para os quais:

$$\vec{r}\cdot\left(\vec{k}_1-\vec{k}_2\right)-\left(\delta_1-\delta_2\right)=(2m+1)\pi \qquad \text{com } m=0,1,2,\ldots,n \qquad (3.19)$$

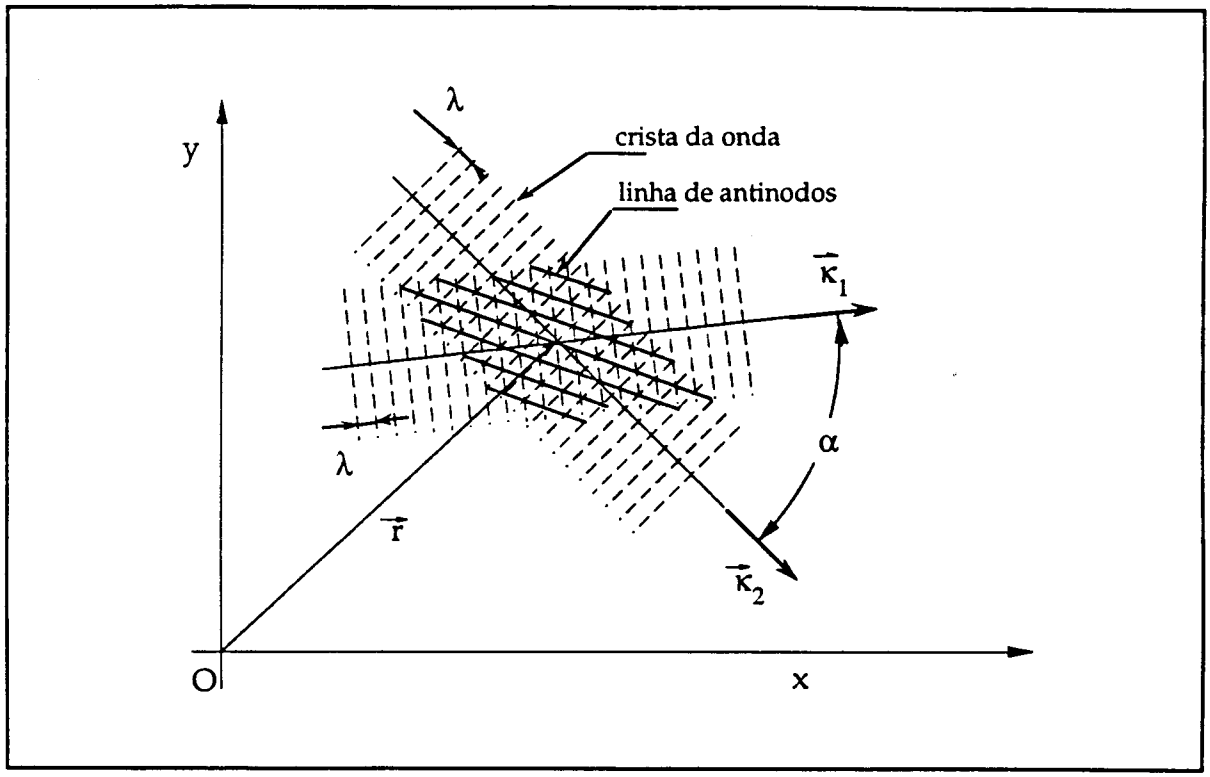


Figura 3.2 Adição de duas ondas planas coerentes e com a mesma frequência.

Se a diferença $(\delta_1-\delta_2)$ for constante ao longo do tempo, a posição das linhas de nodos e antinodos também o será e o padrão de interferência obtido será estacionário. Contudo, a fase de uma fonte de luz real varia aleatóriamente ao longo do tempo e, consequentemente, se as ondas forem oriundas de fontes de luz distintas a quantidade $(\delta_1-\delta_2)$ não será constante, alterando a posição do padrão de interferência. Se ambas as ondas tiverem origem na mesma fonte de luz, eliminar-se-á a dependência temporal da diferença de fase e será possível obter um padrão de interferência estacionário, cujo contraste pode ser determinado por:

$$C=\frac{I_{máx}-I_{mín}}{I_{máx}+I_{mín}} \qquad (3.20)$$

O valor de C será máximo e igual à unidade quando as intensidades das duas ondas forem iguais, o que equivale a um valor nulo para $I_{mín}$. No padrão de interferência obtido no volume de sobreposição das duas ondas, a diferença de

fase entre ambas é transformada numa variação sinusoidal de intensidade. Desta forma é possível registar a distribuição espacial de fase através de uma modulação de intensidade.

Deve referir-se que, embora as duas ondas provenham da mesma fonte de luz, a sua capacidade de interferência depende do comprimento de coerência da fonte de radiação. Atendendo a que a uma onda de luz monocromática real corresponde um espectro de frequências em torno de uma frequência central, define-se o comprimento de coerência l_c em função da largura de banda desse espectro $\Delta\nu$ através da expressão [15]:

$$l_c = \frac{c}{\Delta\nu} \tag{3.21}$$

onde c representa a velocidade da luz. Se a radiação for proveniente de um *laser*, o valor de C na equação (3.20) será periódico, tendo valores máximos quando a diferença de comprimento entre os caminhos percorridos pelas duas ondas for igual a $2nl_c$ e valores mínimos nulos quando essa diferença for igual a $(2n+1)l_c$, com n=0,1,2,...

3.5 O Holograma de Gabor.

Em 1948 [2] Gabor propôs um novo método para aumentar a resolução do microscópio electrónico. Utilizando um processo em que o registo da imagem e a sua reconstrução são efectuados em etapas distintas, uma imagem registada com um feixe electrónico é reconstruída com um feixe de luz. A diferença de comprimentos de onda entre as duas radiações é responsável pela ampliação extra introduzida (da ordem das 100 000 vezes). O sucesso do método depende da capacidade de registar toda a informação da frente de onda indispensável à sua posterior reconstrução. Como os meios de registo são insensíveis à fase, Gabor propôs a utilização de fenómenos de interferência na sua codificação [2]. A interferência da frente de onda a gravar com um feixe auxiliar converte a distribuição espacial de fase em variações de amplitude, as quais podem ser registadas por qualquer meio de registo quadrático que possua a sensibilidade e resolução necessárias. Gabor designou os registos assim obtidos por hologramas.

Na montagem Holográfica inicialmente proposta, ambos os feixes eram coaxiais. Desta forma os hologramas consistiam no registo do padrão de difracção de Fresnel resultante da interferência entre a parte da frente de onda modulada por um objecto parcialmente transparente com a radiação uniforme de fundo que se propaga sem qualquer alteração.

Considere-se que uma frente de onda plana e uniforme proveniente de uma fonte de luz monocromática e coerente ilumina um objecto semi-transparente de dimensões inferiores ao campo iluminado. Admita-se ainda que as perturbações introduzidas pelo objecto dividem a frente de onda inicial em duas frentes de onda que serão designadas por primária, ou de referência, e secundária, ou objecto, podendo ser descritas na sua forma complexa pelas seguintes expressões:

$$A_r = a_r \exp[i\phi_r] \quad , \quad A_o = a_o \exp[i\phi_o] \tag{3.22}$$

onde os índices r e o identificam respectivamente cada uma delas. As quantidades a_i e ϕ_i representam a amplitude e a fase do vector A_i respectivamente e dependem da posição do ponto considerado. O efeito da sua sobreposição será uma frente de onda resultante da soma de ambas cuja intensidade, de acordo com a expressão (3.14), pode ser representada por:

$$I(x,y)=|A_o + A_r|^2 = (A_o + A_r)\left(A_o^* + A_r^*\right) = a_o^2 + a_r^2 + A_o A_r^* + A_o^* A_r \tag{3.23}$$

onde o asterisco designa o complexo conjugado.

Se uma emulsão fotográfica for exposta à acção desta frente de onda na zona linear da sua curva HD (Hurter e Driffield) obter-se-á, após o seu processamento, um registo cuja transmitância de amplitude τ está relacionada com a intensidade de luz incidente I por [16]:

$$\tau \propto I^{-\frac{\gamma}{2}} \tag{3.24}$$

onde a constante γ depende do tipo de emulsão e do processo de revelação e representa o declive da zona linear da curva HD. Esta expressão é válida se for admitido que se trata de um holograma de amplitude e as variações de fase devidas a alterações na espessura da emulsão são suficientemente pequenas para poderem ser desprezadas.

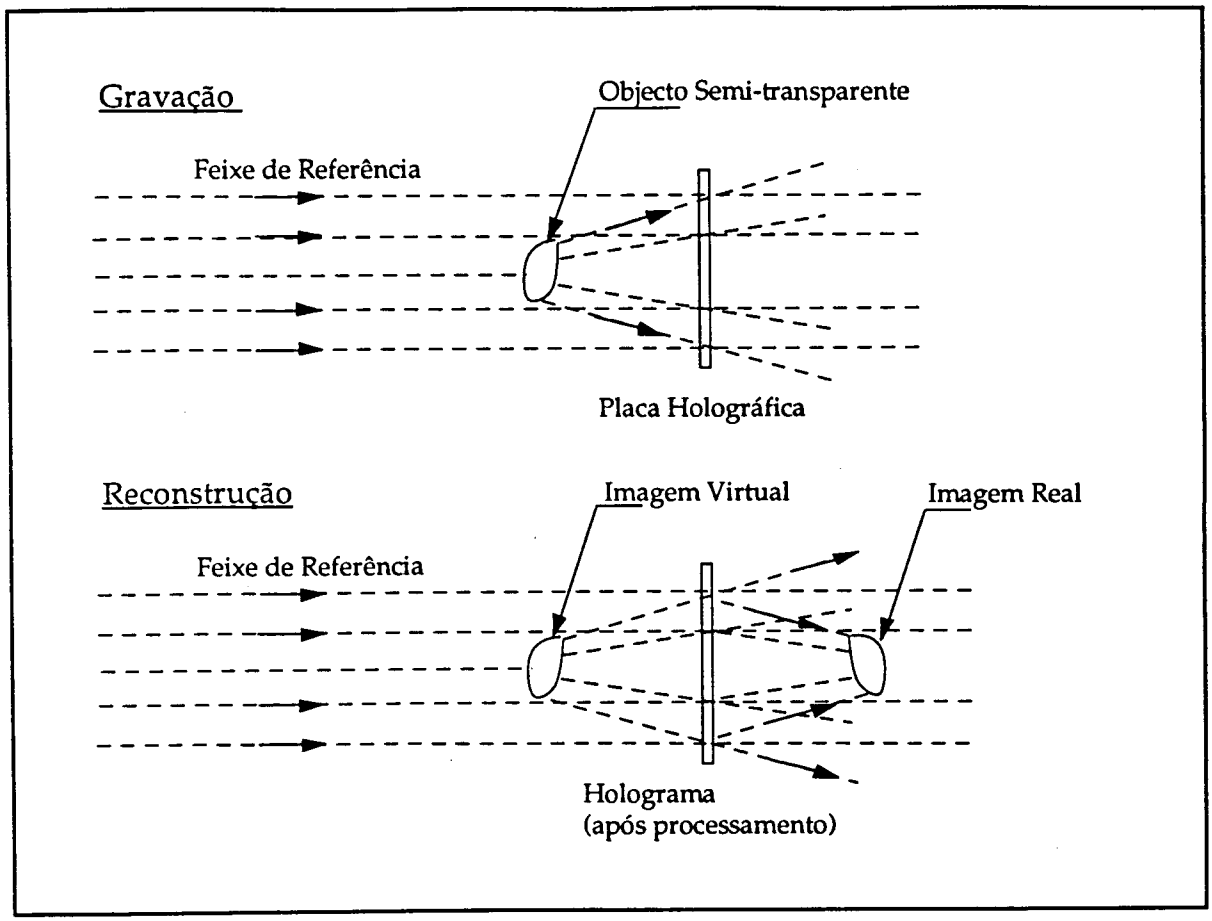


Figura 3.3 Gravação e reconstrução de um Holograma de Gabor.

Para reconstruir a frente de onda registada no holograma este, após ter sido processado, deverá ser iluminado por uma frente de onda semelhante à referência utilizada no processo de registo. São admissíveis radiações que sendo polarizadas, monocromáticas e coerentes tenham um comprimento de onda diferente. Neste caso a frente de onda será reconstruida com uma alteração de escala proporcional à variação dessa grandeza. A frente de onda devolvida pelo holograma pode ser obtida a partir da expressão:

$$A_{rec} = \tau_o + A_r \tau = \tau_o + A_r I^{-\frac{\gamma}{2}} \qquad (3.25)$$

Quando γ é igual a -2 fica garantida a fidelidade do processo de reconstrução pois a relação entre a transmitância de amplitude e a intensidade registada será linear (embora nem sempre esta igualdade seja verificada, é frequentemente assumida,

pois simplifica as equações obtidas). Da combinação das equações (3.23) e (3.25) obtém-se:

$$A_{rec} \propto A_r \left\{ a_o^2 + a_r^2 + A_o A_r^* + A_o^* A_r \right\} \qquad (3.26)$$

Nesta expressão as duas primeiras parcelas do segundo membro correspondem ao termo de ordem zero que, como se representa na figura 3.3, não sofre alteração na sua direcção de propagação após atravessar o holograma. O terceiro termo é a reconstrução da frente de onda gravada multiplicada por a_r^2 (frente de onda de ordem +1). No caso da radiação utilizada ser idêntica à da gravação, este termo equivale a uma imagem virtual do objecto situada na posição por este ocupada durante a gravação do holograma. Por último, ao quarto termo corresponde uma frente de onda que é a conjugada da frente de onda objecto multiplicada por A_r^2 (frente de onda de ordem -1). Esta frente de onda reconstroi uma imagem real que, relativamente à imagem virtual, se encontra posicionada simétricamente ao plano do holograma e é vulgarmente designada na bibilografia anglo saxónica por *peseudoscopic* . Nesta imagem o objecto é representado como se estivesse a ser observado pelo seu interior, isto é, as regiões do objecto mais afastadas do observador aparecem mais próximas e vice versa.

Na montagem óptica proposta por Gabor ambas as frentes de onda intervenientes são co-axiais, razão pela qual este tipo de holograma é também designado por holograma em linha. Como vantagens na utilização desta configuração, podem indicar-se fundamentalmente duas: a possibilidade de utilizar emulsões de baixa resolução com fontes de luz de reduzida coerência e a pouca sensibilidade a perturbações exteriores. As desvantagens são contudo mais numerosas e restringem bastante o seu campo de aplicação; entre elas podem enumerar-se as seguintes:

i) só podem ser utilizados objectos semi-transparentes cujas dimensões sejam bastante inferiores ao campo iluminado pela frente de onda primária;

ii) a informação correspondente a cada área do objecto fica registada em zonas do holograma bem definidas;

iii) a presença da imagem real alinhada com a frente de onda primária dificulta a observação da frente de onda objecto, uma vez que aquela aparece em fundo e desfocada.

Com estas limitações, os objectos ideais para aplicação desta técnicas são aqueles em que existem pormenores semi-transparentes em fundos que permitem a transmissão da maior parte da frente de onda primária.

3.6 Holograma de Leith e Upatnieks.

Embora alguns investigadores tivessem dedicado alguma atenção à montagem proposta por Gabor, principalmente no sentido de aumentar o contraste das imagens reconstruídas [17], poucos foram os progressos alcançados e esta técnica, devido à fraca qualidade das imagens obtidas, não teve na altura grande divulgação.

Com a descoberta do *laser* por Mainman [1] no início da década de sessenta, ficou disponível uma fonte de luz monocromática com uma coerência até então nunca alcançada. Aproximadamente vinte anos após a publicação do trabalho de Gabor, Leith e Upatnieks introduziram o *laser* como fonte de luz na gravação de hologramas e propuseram uma nova montagem [4] [5]. Sendo especialistas em telecomunicações, estes investigadores alertaram para a grande semelhança entre a holografia e as operações envolvidas na difusão de ondas electromagnéticas com modulação de amplitude.

Na nova montagem proposta por Leith e Upatnieks, a frente de onda primária é dividida em duas frentes de onda distintas. Como se representa na figura 3.4, a frente de onda de referência e a frente de onda proveniente do objecto intersectam-se segundo um determinado ângulo θ; desta forma introduz-se no registo um padrão de franjas paralelas que se sobrepõe ao padrão de difracção de Fresnel do objecto. Este padrão é equivalente a introduzir a modulação numa portadora espacial cuja frequência pode ser controlada fazendo variar o ângulo θ. Embora este processo de gravação obrigue a utilizar emulsões fotográficas com maior resolução, permite separar espacialmente os três termos obtidos no processo de reconstrução. Desta forma é possível aumentar significativamente o contraste da imagem virtual uma vez que, com uma escolha conveniente da inclinação dos feixes, se pode evitar a influência dos termos de ordem 0 e -1 na sua observação [5] [6].

Da figura 3.4 pode concluir-se que, na ausência do feixe superior, se obtém uma montagem em linha equivalente àquela que Gabor propôs. A frente de onda que se obtém no plano do holograma pode ser descrita por:

$$A_o(x,y)= a_o(x,y)\exp[i\phi_o(x,y)] \qquad (3.27)$$

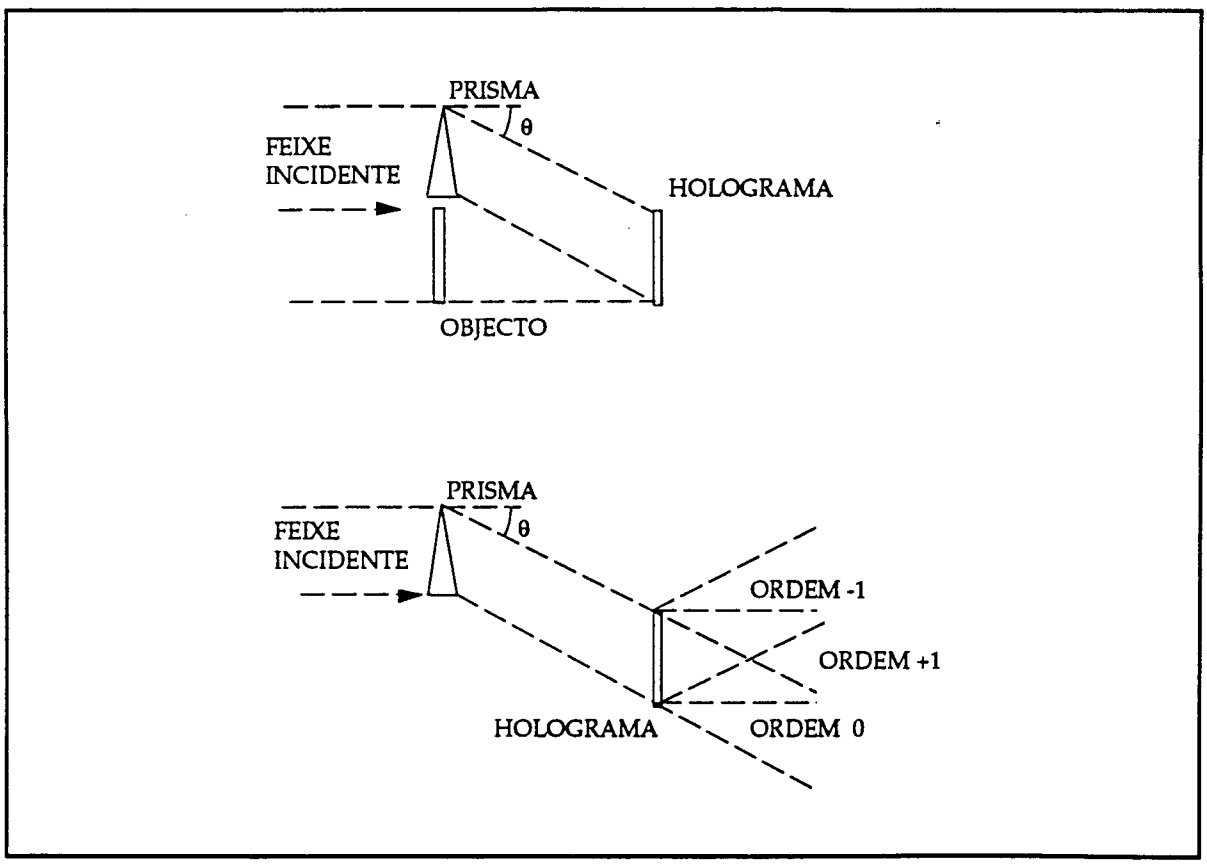


Figura 3.4 Gravação e reconstrução de um holograma com portadora espacial.

Neste caso a gravação da fase da frente de onda só é possível se o objecto transmitir a maior parte da frente de onda primária. Ao introduzir a referência separadamente, fazendo um pequeno ângulo com o eixo de propagação da frente de onda proveniente do objecto, obtém-se, no plano de gravação do holograma, uma variação progressiva da diferença de fase entre os dois feixes. Sendo a_r a amplitude do feixe de referência e sendo o ângulo θ pequeno, obtém-se para o feixe de referência a expressão:

$$A_r(x,y)= a_r(x,y)\exp\left[i\xi_p x\right] \qquad (3.28)$$

onde ξ_p é uma constante que caracteriza a variação da fase e depende da inclinação dos feixes e do comprimento de onda da radiação, de acordo com expressão $\xi_p = 2\pi\theta/\lambda$ (para valores pequenos de θ em que é válida a aproximação $\text{sen}\theta \approx \theta$). O padrão de interferência que se obtém na região de sobreposição dos dois feixes pode ser descrito por:

$$A(x,y)= a_r(x,y)\exp\left[i\xi_p x\right] + a_o(x,y)\exp\left[i\phi_o(x,y)\right] \qquad (3.29)$$

Se o holograma for exposto à acção desta frente de onda por forma a utilizar a região linear da curva HD da emulsão fotográfica obter-se-á um registo cuja transmitância de amplitude é descrita pela seguinte equação:

$$\tau = \tau_o - k\left|A_r e^{i\xi_p x} + A_o e^{i\varnothing}\right|^2$$

$$= \tau_o - kA_r^2 - kA_o^2 - 2kA_r A_o \cos\left(\xi_p x - \varnothing\right) \qquad (3.30)$$

O terceiro termo da expressão anterior é a parte real do padrão de difracção de Fresnel do objecto modulado numa portadora espacial ξ_p. Na ausência do objecto, esta distribuição espacial de amplitude corresponde a um padrão de franjas paralelas, produzidas pela interferência entre os dois feixes, que resulta da intersecção do plano do holograma com o conjunto de planos paralelos perpendiculares ao plano formado pelas direcções de propagação de ambos os feixes, ver figura 3.2. O registo assim obtido comporta-se como uma rede de difracção que, quando iluminado por uma frente de onda, lhe altera a direcção de propagação.

Para reconstruir a imagem gravada basta colocar o holograma num feixe colimado de luz monocromática orientado por forma a que o ângulo de incidência seja o utilizado para a referência no processo de gravação. À semelhança dos hologramas em linha, também são reconstruidas em simultâneo as imagens virtual e real. Contudo, a existência de uma rede paralela separa espacialmente, por difracção, os vários termos, como se representa na figura 3.5. Regressando à expressão (3.30) é possível reescrever o terceiro termo na sua forma exponencial, o que corresponde a:

$$2kA_rA_0\cos(\xi_p x-\varnothing)=\frac{1}{2}kA_rA_0e^{i(\xi_p x-\varnothing)}+\frac{1}{2}kA_rA_0e^{-i(\xi_p x-\varnothing)} \qquad (3.31)$$

A primeira parcela do segundo membro desta expressão representa o padrão de difracção de Fresnel do objecto, a menos de um factor constante e de uma função exponencial $e^{i\xi px}$. O factor constante resulta do processo de gravação e não altera a imagem, enquanto a exponencial é responsável pela separação espacial da imagem virtual dos restantes termos. O última parcela equivale à imagem real que, devido à acção de $e^{i\xi px}$, também não se encontra alinhada com a frente de onda primária.

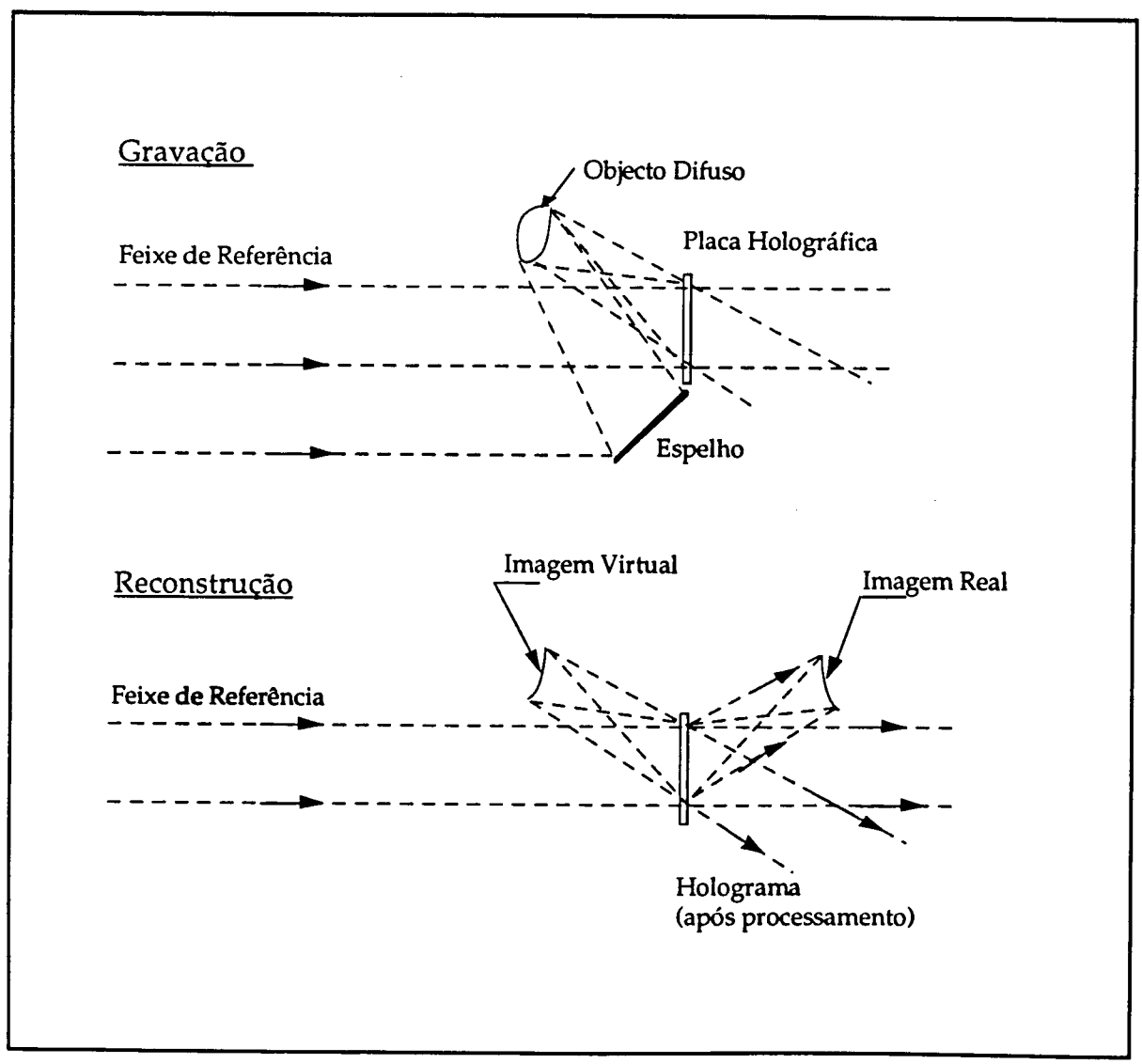


Figura 3.5 Gravação e reconstrução de um holograma de Leith e Upatnieks.

A separação entre o feixe de referência e o feixe portador da informação veio aumentar significativamente as potencialidades do registo holográfico. Desta forma podem ser controladas separadamente as intensidades de ambos os feixes, permitindo obter registos de objectos sem que estes necessariamente transmitam a maior parte da frente de onda primária.

Esta montagem mantém contudo uma limitação importante: a informação referente a cada ponto do objecto fica codificada em zonas bem definidas do holograma, pelo que à eliminação de partes do registo equivale uma reconstrução parcial do objecto. Como a radiação utilizada é monocromática e coerente, qualquer defeito ou sujidade nos componentes ópticos implica o aparecimento das suas figuras de difracção e consequentemente um aumento de ruído. Os registos obtidos desta forma não permitem reconstruir com igual fidelidade toda a frente de onda gravada. A introdução da filtragem espacial do feixe de referência permite eliminar a maior parte do ruído. Contudo, a iluminação difusa do objecto não só remove esta limitação, como introduz algumas caracteristícas novas no registo holográfico [6].

A obtenção de um feixe objecto difuso pode ser alcançada por inclusão de um vidro despolido no feixe que ilumina o objecto ou resultar da reflexão da luz numa superfície difusa. Neste caso não faz sentido designar o feixe objecto por frente de onda secundária, pois em vez de uma frente de onda perfeitamente definida existe uma distribuição espacial aleatória de amplitude e fase que, no caso da radiação ser coerente, é estacionária.

Outra consequência importante da utilização de um feixe objecto difuso é a dispersão da informação referente a cada ponto do objecto por toda a área do registo, o que permite que qualquer pequena parte deste possa reconstruir toda a imagem gravada. Desta forma é eliminada a influência dos já referidos factores geradores de ruído óptico na qualidade da imagem final. Esta caracteristíca deve-se ao facto de o holograma conter informação redundante que resulta de ter registado um sinal com uma banda de frequências muito superior à requerida pelo registo da informação proveniente do objecto. O sinal registado é obtido da convolução de dois sinais cujos espectros de frequências espaciais são o conjunto de frequências em que está codificada a modulação introduzida pelo objecto e o espectro uniforme de banda larga devido à iluminação difusa.

A gama dinâmica do processo de registo é também consideravelmente aumentada com a dispersão introduzida pela iluminação difusa. Como as possíveis regiões da superfície com brilho mais intenso distribuem a sua energia por toda a área do holograma podem obter-se registos com gamas de variação da

ordem dos 40 a 50 dB [6]. Cada registo pode ainda conter informação proveniente de várias imagens, as quais podem ser adicionadas de forma coerente ou incoerente. No caso das imagens serem gravadas em simultâneo, a gravação diz-se coerente e serão reconstruidas de uma só vez. A adição incoerente de várias imagens é conseguida por codificação espacial do feixe de referência utilizado na gravação de cada uma delas e cada imagem só é reconstruida quando o holograma é iluminado pelo feixe de referência utilizado na sua gravação.

No entanto a característica mais importante que este tipo de iluminação introduziu na gravação de hologramas com dois feixes foi a possibilidade de permitir gravar hologramas de objectos opacos tridimensionais. Garantindo que o comprimento de coerência do *laser* é superior à profundidade de campo da cena a registar e que durante a exposição não existem movimentos de amplitude superior a $\lambda/8$, em que λ é o comprimento de onda da radiação *laser* utilizada, é possível gravar hologramas de cenas tridimensionais cujas imagens, quando devidamente reconstruidas, em nada se distinguem da cena original.

Num holograma é registada toda a informação contida na radiação coerente que, proveniente de uma determinada cena, incide na sua superfície. Ao reconstruir o holograma com o mesmo feixe de referência com que foi gravado, recupera-se toda a informação sobre o feixe de luz original e um observador que observe a imagem reconstruida terá a sensação perfeita de estar a observar a cena original através de uma janela com as dimensões do holograma.

3.7 A Interferometria Holográfica.

As técnicas de Interferometria Óptica permitem medir a fase de uma dada frente de onda a partir de fenómenos de interferência verificados entre esta e uma frente de onda de geometria conhecida utilizada como referência [18]. Desta forma é possível efectuar medições de grandezas físicas, desde que convertíveis em variações de fase num feixe de radiação coerente. Alterações no índice de refracção de um determinado meio óptico ou deslocamentos de superfícies podem ser medidos com uma resolução da ordem do comprimento de onda da radiação utilizada.

Na interferometria convencional ambas as frentes de onda são formadas em simultâneo, embora possam percorrer caminhos distintos. Os percursos de

ambos os braços do interferómetro deverão ter propriedades ópticas semelhantes e extensões cuja diferença seja inferior ao comprimento de coerência da fonte de radiação. Qualquer perturbação que implique variações de fase e afecte diferentemente os dois feixes contribui para diminuir a razão sinal/ruído. Desta forma a qualidade dos componentes ópticos e das superfícies de referência, bem como o controlo sobre a estabilidade da montagem são condições fundamentais à garantia do rigor da medida.

Quando num processo de medida interferométrico pelo menos uma das frentes de onda envolvidas é gravada ou reconstruida por um holograma, este é designado por Interferometria Holográfica. Apresentada quase em simultâneo por vários grupos [7], [9] e [19], esta técnica revelou-se da maior utilidade em aplicações envolvendo a medição de grandezas codificáveis na distribuição de fase de uma frente de onda luminosa. Uma das aplicações para a qual está particularmente vocacionada consiste na determinação, sem contacto, de geometrias de corpos e na medição das variações de geometria provocadas por acções exteriores. O levantamento da geometria de uma superfície é obtido por métodos de contorno [20] e está fora do âmbito deste trabalho. Das variações de geometria pode inferir-se o campo de deslocamentos do qual, por diferenciação, se obtém o campo de deformações. Daqui resulta o grande interesse desta técnica para a Análise Experimental de Tensões.

A Interferometria Holográfica permite estender o campo de aplicação da interferometria clássica ao estudo de deslocamentos em superfícies difusas com geometrias complexas. Com esta técnica são aliviadas as restrições impostas pela interferometria convencional à qualidade dos componentes ópticos, pois como a medida é diferencial, o ruído óptico gerado pelos componentes será eliminado se permanecer constante ao longo da medição. Os vários métodos de gravação e correlação de registos desenvolvidos permitem ainda aumentar a gama de medida e diminuir a sensibilidade desta técnica a instabilidades.

A possibilidade de com um holograma reconstruir em diferido e com fidelidade uma frente de onda prèviamente registada, permite efectuar medições interferométricas de deslocamentos de superfícies envolvendo frentes de onda por ela difundidas em momentos distintos. Da interferência das frentes de onda correspondentes às diferentes geometrias obtêm-se padrões de franjas de interferência cuja orientação e frequência espacial estão relacionadas com os deslocamentos sofridos. O contraste do padrão de interferência depende da correlação entre ambas as frentes de onda pelo que, alterações da microestrutura da superfície ou deslocamentos que provoquem a descorrelação, reduzem o

contraste diminuindo a razão sinal/ruído da medição. Esta razão é nula no caso da descorrelação completa de ambas as frentes de onda.

i) Interferometria holográfica de dupla exposição.

Se numa placa holográfica forem registadas duas frentes de onda provenientes de uma superfície à qual, entre exposições, é aplicada uma acção exterior que lhe altera a geometria, obtém-se um holograma contendo informação sobre a diferença entre ambas as situações. Não sendo nula a correlação entre as frentes de onda gravadas, da reconstrução do holograma resulta também o padrão de interferência entre elas. Esta técnica é designada por dupla exposição e os hologramas obtidos contêm informação sobre o campo de deslocamentos associados a determinada solicitação sobre a superfície independentemente de esta se manter [9] [30].

Como as deformações envolvidas são pequenas quando comparadas com as dimensões da superfícies, podemos representar as frentes de onda provenientes do objecto por:

$$A_{0j}=a_0 e^{ik\phi_{oj}} \qquad (3.32)$$

Nesta expressão, o índice j refere cada uma das frentes de onda registadas, e toma o valor 1 e 2 [16]. Da adição coerente de ambas as frentes de onda no plano do holograma resulta um padrão de intensidade que pode ser representado pela seguinte expressão:

$$I = a_{01}^2 + a_{02}^2 + a_r^2 + A_r^*(A_{01} + A_{02}) + A_r\left(A_{01}^* + A_{02}^*\right) \qquad (3.33)$$

Se, após ter sido exposto e processado, o holograma for iluminado pelo feixe de referência obtêm-se os vários termos referidos na expressão (3.33). O quarto termo do segundo membro desta expressão representa a reconstrução de uma frente de onda envolvendo a soma coerente de ambas as frentes de onda. Este termo que, uma orientação conveniente da montagem permite isolar espacialmente, tem

uma intensidade cuja distribuição espacial, a menos de factores constantes, pode ser descrita por:

$$I_i \propto 2a_o^2\{1+\cos[k(\varnothing_{02}-\varnothing_{01})]\} \qquad (3.34)$$

onde k é o vector de onda e ($\varnothing_{02}$ - $\varnothing_{01}$) representa a medição directa da diferença de fase entre as duas situações registadas. Esta diferença de fase resulta das alterações no caminho percorrido pela luz devidas à deformação da superfície, sendo a relação entre o padrão de franjas e o deslocamento dependente da geometria da montagem óptica.

ii) Interferometria holográfica em tempo médio.

A Interferometria Holográfica pode também ser utilizada para estudar as deformações associadas à vibração de uma estrutura quando excitada com uma das suas frequências próprias. Neste caso é registado um só holograma do objecto submetido ao movimento cíclico com a frequência pretendida. Sendo o tempo de exposição bastante superior ao período do movimento, obtém-se um registo da média das frentes de onda provenientes do objecto nas várias posições ocupadas durante o movimento. Os padrões de franja obtidos contêm informação sobre a amplitude do movimento.

Apresentada por Powell [7], esta técnica é designada por interferometria holográfica em tempo médio e permite aceder à geometria dos modos próprios de vibração de uma estrutura com a elevada resolução dos métodos interferométricos. Se o objecto se deslocar com um movimento com frequência ω e amplitude z, a frente de onda proveniente da sua superfície pode representar-se por:

$$A_o = a_o e^{ik\gamma z\cos\omega t} \qquad (3.35)$$

onde γ é um parâmetro que depende dos ângulos de iluminação e observação utilizados na montagem. Esta expressão representa a frente de onda objecto em

qualquer instante pelo que, para se obter a forma do padrão registado no holograma, deverá ser integrada ao longo do período de vibração T .

$$I_i \propto |a_o|^2 \left| \frac{1}{T} \int_0^T e^{ik\gamma z \cos \omega t} \, dt \right|^2 \qquad (3.36)$$

Esta expressão descreve um fenómeno de modulação de frequência e pode ser simplificada a partir do conhecimento das funções de Bessel. Desta forma obtém-se uma expressão que relaciona a variação de intensidade com a amplitude do movimento da seguinte forma [16]:

$$I_i \propto |a_o|^2 J_o^2[k\gamma z] \qquad (3.37)$$

em que J_o representa a função de Bessel de ordem zero. A intensidade dos padrões de interferência obtidos é modulada pela função J_o^2. No capítulo 5 deste trabalho serão descritas estas funções e convenientemente interpretados os padrões obtidos.

iii) Interferometria holográfica em tempo real.

Pretendendo acompanhar continuamente a deformação de uma superfície, pode comparar-se a frente de onda difundida por esta com uma frente de onda reconstruída por um holograma previamente gravado e convenientemente reposicionado. Esta técnica é designada por Interferometria Holográfica em tempo real e permite acompanhar a evolução da deformação de uma superfície efectuando apenas um só registo holográfico.

Como a reconstrução exacta da frente de onda gravada só é obtida se o holograma for iluminado com um feixe de referência de geometria idêntica à referência da gravação, o reposicionamento preciso do holograma é fundamental à obtenção de resultados. Admitindo que a montagem é suficientemente estável e não existem alterações no índice de refracção no caminho percorrido pelos feixes, as deformações da superfície serão detectadas pelo aparecimento de franjas de interferência visiveis por observação através do holograma. O padrão de

interferência é, a menos de factores constantes, idêntico ao obtido em dupla exposição, sendo o seu contraste optimizado pelo ajuste das intensidades de ambos os feixes.

A Interferometria Holográfica em tempo real pode também ser utilizada em tempo médio, resultando um padrão cuja intensidade tem uma distribuição espacial que é, para cada ponto, função da amplitude do movimento z e pode ser obtida por:

$$I_i \propto 2|a_o|^2\left\{1+J_o[k\gamma z]\right\} \qquad (3.38)$$

Comparando esta expressão com (3.37),verifica-se que o contraste do padrão de franjas é bastante inferior ao obtido em tempo médio e o número de franjas presentes se reduz a metade devido a estar envolvida a função J_o e não o seu quadrado.

A utilização desta técnica exige que o reposicionamento do holograma tenha uma precisão da ordem da resolução da medida, isto é, inferior a um quarto do comprimento de onda da radiação. A erros na recolocação do holograma dessa ordem de grandeza correspondem franjas de reposicionamento em tudo semelhantes às obtidas por deformação do objecto. Erros superiores podem anular a correlação entre ambas as frentes de onda, não permitindo qualquer interferência. A utilização de câmeras Holográficas com registo em materiais fotopoliméricos ou de tinas de revelação (*liquid gate*), no caso das emulsões fotográficas, permite processar os registos *in loco* evitando o reposicionamento.

Apesar das dificuldades devidas à necessidade de sobrepôr com rigor ambas as frentes de onda, esta técnica apresenta algumas características que podem recomendar a sua utilização em determinadas aplicações. Com a interferometria em tempo real é possível, com um único holograma, analisar várias situações acompanhando processos que evoluem no tempo. Impondo ao holograma deslocamentos conhecidos é possível introduzir no padrão de interferência uma portadora espacial com frequência e orientação bem determinadas que permite levantar a indeterminação do sentido do deslocamento. Deve referir-se que, para igual geometria, serão idênticos os padrões de interferência obtidos quer esta seja côncava ou convexa, situação normalmente ultrapassada a partir do conhecimento *a priori* da evolução dos fenómenos. A utilização desta técnica é interdita quando a estabilidade da montagem não permite manter as condições

iniciais registadas no holograma durante o tempo necessário ao acompanhamento do fenómeno.

A opção por uma das técnicas de Interferometria Holográfica previamente definidas depende do tipo de aplicação e das condições ambientais em que é efectuada a medida. A dupla exposição permite evitar o, sempre delicado, reposicionamento do holograma e eliminar parte das exigências de estabilidade da montagem. Só as perturbações presentes durante o período de exposição do holograma, isto é, durante a exposição de ambas as frentes de onda e no tempo que mediar entre elas interferem na medição. É também eliminada a influência da geometria do feixe de referência na reconstrução do registo. Qualquer feixe de radiação coerente semelhante ao utilizado na gravação pode ser utilizado na reconstrução. Aberrações, distorções ou alterações de escala verificar-se-ão simultaneamente nas duas frentes de onda sem alterar o padrão de interferência. A introdução de uma portadora espacial no padrão interferométrico é conseguida por alteração do feixe de referência entre as duas exposições. Neste caso a portadora é fixa e a sua frequência e orientação só serão controladas a partir do prévio conhecimento da resposta da montagem óptica.

As técnicas de tempo médio têm um campo de aplicação diferente, pois implicam movimentos conhecidos no objecto. A opção pelo registo em tempo médio conduz a padrões com melhor contraste, mas pressupõe o conhecimento prévio das frequências próprias da estrutura. Nas situações em que essa característica é uma variável do problema deverá ser utilizada a interferometria em tempo real, a qual conduz a imagens de qualidade inferior mas permite, com um só holograma, efectuar um varimento nas frequências de vibração da estrutura. A gravação de registos em tempo médio implica a integração de várias frentes de onda num mesmo registo, destruindo a informação sobre a fase do movimento. Esta grandeza pode ser obtida recorrendo às técnicas de modulação de fase descritas no capítulo 5 do presente trabalho.

Para aplicar as técnicas interferométricas em ambientes de grande instabilidade pode recorrer-se a técnicas de modulação de fase do feixe de referência [25] ou à modulação de intensidade de ambos os feixes [26] [27]. A utilização de feixes *laser* com potências elevadas, actuando em intervalos de tempo extremamente curtos, permite obter registos interferométricos mesmo em situações envolvendo elevadas velocidades e torna as técnicas de dupla exposição praticamente imunes às perturbações exteriores.

3.8 Medição de Deslocamentos com Interferometria Holográfica.

Os resultados de uma medição com Interferometria Holográfica traduzem-se em imagens das superfícies em estudo cobertas por padrões de franjas de interferência. As franjas obtidas consistem em variações sinusoidais de intensidade provocadas pela interferência entre as frentes de onda envolvidas na medição.

A informação de fase de cada frente de onda é registada pela sua adição coerente com a referência. Os padrões obtidos têm uma frequência espacial elevada que depende da geometria da montagem e cujo limite superior é imposto pela resolução do meio de registo. Estes padrões de interferência primária não são resolvidos na observação e correspondem à portadora introduzida para separação espacial dos vários termos obtidos na reconstrução. Da comparação de dois padrões de franjas primárias resulta um padrão de franjas de baixa frequência, designadas por franjas secundárias, que corresponde ao padrão de interferência entre ambas as frentes de onda. Os padrões de franjas secundárias, também obtidos pela interferência de uma frente de onda difundida por uma superfície com uma frente de onda proveniente de um padrão de interferência primário, registam as alterações sofridas pelo objecto no período de tempo entre a gravações das duas frentes de onda.

Os deslocamentos dos vários pontos da superfície provocam alterações no caminho percorrido pelo feixe de luz utilizado para iluminar o objecto. Essas alterações de percurso são codificadas em distribuições espaciais de fase, pelo que é possível obter o campo de deslocamentos a partir dum padrão de interferência.

A relação entre o campo de deslocamentos da superfície e o padrão de interferência resultante da sua medição depende do comprimento de onda da radiação coerente que ilumina o objecto e da geometria da montagem óptica. Admita-se, como se representa na figura 3.6, que o ponto P de uma superfície difusa sofre um deslocamento $\vec{d}$ no plano 0xy coincidente com o plano da figura. Se a superfície for iluminada segundo a direcção do vector $\vec{i}$ e a direcção de observação coincidir com a recta de suporte do vector $\vec{v}$, ao deslocamento $\vec{d}$ do ponto P para P' corresponde uma variação de fase ø dada por:

$$\text{ø}=\frac{2\pi}{\lambda}\left[\left(\vec{d}\cdot\vec{i}\right)+\left(\vec{d}\cdot\vec{v}\right)\right] \qquad (3.39)$$

Tendo em atenção as quantidades vectoriais envolvidas, esta expressão pode ser substituida por:

$$\varnothing=\frac{2\pi}{\lambda}\left(\vec{i}\cdot\vec{v}\right)\cdot\vec{d}=\frac{2\pi}{\lambda}\,\vec{s}\cdot\vec{d} \qquad (3.40)$$

o vector $\vec{s}$, normalmente designado por vector sensibilidade, tem uma direcção paralela à bissectriz do ângulo formado pelas direcções de iluminação e de observação e corresponde à direcção da medida. Desta forma, esta geometria permite efectuar medições da componente do deslocamento segundo a direcção do vector sensibilidade.

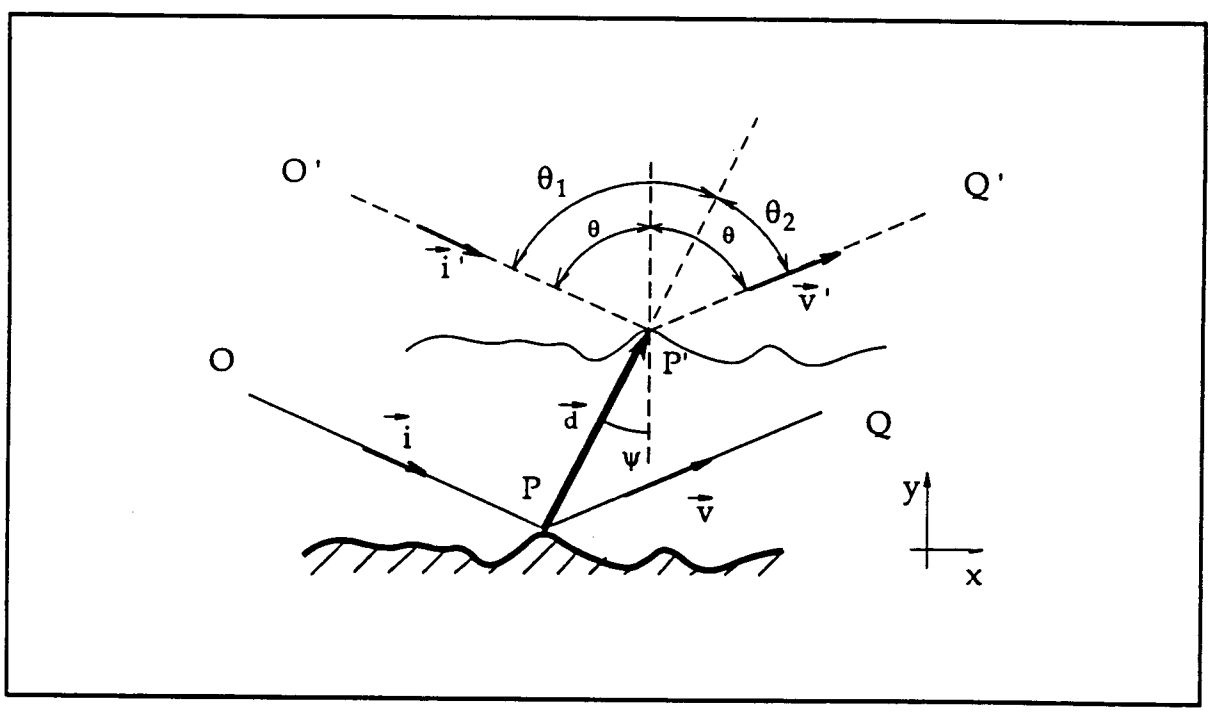


Figura 3.6 Geometria da formação das franjas de interferência.

Conhecidos um ou mais pontos estacionários, pode identificar-se a franja correspondente à situação de deslocamento nulo, normalmente representada por N=0. Com a franja de ordem zero como referência e fazendo uso de um processo de interpolação entre franjas consecutivas, é possível obter para qualquer ponto P_i a ordem de franja correspondente segundo a direcção do vector sensibilidade. O valor de N_i , ordem da franja, será determinado por [21]:

$$N_i = \frac{\varnothing_i}{2\pi} = \frac{1}{\lambda}\left(\vec{s}\cdot\vec{d}_i\right) \tag{3.41}$$

Numa situação tridimensional, como se representa esquematicamente na figura 3.7, se o holograma for suficientemente extenso e colocado suficientemente próximo da superfície a medir, é possível obter para cada ponto a diferença de fase segundo três direcções distintas não coplanares. Desta forma são definidos três vectores sensibilidade que não pertencem ao mesmo plano e podem ser obtidos da seguinte forma:

$$\vec{s}_1 = \left(\vec{i} + \vec{v}_1\right) \; ; \; \vec{s}_2 = \left(\vec{i} + \vec{v}_2\right) \; ; \; \vec{s}_3 = \left(\vec{i} + \vec{v}_3\right) \tag{3.42}$$

onde os vectores $\vec{v}_i$ correspondem às diferentes direcções de observação. Projectando cada um dos vectores sensibilidade num referêncial tri-ortogonal, determina-se uma matriz de sensibilidade que relaciona as projecções do deslocamento nesse referencial com as medições de fase da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} N_{1i} \\ N_{2i} \\ N_{3i} \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} s_{1x} & s_{1y} & s_{1z} \\ s_{2x} & s_{2y} & s_{2z} \\ s_{3x} & s_{3y} & s_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{xi} \\ d_{yi} \\ d_{zi} \end{bmatrix} \tag{3.43}$$

A matriz [S] é não singular, pelo que é possível calcular a matriz inversa $[K] = [S]^{-1}$. A determinação da matriz [K] permite definir uma expressão simples para o cálculo das três componentes do deslocamento do ponto P_i, isto é;

$$\begin{bmatrix} d_{xi} \\ d_{yi} \\ d_{zi} \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} k_{1x} & k_{2x} & k_{3x} \\ k_{1y} & k_{2y} & k_{3y} \\ k_{1z} & k_{2z} & k_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{1i} \\ N_{2i} \\ N_{3i} \end{bmatrix} \tag{3.44}$$

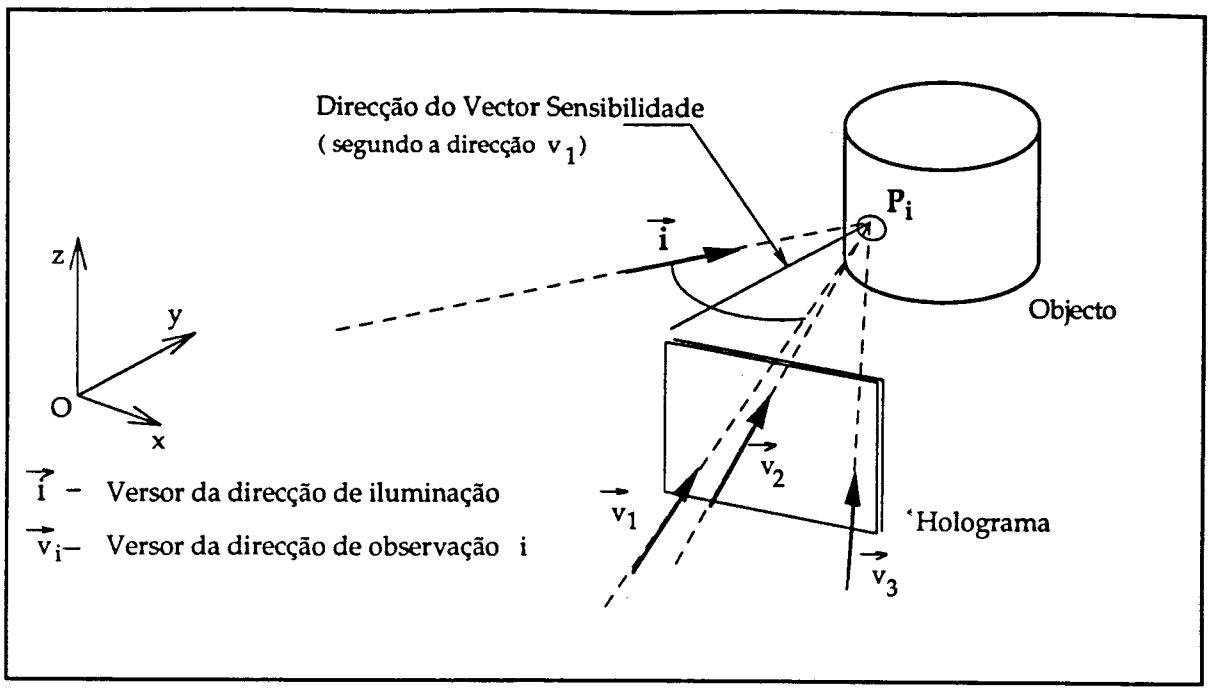


Figura 3.7 Determinação do valor de um deslocamento tridimensional através de Interferometria Holográfica.

Embora uma escolha cuidada das várias direcções permita definir uma matriz [k] de fácil determinação, o levantamento dos deslocamentos ponto a ponto envolve uma enorme quantidade de trabalho. Do ângulo entre as várias direcções de observação depende o rigor da medida pelo que deverá ser o maior possível. Em determinadas situações poderá mesmo justificar-se a utilização de três hologramas segundo direcções distintas, partilhando a direcção de observação, [22] ou um só holograma com três direcções de iluminação [23]. Para medições efectuadas a partir de registos de dupla exposição é necessário levantar a indeterminação de π, no sentido do vector deslocamento.

Em situações envolvendo a determinação de deslocamentos no plano, o recurso à montagem proposta por Ennos [24] reduz significativamente a quantidade de cálculos envolvidos. Nesta montagem são utilizadas duas direcções de observação dispostas simetricamente em relação à normal à superfície e uma única direcção de iluminação, como se representa na figura 3.8. Se a superfície sofrer um deslocamento $\vec{d}$ segundo uma direcção que faz um ângulo ø com a superfície na direcção de observação 2, obtém-se uma variação de comprimento dada pela expressão;

$$\Delta_{12}=2d\cos\left\{\varnothing-\left(\frac{\alpha_2+\alpha_1}{2}\right)\right\}\cos\left(\frac{\alpha_2-\alpha_1}{2}\right) \qquad (3.45)$$

em que d é o deslocamento e os vários ângulos equivalem aos representados na figura 3.8. A diferença de percurso, quando é utilizada a observação segundo a direcção 3, pode ser calculada por:

$$\Delta_{13}=2d\,\mathrm{sen}\left\{\varnothing+\left(\frac{\alpha_3-\alpha_1}{2}\right)\right\}\mathrm{sen}\left(\frac{\alpha_1+\alpha_3}{2}\right) \qquad (3.46)$$

Se $\alpha_2=\alpha_3$ é possível obter a componente do deslocamento $\vec{d}$ no plano tangente à superfície nesse ponto a partir da diferença entre os valores obtidos das expressões (3.45) e (3.46), isto é,

$$\Delta_{12}-\Delta_{13}=2d\cos\varnothing\cos\alpha_2 \qquad \text{logo} \qquad d\cos\varnothing=\frac{\Delta_{12}-\Delta_{13}}{\cos\alpha_2} \qquad (3.47)$$

sendo d cos ø a projecção do deslocamento no plano.

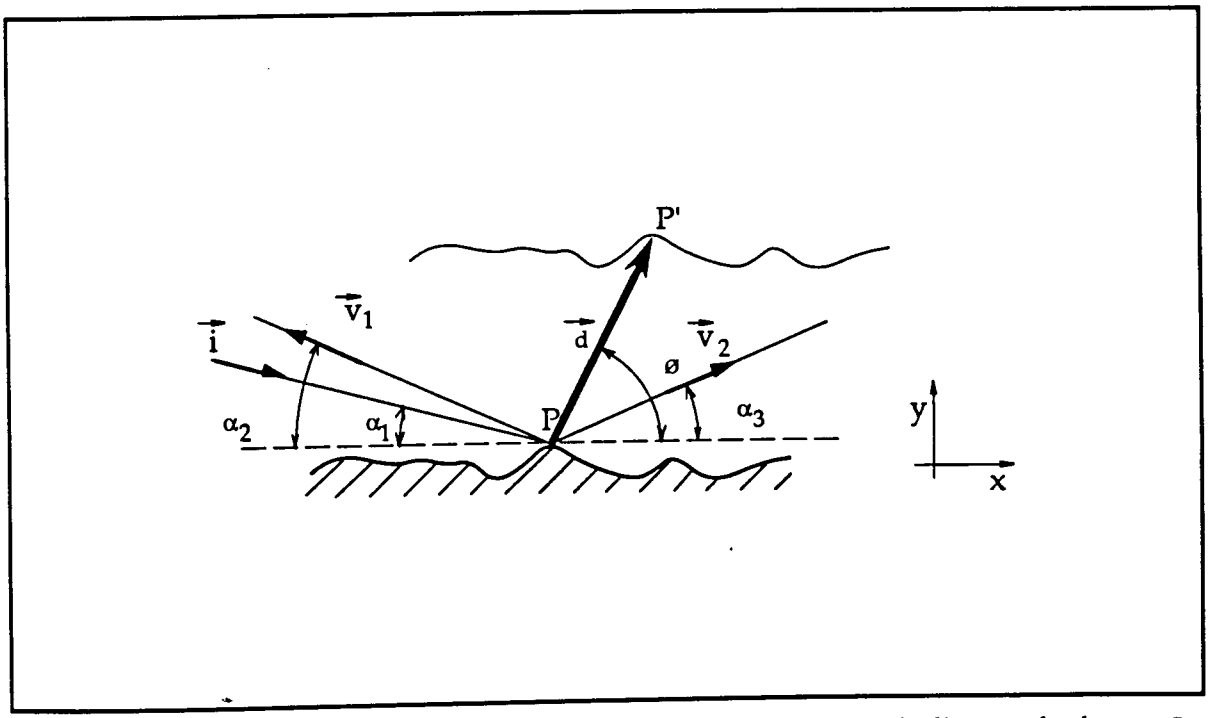


Figura 3.8 Definição do vector sensibilidade para uma montagem com dupla direcção de observação.

A utilização de uma montagem óptica com a geometria que se representa na figura 3.8 permite medir directamente o deslocamento no plano segundo uma direcção bem definida, se as direcções de observação estiverem dispostas simetricamente em relação à normal ao plano. A direcção do vector sensibilidade é definida pela intersecção do plano formado pelos vectores v_i com a superfície. Desta forma é possível obter directamente os deslocamentos no plano da superfície, embora à custa do registo de dois hologramas da mesma situação e após efectuar a diferença entre ambas as medidas. A montagem sugerida por Butters [28] e desenvolvida depois por Boone [29] permite efectuar o mesmo tipo de medição utilizando apenas um holograma. Esta montagem é uma variante da anteriormente referida em que são utilizadas duas direcções de iluminação e uma direcção de observação comum.

Sendo uma técnica que pode ser utilizada sem contacto sobre superfícies difusas não preparadas previamente, a Interferometria Holográfica é bem adaptada à medição de campos de deslocamentos. O carácter global da medida recomenda a sua utilização em situações envolvendo gradientes de deslocamento localizados. Contudo a sua elevada resolução impõe um controlo apertado sobre a estabilidade das montagens ópticas utilizadas e sobre o comportamento do objecto durante a sua solicitação. Movimentos de corpo rígido aparecem sobrepostos aos deslocamentos devidos à deformação e podem mascarar completamente a medição. Para situações onde estes movimentos não são facilmente controláveis, foram desenvolvidas técnicas que permitem eliminar os seus efeitos. Envolvendo o registo de dois hologramas na holografia de *sandwich* [31], ou submetendo o feixe de referência aos deslocamentos cujo efeito se pretende eliminar [25], estas técnicas permitem, em determinadas situações, isolar as deformações sofridas pelo objecto.

3.9 A Interferometria Holográfica com Dupla Referência.

3.9.1 Técnicas de modulação de fase.

Com vista a aumentar o campo de aplicação da Interferometria Holográfica, foram desenvolvidas novas técnicas com introdução de algumas alterações na montagem inicial anteriormente descrita. A dupla referência proposta por De

Manoranjan [32], permitiu desenvolver métodos de medida com maior resolução e capacidade para, de forma expedita, aceder à grande quantidade de informação presente nos registos holográficos.

A introdução da segunda referência permite que, no processo de leitura, ambas as frentes de onda registadas num holograma de dupla exposição sejam separáveis [33]. Gravando cada frente de onda com a sua referência, obtêm-se registos que, iluminados simultaneamente com ambas as referências, reconstroiem as frentes de onda registadas de forma autónoma. Desta forma é possível alterar os padrões de interferência assim obtidos fazendo variar, *a posteriori*, a diferença de fase entre ambas as frentes de onda registadas no holograma. Com a associação de sistemas *video* a montagens com dupla referência foram desenvolvidos sistemas interferométricos que, utilizando métodos de modulação de fase, permitem uma análise global e automática dos padrões de interferência obtidos por dupla exposição [34].

Na figura 3.9 está representada uma montagem óptica para gravação e reconstrução de hologramas de dupla exposição com dupla referência. O modulador óptico colocado na saída do *laser* permite rodar a polarização da radiação para, com auxilio de um divisor de feixe sensível à polarização, obter duas frentes de onda de referências distintas.

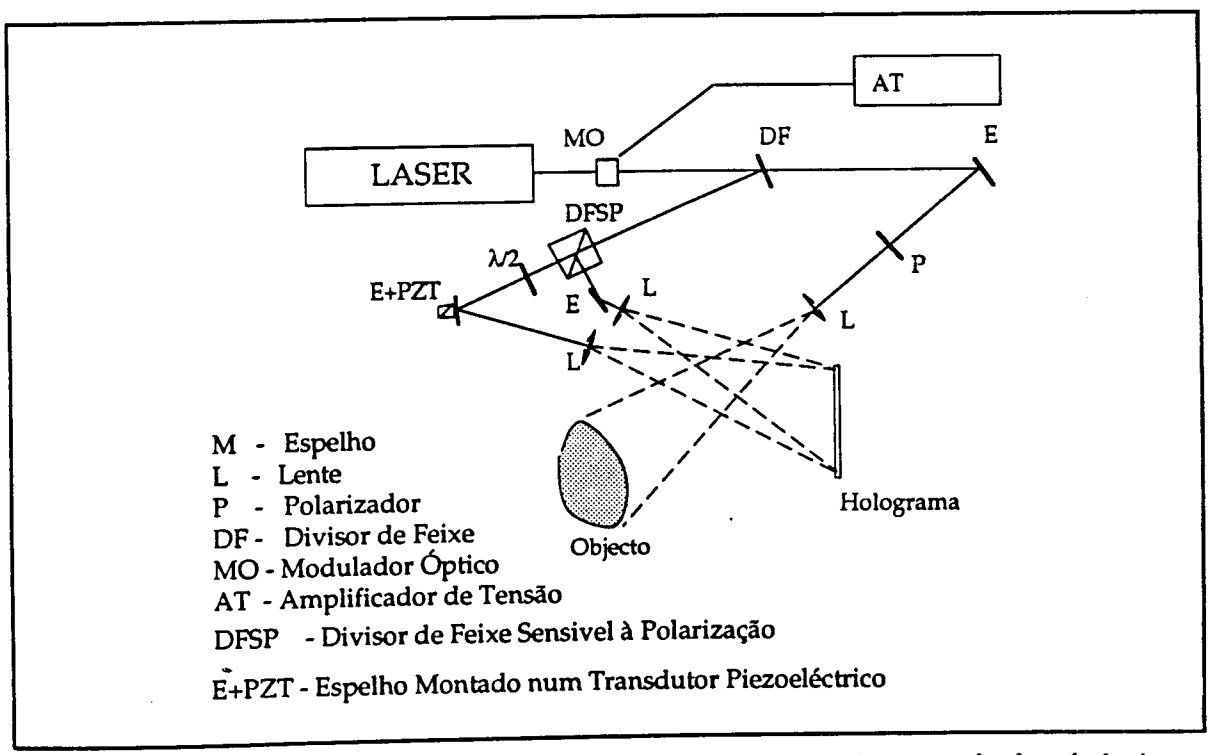


Figura 3.9 Montagem para gravação de hologramas de dupla exposição com dupla referência.

Durante o processo de reconstrução, representado na figura 3.10, a incidência simultânea de ambos os feixes de referência no holograma é obtida por ajuste do modulador óptico. O espelho montado sobre o transdutor piezoeléctrico permite variar a diferença de fase entre as duas frentes de onda registadas. Com o registo em *video* e o auxilio de sistemas de processamento digital de imagem podem obter-se mapas de fase e determinar correctamente o seu sinal. Utilizando algoritmos de cálculo envolvendo duas [35], três [36], quatro [37] ou cinco [38] imagens dos padrões de interferência com diferenças de fase bem determinadas é possível obter a distribuição espacial de fase com o respectivo sinal. A discussão dos vários algoritmos pode ser seguida num trabalho apresentado por Creath [39]. A sua discussão está fora do âmbito deste trabalho, pelo que não será aqui abordada, embora se apresentem algumas imagens obtidas desta forma. Da distribuição espacial da diferença de fase e do conhecimento da geometria da montagem óptica pode determinar-se, de forma automática, o campo dos deslocamentos sofridos pela superfície entre as duas exposições.

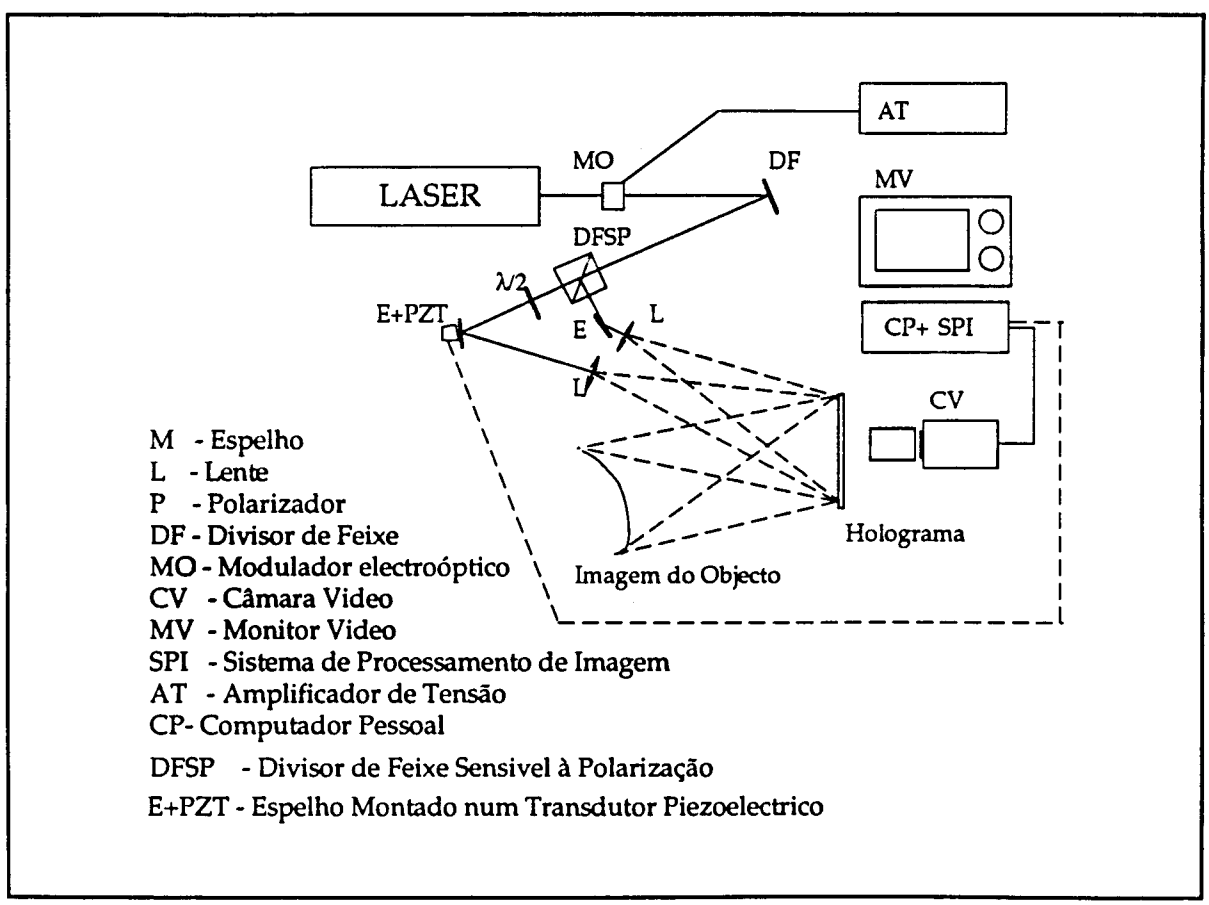


Figura 3.10 Montagem com registo em video para reconstrução de hologramas de dupla exposição com dupla referência.

Dado reunir duas montagens ópticas numa só, na Interferometria Holográfica de dupla referência a tolerância de reposicionamento do holograma é muito apertada (podendo uma rotação do holograma de 0.01° reduzir o contraste do padrão de franjas para metade [40]). Esta montagem é também sensível a alterações no comprimento de onda da radiação, uma vez que estas implicam variações na geometria dos feixes. A utilização de radiações distintas na gravação e na leitura do holograma fica condicionada à possibilidade de correcção da geometria dos feixes permitida pela montagem, sendo muito difícil um reposicionamento sem franjas [41].

A transmitância de amplitude de um holograma de dupla exposição registado com dupla referência pode ser determinada pela expressão [42]:

$$\tau=\tau_o-k\left(A_{r1}^{*}A_{01}+A_{r1}A_{01}^{*}+A_{r2}^{*}A_{02}+A_{r2}A_{02}^{*}\right) \qquad (3.48)$$

em que τ_o e k são constantes que dependem do processo de gravação, A_{r1} e A_{r2} representam os dois feixes de referência e A_{01} e A_{02} referem cada uma das frentes de onda gravadas. Daqui se conclui que cada feixe de referência reconstroi 4 frentes de onda distintas [42] (assumindo um comportamento linear para o meio de registo). Sendo a reconstrução das frentes de onda gravadas obtida com um par de frentes de onda idêntico às referências utilizadas na gravação, obtém-se a amplitude complexa da frente de onda reconstruída:

$$A_{rec}=(A_{r1}+A_{r2})\,\tau \qquad (3.49)$$

que, combinada com a equação (3.48), permite obter oito termos distintos descritos por:

$$\begin{aligned} A_{rec} \propto\ & A_{r1}A_{r1}^{*}A_{01}+A_{r1}A_{r1}A_{01}^{*}+A_{r1}A_{r2}^{*}A_{02}+A_{r1}A_{r2}A_{02}^{*}+ \\ & A_{r2}A_{r1}^{*}A_{01}+A_{r2}A_{r1}A_{01}^{*}+A_{r2}A_{r2}^{*}A_{02}+A_{r2}A_{r2}A_{02}^{*} \end{aligned} \qquad (3.50)$$

Os termos mais importantes desta expressão são $A_{r1}A_{r1}^{*}A_{01}$ e $A_{r2}A_{r2}^{*}A_{02}$, que correspondem às imagens virtuais de ambas as frentes de onda (difracção de ordem +1), sendo as imagens reais obtidas correspondentes às formas de $A_{r1}A_{r2}A_{02}^{*}$ e $A_{r2}A_{r1}A_{01}^{*}$ (difracção de ordem -1). A geometria da montagem

deverá ser ajustada convenientemente, por forma a minorar a sua sensibilidade a erros de reposicionamento e a promover a separação espacial dos vários termos que resultam da reconstrução do holograma.

A colocação de ambos os feixes de referência do mesmo lado do holograma e com uma separação angular ligeiramente maior que a dimensão angular do objecto conduz normalmente a bons resultados [42].

Esta técnica é vulgarmente designada por quasi-heterodina [40] e, quando associada a sistemas de processamento digital de imagem, permite conceber sistemas interferométricos de medida cuja resolução é da ordem de 1/100 da franja. A sensibilidade destes sistemas às alterações de geometria da montagem óptica é largamente compensada pelo aumento de resolução das medidas e pela possibilidade de obter resultados quantitativos de forma expedita.

Esta técnica revela-se de grande utilidade no estudo de fenómenos transitórios. Os *lasers* de impulsos permitem gravar hologramas de dupla exposição, controlando com rigor os tempos de exposição e os intervalos de tempo entre exposições. Desta forma, modulando a amplitude do feixe, podem gravar-se hologramas de fenómenos evoluindo no tempo com análise de resultados em diferido e completamente independente da persistência do fenómeno. Fenómenos repetitivos permitem, por alteração do tempo entre exposições, realizar varrimentos no tempo cobrindo a evolução do fenómeno. A dupla referência garante a completa determinação da distribuição espacial de fase nos registos gravados.

A recente aquisição, pelo grupo de Óptica e Mecânica Experimental, de que o autor faz parte, de um duplo *laser* de Nd:YAG bem adaptado a este tipo de utilização justifica a atenção dedicada a esta técnica. A existência neste *laser* de dois osciladores autónomos que produzem apenas um impulso cada um durante o ciclo do sistema, permite controlar independentemente a polarização de cada feixe. Com uma taxa de repetição de 50 Hz e uma energia por impulso da ordem dos 180 mJ/impulso este *laser* permite tempos de exposição da ordem dos 20 ns e tem uma frequência compatível com uma leitura por *video*. Desta forma é possível conceber um sistema que dispensa o modulador óptico e que permite utilizar a mesma fonte de luz na gravação e na reconstrução do holograma.

As restrições impostas pelo reposicionamento poderão ser ultrapassadas com o processamento dos registos *in loco* quer utilizando tinas de revelação (*liquid gate*) quer efectuando o registo em fotopolímeros, com auxilio de uma câmera holográfica [43].

3.9.2 Técnicas Heterodinas.

A dupla referência pode também ser utilizada em técnicas de detecção heterodina, aumentando a resolução da medida de uma ordem de grandeza relativamente à técnica referida anteriormente (é possível uma resolução da ordem de 1/1000 da franja [40]). A elevada resolução alcançada com a interferometria heterodina implica sofisticados meios electrónicos utilizados na detecção da luz e na estabilização da montagem óptica.

Os métodos de estabilização, que também podem ser utilizadas com as outras técnicas já referidas, são praticamente indispensáveis quando se pretendem resoluções tão elevadas. A estabilização é normalmente obtida modulando a fase do feixe de referência com o sinal perturbador obtido a partir de um sistema detector.

A medição da distribuição de fase ao longo do registo holográfico é efectuada recorrendo a técnicas de detecção coerente ou síncrona [44]. Amplificadores de *lock-in* que, conhecida a frequência de um sinal, permitem amplificar e medir a sua fase e amplitude em situações envolvendo reduzidas relações sinal/ruído, são normalmente utilizados para este fim.

Nesta técnica o sinal de baixa frequência correspondente ao padrão de franjas secundárias modela em fase uma frequência portadora, utilizada como referência na detecção do amplificador *lock-in*. A utilização de duplo feixe de referência permite que a frequência portadora seja introduzida durante o processo de reconstrução do holograma, através de um batimento na frequência da luz. A frequência da portadora deverá ser ajustada de acordo com a gama de medida do sistema de detecção utilizado.

Das várias técnicas possíveis para esta aplicação, o autor experimentou apenas duas. Numa delas o feixe de luz utilizado na obtenção das frentes de onda de referência é separado por uma rede sinusoidal de amplitude, sendo as primeiras ordens de difracção (+1 e -1) utilizadas para gerar cada uma das frentes de onda. Após a gravação do holograma, e durante o processo de reconstrução, a rede é colocada em movimento na direcção perpendicular ao feixe incidente, o que altera a frequência de ambos os feixes criando um batimento. Da frequência espacial da rede e da sua velocidade depende a frequência do batimento, aumentando linearmente com ambas. Na figura 3.11 representa-se esquematicamente a montagem utilizada para gerar um batimento na frequência da luz.

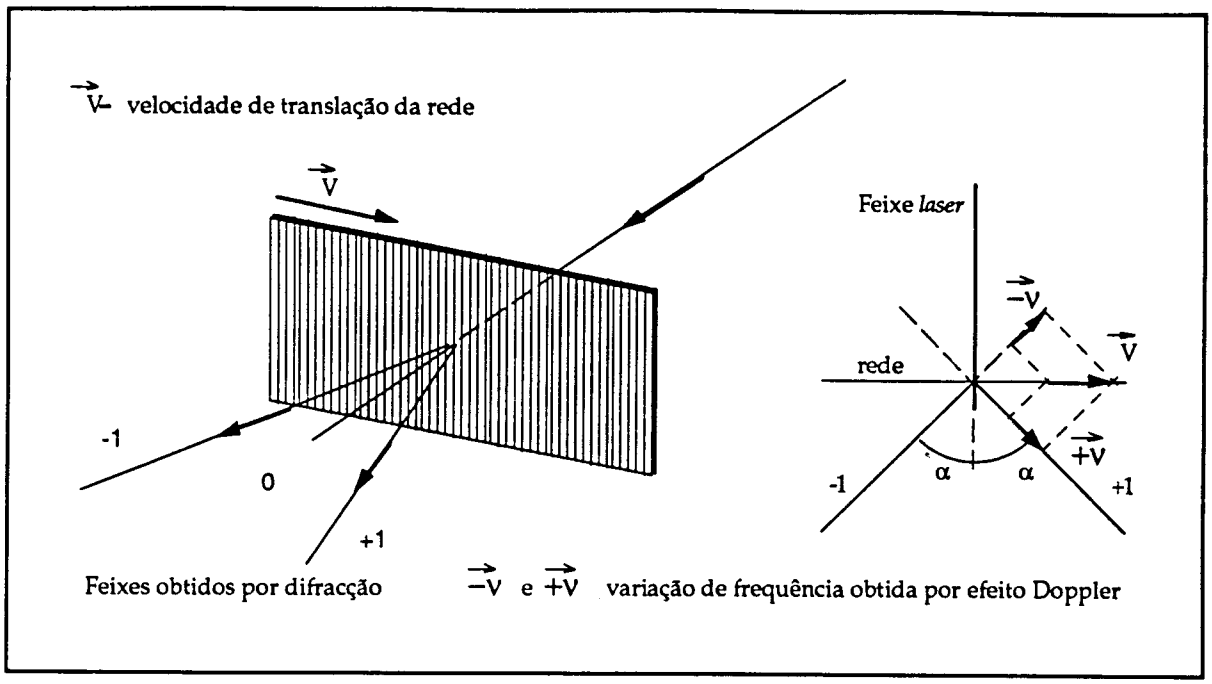


Figura 3.11 Obtenção de uma portadora para interferometria holografica heterodina com utilização de uma rede sinusoidal de amplitude.

Desta montagem são aproveitados apenas dois dos feixes obtidos por difracção da luz através da rede sinusoidal de amplitude. A alteração da frequência dos feixes é obtida por efeito Doppler e, no caso de se utilizarem ambos os feixes difractados, pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\Delta v = \frac{2 v \operatorname{sen} \alpha}{\lambda} \tag{3.51}$$

onde λ é o comprimento de onda da luz, v é a velocidade linear da rede e α representa o ângulo entre o feixe de ordem 0 e cada um dos feixes obtidos pela difracção. Este ângulo depende do passo da rede utilizada d, de acordo com a expressão [45]:

$$\operatorname{sen} \alpha = \left(\frac{m \lambda}{d} - \operatorname{sen} i \right) \tag{3.52}$$

Nesta expressão d é o passo da rede (inverso da frequência espacial), i o ângulo de incidência do feixe e α o ângulo entre o feixe incidente e a ordem de difracção m.

Neste caso, admitindo que o feixe incide perpendicularmente à rede, pode simplificar-se obtendo-se para a 1ª ordem de difracção:

$$\alpha = \text{arcsen}\,\frac{\lambda}{d} \qquad (3.53)$$

A substituição da rede linear por uma rede radial montada concêntricamente com o veio de um motor eléctrico permite construir um sistema de fácil manuseamento, com controlo da frequência da portadora através da velocidade de rotação do motor [46]. O feixe de ordem zero não altera a direcção de propagação, mantém a sua frequência inalterada e pode ser utilizado na iluminação do objecto [48].

Se nesta montagem a rede for substituida por um vidro despolido, obter-se-á um padrão de *speckle* (granitado *laser*) resultante da difusão da luz pela superfície rugosa. Fazendo interferir a luz difundida segundo a direcção definida pelo ângulo α com parte do feixe inicial, obtém-se uma frequência de batimento idêntica a anterior, se o vidro se deslocar com a mesma velocidade da rede. Esta montagem tem a vantagem de, para a mesma velocidade, permitir uma variação contínua de frequência, bastando para isso utilizar a luz difundida segundo uma qualquer outra direcção. No entanto esta montagem tem alguns inconvenientes que a não aconselham para esta aplicação: é pouco eficiente na utilização da radiação disponível e, como não existe relação entre a fase dos vários *speckles*, tem variações aleatórias de fase sempre que varia o grão de *speckle* que intervém na interferência.

A introdução da portadora pode também ser obtida recorrendo a uma montagem envolvendo a utilização de moduladores acusto-ópticos [47] [48]. Na figura 3.12 representa-se esquematicamente uma montagem óptica com dois moduladores acusto-ópticos montados em cascata, por forma a introduzirem efeitos simétricos no feixe de luz. Durante o processo de gravação do holograma ambos os moduladores são excitados com a mesma frequência, não introduzindo qualquer alteração no feixe de luz. Na reconstrução de ambas as frentes de onda é alterada ligeiramente a frequência de excitação de um dos moduladores, o que introduz um batimento de frequência igual à diferença entre as duas frequências.

Esta solução também foi testada pelo autor, tendo revelado uma menor eficiência no aproveitamento da radiação luminosa que a montagem com a rede de difracção. Contudo, existem no mercado sistemas com dois moduladores acusto-ópticos excitados sincronamente que permitem a introdução de uma

variação de frequência entre eles, o que pode tornar este sistema bastante atractivo, já que ele permite uma variação contínua da frequência de batimento.

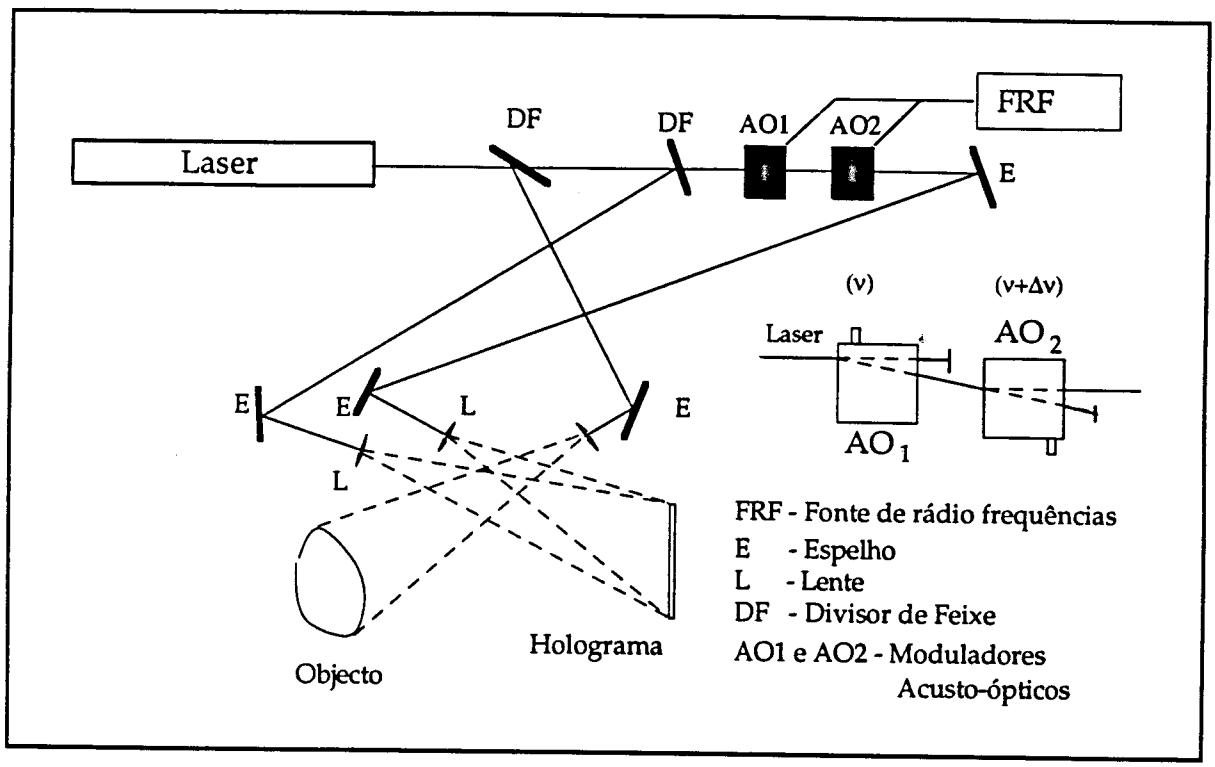


Figura 3.12 Montagem para interferometeria holográfica heterodina.

Durante o processo de reconstrução, fazendo uso de uma das técnicas anteriormente referidas, é introduzida a frequência portadora da informação registada no holograma. A detecção é pontual e a medida é efectuada a partir da comparação entre o sinal obtido no detector fixo e o sinal obtido a partir de um outro detector que, montado num posicionador de precisão, faz o varrimento ao longo da imagem. Ambos os sinais são introduzidos nas entradas de um sistema de medida sensível à fase, normalmente um amplificador de *lock-in*, cuja referência de leitura corresponde ao sinal proveniente do detector fixo. Como a medida é pontual e a luz difundida pelo holograma é dispersa, os sinais obtidos são pouco intensos, o que obriga a que a detecção seja feita com recurso a componentes que permitam a sua amplificação. Normalmente são utilizados tubos fotomultiplicadores [50], encaminhando a luz para a sua área sensível através de fibras ópticas. Desta forma garante-se a flexibilidade da montagem, mantendo a resolução espacial da medida .

Embora esta técnica envolva vários equipamentos de certa complexidade e não seja uma técnica de campo, a sua elevada resolução pode justificar a sua aplicação mesmo que à custa de um moroso processo de obtenção de resultados. A grande sensibilidade da interferometria holográfica heterodina a perturbações exteriores restringe a aplicação ao dominio laboratorial [51].

3.10 A holografia *Moiré*.

À elevada resolução das técnicas holográficas está também associada uma reduzida gama de medida, que na maior parte dos casos não ultrapassa a dezena de milésimos de milimetro. O limite máximo para os deslocamentos mensuráveis por esta técnica é imposto pela descorrelação entre as frentes de onda envolvidas no processo interferométrico que, no caso de ser total, elimina o padrão de interferência reduzindo a zero a razão sinal/ruído da medida. Deslocamentos dentro do intervalo de correlação a que correspondam elevadas densidades de franjas ou padrões de interferência fora da superfície do objecto são também de difícil medição, implicando o recurso a técnicas pontuais de varrimento com detectores ópticos de grande resolução [57]. Desta forma a aplicabilidade das técnicas interferométricas já referidas diminui à medida que aumenta a amplitude dos deslocamentos envolvidos.

As técnicas de *Moiré* permitem efectuar medições de deslocamentos a partir de fenómenos de modulação e desmodulação das frequências espaciais da luz reflectida por superfícies codificadas espacialmente [52]. A codificação da superfície introduz uma portadora de informação, cuja orientação e frequência condicionam a resolução e direcção de máxima sensibilidade da medida, pelo que são normalmente ajustadas de acordo com a medição pretendida. Deformações ou deslocamentos que alterem a frequência da portadora espacial podem ser detectadas pela sua desmodulação, obtida normalmente por batimentos com a frequência inicial.

A possibilidade de utilizar a holografia na codificação geométrica das superfícies sugeriu a medição de deslocamentos e deformações aplicando técnicas de *Moiré* a registos holográficos, sendo esta técnica designada por holografia *Moiré*. A possibilidade de ajustar a frequência e orientação da portadora permite definir a resolução da medida, e desta forma obter medições de deslocamentos

com amplitudes superiores às normalmente conseguidas com as técnicas interferométricas já referidas.

Na holografia *Moiré* o registo holográfico é utilizado para codificar sinusoidalmente a forma das superfícies antes e depois de serem submetidas às solicitações que lhe alteram a geometria. Para a introdução da portadora são utilizadas as técnicas holográficas de contorno, com as quais se obtêm padrões de franjas sinusoidais que caracterizam a topografia das superfícies. Estes padrões correspondem às curvas de nível da geometria orientadas segundo uma direcção definida pela orientação da montagem óptica.

Nas técnicas holográficas de contorno os padrões de franjas são obtidos por alteração, entre exposições, do índice de refracção do meio óptico envolvendo a superfície objecto [53], ou do comprimento de onda da radiação coerente de iluminação [54]. No primeiro caso, o objecto é introduzido numa tina transparente que se enche com um líquido ou gaz com um índice de refracção diferente do índice de refracção do ar. Após registar holograficamente a frente de onda difundida pela superfície do objecto, varia-se o índice de refracção do meio que o envolve, alterando a concentração ou o tipo de substância transparente introduzida na tina. Desta forma são obtidos padrões de franjas descrevendo contornos de igual profundidade. Se forem n_1 e n_2 os índices de refracção dos meios ópticos utilizados, obter-se-á um espaçamento entre franjas δ que pode ser determinado por:

$$\delta = \frac{\lambda}{2|n_1 - n_2|} \tag{3.54}$$

onde λ representa o comprimento de onda da radiação *laser*. A variação do índice de refracção do meio óptico onde a luz se propaga implica uma alteração na sua velocidade e, consequentemente, no seu comprimento de onda. Considerando que,

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{n_1} \text{ e } \lambda_2 = \frac{\lambda}{n_2} \tag{3.55}$$

obtemos igualmente o espaçamento entre franjas a partir da expressão:

$$\delta = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2|\lambda_1 - \lambda_2|} \tag{3.56}$$

que é aplicável no caso em que os registos de contorno são obtidos por alteração do comprimento de onda da radiação coerente utilizada na iluminação [56].

Registando em dupla exposição cada uma das geometrias do objecto antes e depois da sua deformação, obtêm-se dois padrões caracterizando ambas as geometrias. A comparação dos dois registos obtidos permite revelar um padrão de franjas de baixa frequência correspondente às variações de frequência da portadora provocadas pela deformação do objecto. A soma incoerente dos dois registos de dupla exposição no mesmo holograma permite obter o padrão de *Moiré* directamente num só registo holográfico.

Utilizando holografia *Moiré* é possível efectuar medições de deslocamentos com uma resolução variável que pode ser duas ordens de grandeza inferior à da interferometria holográfica convencional, sendo a resolução definida como metade do comprimento de onda da frequência utilizada na medida [55] [56].

Embora mantendo todas as exigências de estabilidade no registos holográficos, esta técnica tem a vantagem de permitir alterar a resolução da medida numa gama bastante ampla, dependente da portadora utilizada na codificação das superfícies. O método envolvendo variação de índices de refracção é o mais fácil de utilizar e o que permite obter uma maior gama de variação na frequência dos registos. A distância entre cada contorno pode variar entre 0.75λ - 1.5λ combinando vários líquidos e o ar atmosférico, 1.5λ - 500λ utilizando apenas combinações de liquídos e acima de 300λ no caso de serem utilizadas combinações de vários gases [56]. A variação do comprimento de onda da radiação implica que sejam utilizados *lasers* com capacidade para emitir em várias frequências normalmente discretas e, como a alteração de frequência implica variações na direcção de propagação da luz, obriga a correcções na geometria da montagem.

Da combinação dos vários registos dos padrões de interferência codificando a geometria das superfícies obtêm-se os padrões de *Moiré* desmodulando a frequência da portadora. Como a frequência das franjas de *Moiré* é muito inferior à da portadora, é possível utilizar filtragens para isolar o padrão que corresponde ao resultado da medida

Uma outra aplicação para as técnicas de holografia *Moiré* foi sugerida por Boone e permite obter registos de *Moiré* descrevendo rotações de superfícies segundo uma determinada direcção [58]. Gravando de forma incoerente dois registos idênticos de dupla exposição, entre duas situações de uma mesma superfície, é possível obter um padrão de *Moiré* descrevendo a rotação se entre os

dois pares de exposições o holograma for deslocado ligeiramente numa direcção paralela à superfície do objecto. A direcção da rotação medida é paralela à superfície e perpendicular à direcção do movimento de translação imposto, sendo obtido o mesmo efeito por deslocamento do objecto.

A aplicação destas técnicas em tempo médio conduz a resultados pouco satisfatórios, pelo que a sua aplicação ao estudo de vibrações é normalmente efectuada recorrendo a técnicas de modulação de amplitude [59] [60].

Referências.

[1] Mainman, T. H. , "Stimulated Optical Radiation in Ruby", Nature , Vol. 187, nº 4736, pág. 493-494, 1960.

[2] Gabor, D., " A New Microscopic Principle ", Nature , Vol. 161, nº 4098, pág. 777-778, 1948.

[3] Gabor, D., "Microscopy by Reconstructed Wave-Fronts", Proc. Roy. Soc. A197, 454, 1949.

[4] Leith, E. N., Upatnieks J., "Reconstructed Wavefronts and Communication Theory", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 52, nº 10, pág. 1123-1130, 1962.

[5] Leith, E. N., Upatnieks J., "Wavefront Reconstruction with Continuous-Tone Objects", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 53, nº 12, pág. 1377-1381, 1963.

[6] Leith, E. N., Upatnieks J., "Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 54, nº 11, pág. 1295-1301, 1964.

[7] Powell, R.L., Stetson, K.A., "Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 55, nº 12, pág. 1593-1598, 1965.

[8] Stetson, K.A.; Powell, R. L., "Interferometric Hologram Evaluation and Real-Time Vibration Analysis of Diffuse Objects", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 55, nº 11, pág. 1694-1695, 1965.

[9] Haines, K.A., Hildebrand, B. P. , "Surface-Deformation Measurement Using the Wavefront Reconstruction Technique", Applied Optics, Vol.5, nº 4, pág.595-602, 1966.

[10] Newton,I.,"Optics: or Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light", 3ª edição, William & John Innys, Londres, 1721.

[11] Young, Th., "On the Theory of Light and Colours", Philos. Trans. Roy. Soc. Lond., 91, parte 1, 1802.

[12] Fresnel, A., "Ouevre Complètes d' Augustin Fresnel", publicadas por Henri de Senarmon, Émile Verdet e Léonor Fresnel, Paris, 1866.

[13] Williams, D.C.(Ed.); "Optical Methods in Engineering Metrology", Chapman & Hall, pág.155, Londres, 1993.

[14] Ostrovsky, Y. I.; Butosov, M. M.; Ostrovskaya, G. V. ; "Interferometry by Holography", (Ed. MacAdam, D.L.), Springer-Verlag, Berlin, 1980.

[15] Wilson, J.; Hawkes, J.F.B.; "Lasers Principles and Applications", Prentice Hall International (U.K.) Ltd, Great Britain, 1987.

[16] Waters, J. P. ;"Holography", in "Holographic Nondestructive Testing", Erf, K. R. (Ed.);Academic Press, Inc., New York, pág. 5 - 59, 1974.

[17] Lohmann, A.; "Optical Single-Sideband Transmission Applied to the Gabor Microscope", Opt. Acta, 3, 97 , 1956.

[18] Schwider, J.;"Advanced Evaluation Techniques in Interferometry", E.Wolf, *Progress in Optics* XXVIII, Elsevier Science Pub. B.V.; 1990.

[19] Horman, M. H.; "Aplication of Wavefront Reconstruction to Interferometry", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 55, 1965.

[20] Haines, K.; Hildebrand, B. P.; "Contour Generation by Wavefront Reconstruction", Physics Letters, Vol. 19, Nº 1, pág. 10-11, 1965.

[21] Burch, J. M.; "Holographic Measurement of Displacement and Strain", Journal of Strain Analysis, Vol. 9, nº 1, pág. 1-3, 1974.

[22] Evans, W.T.; Russell, R.M.; White, A.;"Application of Holographic Interferometry to Cylinder Deformation", Journal of Strain Analysis, Vol. 22, nº 2, pág. 63-74, 1987.

[23] Goldberg, J.L.; "A Method of Three-Dimensional Strain Measurement on Non-Ideal Objects Using Holographic Interferometry", Experimental Mechanics, pág. 59-73, 1983.

[24] Ennos, A.E.; "Measurement of in-Plane Surface Strain by Hologram Interferometry", Journal of Sci. Instruments, Journal of Physics E, Serie 2, Vol. 1, pág. 731-734, 1968.

[25] Mottier, F.M.; "Holography of Randomly Moving Objects", Applied Physics Letters, Vol. 15, nº 2, pág. 44- 45, 1969.

[26] Siebert, L.D.; "Front-Lighted Pulse Laser Holography", Applied Physics Letters, Vol. 11, nº 10, pág. 326-328, 1967.

[27] Zech, R.G.; Siebert, L.D.; "Pulsed Laser Reflection Holograms", Applied Physics Letters, Vol. 13, Nº 12, pág. 417-418, 1968.

[28] Butters, J.N.;" Application of Holography to Instrument Diaphragm Deformation and Associated Topics", *The Engineering Uses of Holography*, Cambridge University Press, London, New York, 1970.

[29] Boone, P.M.; "Holographic Determination of in-Plane Deformatio", Optics Technology, 2, (2), pág. 94-98, 1970 .

[30] Stroke, G.W.; Labeyrie, A.E.; "Two-Beam Interferometry by Sucessive Recording of Intensities in a Single Hologram", Applied Physics Letters , Vol. 8, nº 2, pág. 42-44, 1966.

[31] Abramson, N.; "Sandwich Hologram Interferometry; a New Dimension in Holographic Comparison ", Applied Optics, Vol. 13, nº 9, p´g. 2019-2025, 1974.

[32] De, M; Sevigny; "Three-Beam Holographic Interferometry", Applied Optics, Vol. 6, nº 10, pág. 1665- 1672, 1967.

[33] Ballard, G.S.; "Double-Expousure Holographic Interferometry with Separate Reference Beams", J. of Applied Physics, Vol. 39, pág. 4846-4848, 1968.

[34] Breuckmann, B.; Thieme, W.;"Computer-Aided Analysis of Holographic Interferograms Using the Phase-Shift Method", Applied Optics, Vol. 24, nº 14, pág. 2145-2149,1985.

[35] Santoyo, F.M.; Kerr, D.; Tyrer, J.R.; "Interferometric Fringe Analysis Using a Single Phase Step Technique", Applied Optics, Vol. 27, nº 21, pág. 4362-4364, 1988.

[36] Hariaran, P.; Oreb, B.F.; Brown, N. ; "A Digital Phase-Measurements System for Real-Time Holographic Interferometry", Optics Communications, Vol. 41, nº 6, pág. 393-396, 1982.

[37] Schwider, J. ; Burow, R.; Elssner, K.-E.; Grzanna, J.; Spolaczyk, R.; Merkel, K.; "Digital Wave-Front Measuring Interferometry: Some Systematic Error Sources", Applied Optics, Vol, 22, nº 21, pág. 3421-3432, 1983.

[38] Hariharan, P. ; Oreb, B.F.; Eiju, T.; "Digital Phase-Shifting Interferometry: a simple Error-Compensating Phase Calculation Algorithm", Applied Optics, Vol. 26, nº 13, pág. 2504-2405, 1987.

[39] Creath, K.; "Phase-Measurements Interferometry Techniques", in *Progress in Optics*, vol. XXVI, Ed. E. Wolf (Elsevier Science Publishers) , Amsterdam, pág. 351-393, 1988 .

[40] Dändliker, R.; Thalmann, R.;"Heterodyne and Quasi-Heterodyne Holographic Interferometry", Optical Engineering, Vol. 24, nº 5; pág. 824-831, 1985.

[41] Wagner, J.W.; "Triple-Exposure Dual-Reference Holographic Recording for Heterodyne Analysis of Transient Phenomena", Applied Optics, Vol. 24, nº 18, pág. 2937-2940, 1985.

[42] Dändliker, R.; Marom, E.; Mottier, F. M.; "Two-Reference-Beam Holographic Interferometry", J. Opt. Soc. Am. , Vol. 66, nº 1, pág. 23-30, 1976.

[43] Crawforth, L. ; Lee, C.-K.; Munce, A. C.; "Application of Pulsed Laser Holographic Interferometry to the Study of Magnetic Disk Drive Component Motions", *SEM-Proc. of Holographic Interferometry and Speckle Metrology* , Baltimore, 5 a 8 de Nov. 1990.

[44] Meada, M.L.;"Lock-in Amplifiers principles and applications", IEE Electrical Measurement Series 1,Pub. Peter Peregrinus Ltd., Londres UK, 1983.

[45] Jenkins, F. A.; White, H. E.; " Fundamentals of Optics, 4ª edição, Mc Graw-Hill International Editions, Mc Graw-Hill Book Company, Singapore, 1981.

[46] Stevenson, W.H.; "Optical Frequency Shifting by Means of a Rotating Difraction Grating", Applied Optics, Vol. 9, nº 3, pág. 649-652, 1970.

[47] Cummins, H. Z.; Knable, N.; Yeh, Y.;"Observation of of Diffusion Broadning of Rayleigh Scattered Light", Physical Review Letters, Vol. 12, nº 6, pág. 150-153, 1964.

[48] Dändliker, R.; Eliasson, B.; Ineichen, B.; Mottier, F.M.; "Quantitative Determination of Bending and Torsion Through Holographic Interferometry", Proc. de "The Engineering Uses of Coherent Optics", 8- 11 Abril 1975, Strathclyde, Glasgow, pág. 99-122, 1975.

[49] Dändliker, R.; Eliasson, B.;"Accuracy of Heterodyne Holographic Strain and Stress Determination", Experimental Mechanics, pág. 93-101, Mar. 1979.

[50] Dändliker, R.; "Heterodyne Holographic Interferometry", in *Progress in Optics*, vol. XXVII, Ed. E. Wolf (Elsevier Science Publishers) , Amsterdam, pág. 3-82, 1980.

[51] Thalmann, R.; Dändliker, R.; "Strain Measurement by Heterodyne Holographic Interferometry", Applied Optics , Vol. 26, nº 10, pág. 1964-1971, 1987.

[52] Durelli, A. J.; Parks, V.J.; "Moire Analysis of Strain", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1970.

[53] Tsuruta , T.; Shiotake, N.; Tsujiuchi, J.; Matsuda, K.; "Holographic Generation of Contour Map of Diffusely Reflecting Surface by Using Immersion Method", Jap. Appl. Phys. , Vol. 6, pág. 661-, 1967.

[54] Hildebrand, B. P.; Haines, K. A.; "Multiple-Wavelength and Multiple-Source Holography Applied to Contour Generation", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 57, nº 2, pág. 155-162, 1967.

[55] Zelenka, J. S.; Varner, J. R.; "A New Method for Generating Depth Contours Holographically", Applied Optics, Vol. 7, pág. 2107- , 1968.

[56] Zelenka, J. S.; Varner, J. R.; "Multiple-Index Holographic Contouring", Applied Optics, Vol. 8, nº 7, pág. 1431-1434, 1969.

[57] Varner, J. R.; "The Use of Contour Maps for Measuring Surface Displacement", in "Holographic Nondestructive Testing", Erf, K. R. (Ed.), Academic Press, Inc., New York, pág. 265-274, 1974.

[58] Boone, P.; Verbiest, R.; "Application of Hologram Interferometry to Plate Deformation and Translation Measurements", Optica Acta, Vol. 16, nº 5, pág. 555-567, 1969.

[59] Blanco, J.; Fernandez, J.L.; Doval, A.F.; López, C.; Pino, F.; Pérez-Amor, M.;"Study of Plate Vibrations by Moiré Holography", Proc. SPIE, Vol. 1508, *Industrial Applications of Holographic and Speckle Measuring Techniques*, pág. 180-190, 1991.

[60] Lage,A.L.V.S.; "Técnicas Ópticas na Análise de Fenómenos Dinâmicos", Tese de Doutoramento,Faculdade de Engª. da Universidade do Porto, 1987.

CAPÍTULO 4

4. ESPI - *Electronic Speckle Pattern Interferometry*

4.1 Introdução

4.2 Holografia/ESPI. Diferenças e semelhanças

4.3 Interferómetros básicos

4.4 Modos de funcionamento

4.5 Obtenção do padrão de interferência

4.5.1 Referência especular
4.5.2 Referência de *speckle*

4.6 Obtenção do sinal *video* em ESPI

4.7 Realização da referência

4.7.1 Cunha
4.7.2 Espelho com orifício
4.7.3 Espelhos múltiplos
4.7.4 Fibra óptica

4.8 Parâmetros de ajuste do sistema de ESPI

4.9 Limitações do método

Referências

CAPÍTULO 4

4. ESPI - *Electronic Speckle Pattern Interferometry*

4.1 Introdução.

Após os trabalhos de Powell e Stetson [1] e Haines e Hildebrand [2], as técnicas de interferometria holográfica foram aplicadas com êxito a uma grande variedade de problemas metrológicos. Contudo, a sua divulgação ficou muito aquém das expectativas geradas pelas potencialidades que esta técnica cedo revelou. Muita da relutância à sua utilização deveu-se ao meio utilizado no registo dos padrões de interferência. A emulsão fotográfica torna o processo de gravação moroso e a necessidade do processamento químico na revelação praticamente restringe a sua utilização aos laboratórios.

A substituição da emulsão pela câmera *video* no registo dos padrões de interferência foi proposta de forma mais ou menos simultânea por três grupos distintos. Butters e Leendertz [3] em Inglaterra, Macovsky [4] nos Estados Unidos e Schowomma [5] na Austria. Enquanto Macovsky e Schowomma desenvolveram esta técnica a partir da Holografia, o grupo inglês considerou-a como uma extensão das técnicas de *speckle* (granitado *laser*) designando-a por *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI). Embora ESPI seja a designação mais vulgar, esta técnica é também conhecida por Holografia-TV [6], Holografia Electro-Óptica [7], *Digital Speckle Pattern Interferometry* DSPI [8] e Holografia Imagem Electrónica [15].

Ao substituir a emulsão fotográfica, com uma resolução que pode ir até às 3000 linhas por mm, pelo alvo de uma câmera de *video* cuja resolução é duas ordens de grandeza inferior, são impostas algumas limitações. A necessidade de aumentar o tamanho do *speckle* para o tornar compatível com a resolução do detector *video* implica que o contraste das imagens obtidas seja muito inferior ao obtido com a Holografia. A informação registada é, no entanto, mais que suficiente para a maioria das aplicações onde é normalmente utilizada a interferometria holográfica. Mantendo a maioria das características da Holografia, o ESPI tem como principal vantagem a possibilidade de gravar hologramas com a frequência do *video* (25 imagens/segundo no sistema *video* europeu ou 30 imagens/segundo no sistema americano) sem necessidade de reposicionamento ou processamento químico.

Após os trabalhos pioneiros, foram vários os grupos que contribuiram para o desenvolvimento desta técnica: Pederson *et al* [9] na Noruega , Biedermann, K. *et al* [10] na Suécia e Nakadate *et al* [11] no Japão foram alguns dos mais activos. Em Portugal o grupo de Óptica Quântica da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto foi o pioneiro na utilização deste procedimento [12], tendo publicado vários trabalhos, entre os quais duas patentes de registo de invenção [13], [14] e uma tese de doutoramento 1987 [15].

Com a evolução tecnológica foram desenvolvidos e aperfeiçoados vários equipamentos que tornaram as técnicas de interferometria holográfica com registo em *video* acessíveis a qualquer grupo de investigação.

Para o processamento e registo dos sinais *video* apareceram as memórias digitais compatíveis com o barramento de qualquer computador pessoal. Este *hardware* permite efectuar subtracções em tempo real, processar as imagens obtidas e armazená-las directamente na memória do computador.

Para o registo dos padrões de interferência surgiram as câmeras de CCD (*charge coupled devices*) [16] com maior sensibilidade à luz e permitindo imagens com melhor contraste.

Os díodos *laser*, apesar das suas reduzidas dimensões, têm visto a sua potência aumentada. Com comprimentos de coerência que podem ir até alguns metros e emitindo em frequências dentro do espectro visível, podem considerar-se as fontes de luz estruturada mais ajustadas a este tipo de aplicação.

A associação das técnicas de processamento de imagem e de modulação de fase permitem recolher e tratar grandes quantidades de informação, pelo que é possível conceber sistemas que facilitem a obtenção e interpretação de resultados obtidos pelas técnicas interferométricas.

Hoje é vasto o rol de aplicações do ESPI e o aparecimento e comercialização de sistemas portáteis chave-na-mão permite que esta técnica fique ao alcance de operadores com um mínimo de preparação em óptica.

4.2 Holografia/ESPI. Diferenças e semelhanças.

Da comparação entre a montagem mais vulgar de ESPI e as várias montagens utilizadas em interferometria holográfica resultam evidentes as grandes semelhanças entre o ESPI e a Holografia de imagem plana, como se pode ver na figura 4.1 e 4.2 [17]. Na figura 4.1 compara-se o processo de gravação de ambas as técnicas em todos os seus passos. O objecto consiste numa placa encastrada numa das extremidades que vibra no seu primeiro modo próprio, sendo o registo efectuado em tempo-médio.

Comum a todas as técnicas de interferometria holográfica é a gravação espacial de um padrão de franjas resultante da interferência entre o feixe de referência e o feixe objecto. Estas franjas de interferência serão designadas por franjas primárias, sendo o padrão por elas formado designado por padrão primário.

Qualquer movimento do objecto, variação do comprimento de onda da radiação *laser* ou perturbação que altere o feixe objecto inicial verificada entre ou durante exposições, acarreta uma variação do padrão primário. Da combinação de padrões primários resultam padrões de franjas de menor frequência espacial, designados por padrões secundários, que caracterizam as alterações verificadas durante ou entre os tempos de exposição. A interpretação destas franjas permite caracterizar os movimentos verificados no objecto e/ou as variações do comprimento de onda da radiação iluminante, sendo este o processo de medida na interferometria holográfica.

Com a substituição da emulsão fotográfica pela câmera de *video* reduz-se a resolução do meio de registo de aproximadamente 100 vezes, o que implica algumas restrições no registo dos padrões de interferência.

Os padrões de franjas primários portadores da informação têm que ser resolvidos pela câmera; logo, a sua frequência espacial máxima ν deve ser limitada. Como a frequência espacial num padrão de franjas, resultante da interferência entre dois feixes que fazem entre si um angulo θ, é calculada por

$v=\sin\theta/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda da radiação luminosa, em ESPI o ângulo entre os dois feixes é normalmente inferior a 1º. Pelo contrário, em Holografia a utilização da referência fora do eixo do feixe objecto é até desejável, pois permite evitar que o feixe de ordem zero interfira na detecção do sinal.

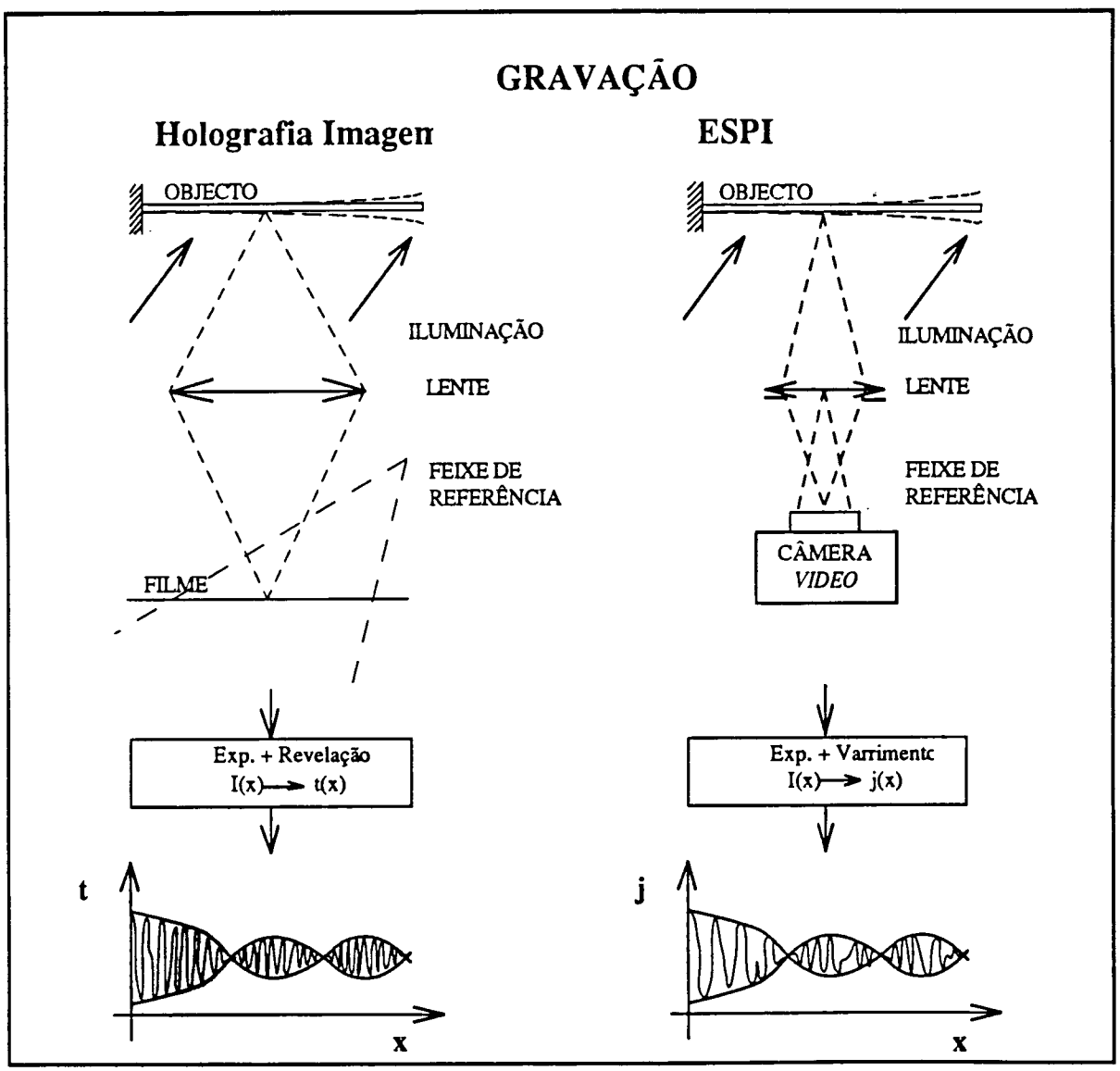


Figura 4.1 Comparação esquemática entre a Holografia imagem e o ESPI; a gravação em tempo médio [17].

Em ambas as técnicas, a luz difundida pela superfície difusa do objecto forma um padrão de interferência de intensidade aleatória, vulgarmente designado por padrão de *speckle*. Com a referência alinhada com o feixe objecto dificilmente é

reconhecido o padrão de franjas primárias, pois o seu espaçamento é da ordem de grandeza dos grãos de *speckle*. Em Holografia o ângulo entre os feixes é normalmente tão elevado que permite que se formem franjas regularmente espaçadas dentro de cada grão de *speckle*.

O processo de gravação de um holograma consiste na exposição de uma emulsão fotográfica a qual, depois de revelada, altera a distribuição espacial de transmitância de amplitude do feixe de reconstrução, por forma a reconstruir a frente de onda gravada. No ESPI, ao expôr o alvo da câmera ao padrão de franjas a gravar, altera-se a sua distribuição espacial de carga eléctrica. O varrimento *video* converte essa distribuição num sinal eléctrico cuja tensão é, em cada ponto, proporcional à amplitude da frente de onda incidente .

No caso de não existir qualquer movimento do objecto, ambos os métodos permitem registar um padrão de interferência de elevado contraste. A qualquer movimento do objecto corresponde uma variação das franjas primárias que, se ocorrer durante o tempo de exposição, será integrada, diminuindo o seu contraste. Como resultado obtêm-se imagens com variações de contraste relacionadas com o movimento do objecto. Em ambas as técnicas, o processo de reconstrução converte as variações de contraste em variações de intensidade, dando origem aos padrões de franjas secundárias.

Como se pode ver na figura 4.2, é no processo de reconstrução que se verificam as maiores diferenças entre estas duas técnicas. Enquanto na Holografia todo o processo é efectuado por via óptica, no ESPI o sinal óptico é convertido em sinal eléctrico, sendo o processamento efectuado sobre o segundo.

Em Holografia, a reconstrução da imagem é efectuada por via óptica. O termo portador da informação e o termo contínuo são separados por difracção, o que corresponde a uma filtragem espacial passa-alto. A observação da imagem no feixe difractado é feita por detecção de intensidade, quadrado da amplitude.

Como a eficiência da difracção é proporcional ao contraste das franjas primárias, às zonas onde esse contraste foi destruido pelo movimento do objecto correspondem as franjas secundárias. Utilizando a comparação sugerida por Leith e Upatnieks [18], pode dizer-se que a Holografia é o equivalente em óptica ao processo de modulação, dispersão de frequência e detecção quadrática de sinais rádio. As franjas secundárias são uma modulação de amplitude da portadora de informação, a qual corresponde às franjas primárias. Na transmissão de sinais rádio, após a desmodulação, a portadora é removida por uma filtragem passa-baixo, o que é equivalente à não resolução do *speckle* em Holografia. Em ESPI, devido à proximidade e mesmo sobreposição entre a modulação e a

portadora, não é possível utilizar a filtragem passa-baixo para isolar as franjas secundárias. De referir ainda que a reconstrução em ESPI também não separa a imagem real da sua conjugada, sendo a imagem final a soma de ambas.

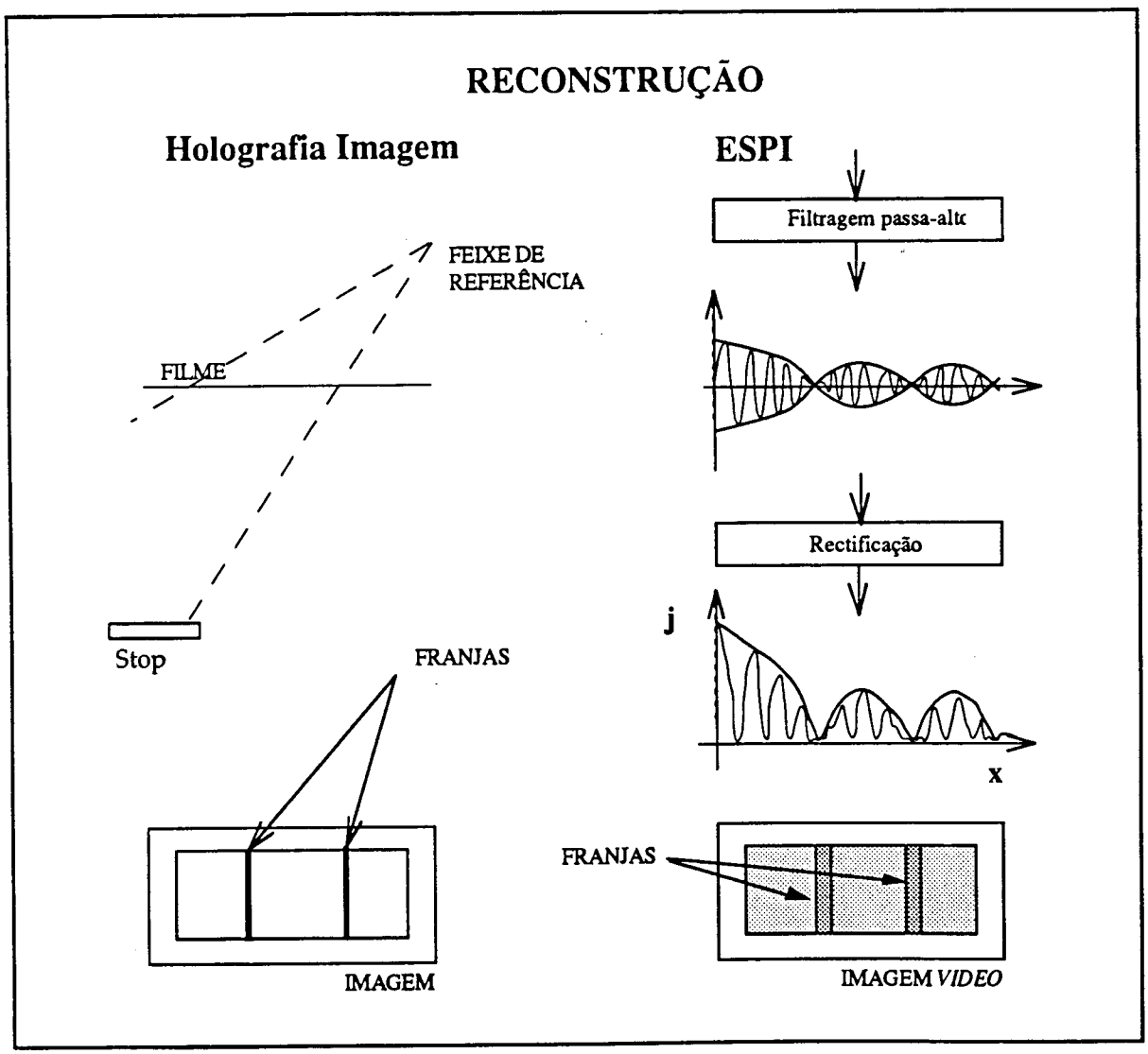


Figura 4.2 Comparação esquemática do processo de reconstrução entre a Holografia de imagem plana e o ESPI [17].

Embora o contraste das imagens obtidas em ESPI seja muito inferior ao dos registos holográficos, a obtenção de 25/30 interferogramas por segundo em suporte electrónico, com possibilidade de análise em tempo real e gravação na memória de qualquer computador pessoal, faz com que esta técnica substitua, com vantagem, a Holografia em múltiplas aplicações.

4.3 Interferómetros Básicos.

Um sistema de ESPI é basicamente um interferómetro óptico com registo dos padrões de interferência em *video*. As franjas presentes nos registos obtidos provêm de alterações verificadas nos padrões de *speckle* devidas a fenómenos que podem ser estáticos ou dinâmicos, e provocam alterações numa ou ambas as frentes de onda do interferómetro. As variações na distribuição espacial das franjas de interferência, devidas a alterações de fase entre as duas frentes de onda do interferómetro, que se representam na figura 4.3, permitem as medições interferométricas. A medição efectuada depende das caracteristícas da radiação *laser* utilizada e da posição relativa dos vários componentes ópticos, quer entre si na constituição do interferómetro, quer deste relativamente ao objecto.

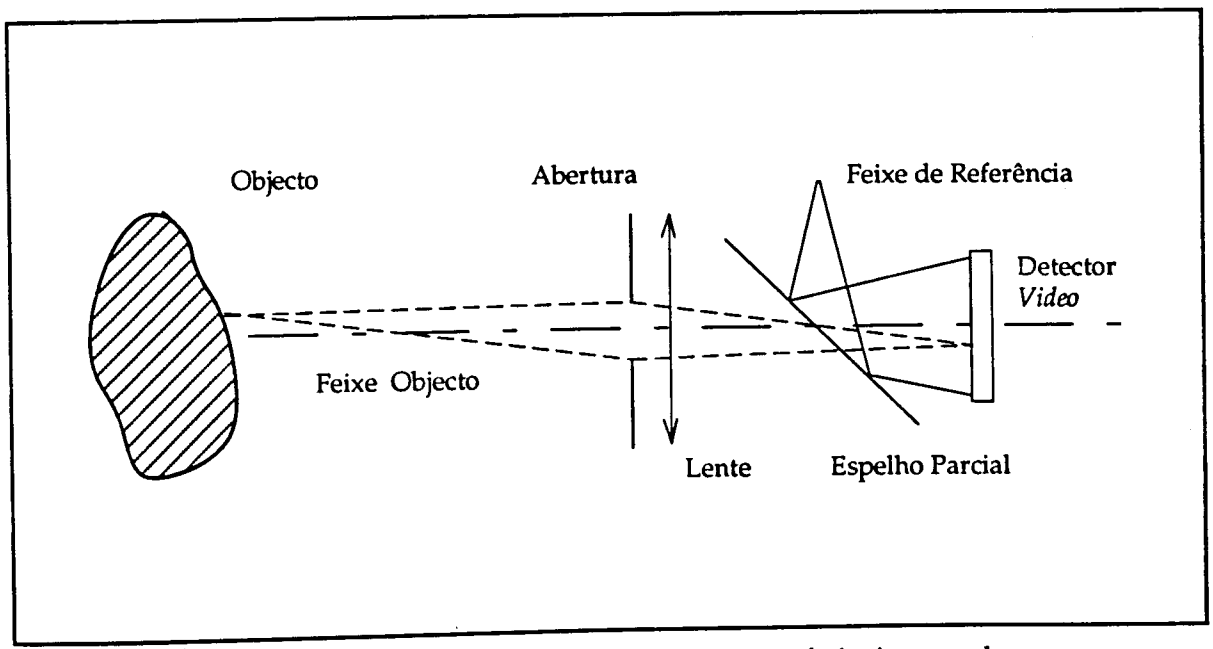


Figura 4.3 Montagem convencional de ESPI com referência especular.

Atendendo às caracteristícas das frentes de onda envolvidas na interferência, podem ser definidos dois tipos de interferómetros com registo em *video* (ver figura 4.4):

i) interferómetro com referência especular (espelhada)

ii) interferómetro com referência de *speckle*.

No primeiro grupo incluem-se os interferómetros baseados na montagem de Michelson, que são normalmente utilizados para medições de deslocamentos fora do plano. A frente de onda de referência é esférica e alinhada com a frente de onda objecto. Na condução da referência são utilizadas apenas superfícies especulares por forma a garantir que a frente de onda permanece isenta de *speckle*.

O segundo grupo é composto por todos os interferómetros em que a referência não é especular, tais como:

i) a montagem de Michelson em que ambas as frentes de onda são padrões de *speckle*, utilizada para medições de deslocamentos fora do plano;

ii) o interferómetro com dupla direcção de iluminação [19] para medição de deslocamentos no plano;

iii) o interferómetro com sensibilidade para gradientes de deslocamento fora do plano (*Shear*) [20].

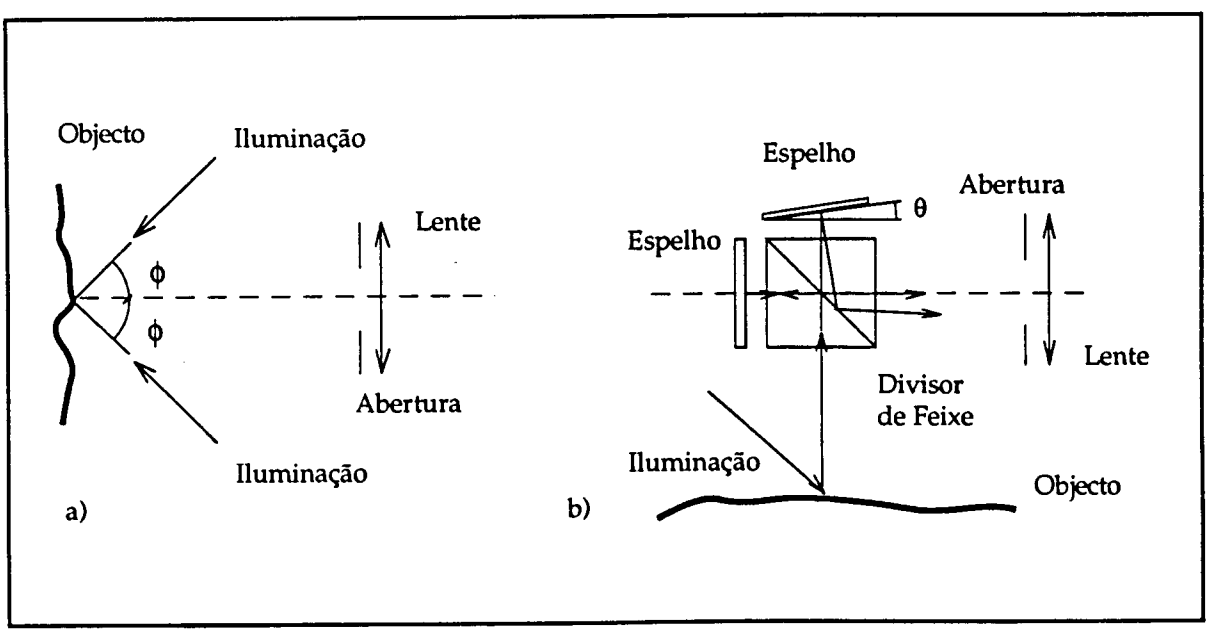


Figura 4.4 a) Interferómetro para medição de deslocamentos no plano, b) Interferómetro para medição de gradientes de deformação fora do plano.

4.4 Modos de funcionamento.

Quanto à forma como é efectuada a correlação entre os padrões de *speckle*, podem distinguir-se dois modos de funcionamento: subtracção e adição.

Qualquer deles conduz a padrões de franjas de correlação mas, enquanto a adição é normalmente efectuada directamente sobre o detector *video*, a subtracção é feita electronicamente. A filtragem passa-alto e a rectificação são comuns aos dois modos; no entanto, a subtracção exige a utilização de dispositivos de armazenamento de imagem que permitam gravar o padrão inicial. As diferenças principais entre os dois modos de correlação são representadas na figura 4.5.

A correlação por adição conduz a sistemas mais simples pois, desde que o intervalo de amostragem não exceda o tempo de persistência da imagem no alvo *video*, a adição pode ser efectuada directamente na câmera. É este o modo de correlação normalmente utilizado no estudo de vibrações em tempo médio, onde a integração das imagens durante um quadro de *video* pode ser encarada como um meio de gravação. A correlação por adição pode também ser utilizada no estudo de fenómenos dinâmicos em ambientes de grande instabilidade, com utilização de *laser* pulsado síncrono com o varrimento *video* [21].

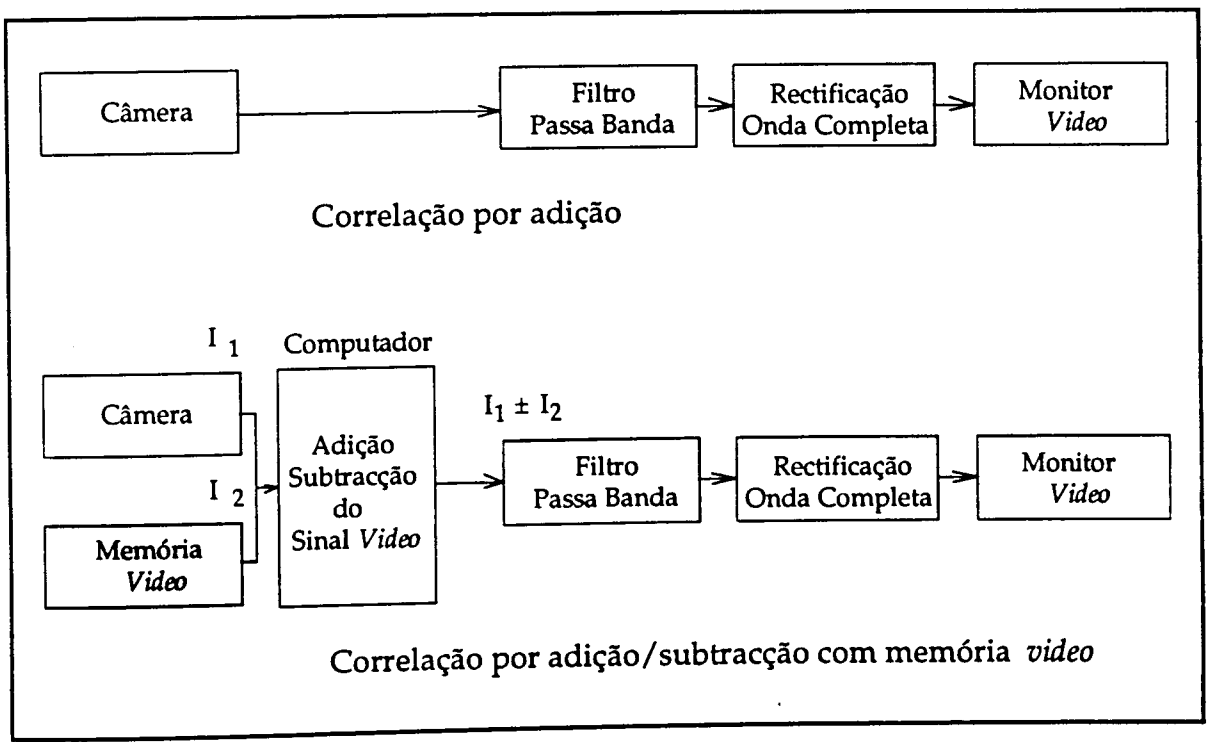


Figura 4.5 Diagrama de blocos do tratamento electrónico do sinal *video*.

A correlação por subtracção envolve a necessidade de gravação do primeiro padrão de interferência, ao qual é normalmente subtraído em tempo real a imagem proveniente da câmera. Embora nos primórdios do desenvolvimento do

ESPI isto tenha suscitado alguns problemas devido à fraca qualidade obtida com os gravadores analógicos de *video* [22], hoje em dia, as memórias digitais compatíveis com qualquer computador pessoal permitem efectuar subtracções em tempo real, síncronas com o varrimento *video* e com grande qualidade de imagem. Utilizar toda a gama dinâmica do *video* e remover todos os termos independentes do tempo a correlação por subtracção conduz a padrões de franjas com maior contraste. Este modo de funcionamento é imperativo quando são estudados fenómenos de variação muito lenta, isto é, de período maior que o tempo entre quadros de *video*.

A obtenção de padrões de interferência por subtracção pode também ser utilizada em ESPI com *laser* pulsado, desde que a leitura do detector *video* seja síncrona com o *laser* [23]. No trabalho publicado por Spooren[24] é referida uma forma de sincronizar o funcionamento da câmera CCD com um *laser* pulsado de Nd:YAG que permite operar o sistema em subtracção. Com este procedimento é possível remover parte do ruído óptico presente em ambas as imagens e melhorar assim o contraste da imagem resultante da interferência. De referir que a filtragem espacial do feixe de referência, muito utilizada nos sistemas de ESPI convencionais, não é uma operação vulgar quando se utiliza um *laser* pulsado. As potências em jogo são normalmente elevadas, pelo que a focagem do feixe implica grandes densidades energéticas que provocam a ionização do ar e a consequente introdução de instabilidade.

4.5 Obtenção do padrão de interferência.

4.5.1 Referência especular.

Ao iluminar uma superfície difusa com uma radiação coerente obtém-se um campo de luz de aspecto granular e amplitude aleatória designado por *speckle* objectivo. Formando a imagem do campo de *speckle* através de um sistema óptico obtém-se outro padrão, *speckle* subjectivo, cujo tamanho médio dos grãos depende da abertura do sistema utilizado.

Admitindo uma abertura circular e uma lente esférica ideal cuja resolução é apenas limitada pela difracção, o tamanho médio do *speckle* subjectivo d_S terá, no

plano da imagem, um tamanho aproximadamente igual ao diâmetro do disco de Airy (ver figura 4.6) para a lente [25], e pode ser calculado por:

$$d_s = 1.22 \frac{\lambda v}{a} \qquad (4.1)$$

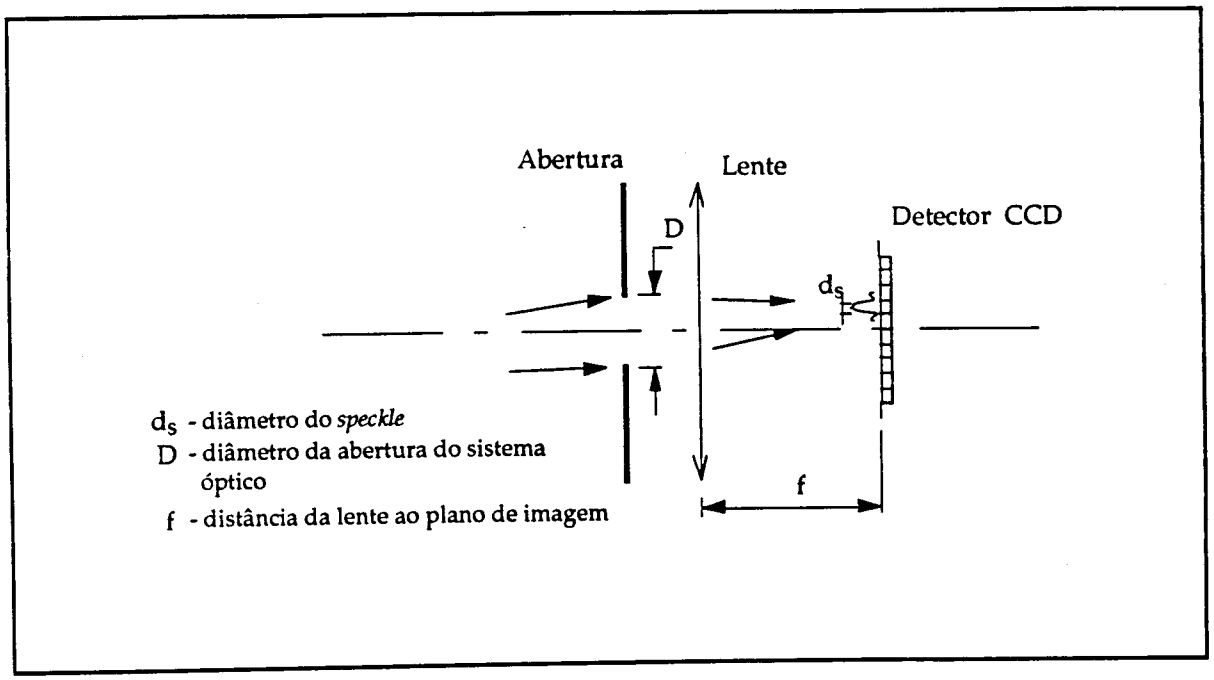


Figura 4.6 Formação de *speckle* subjectivo com uma abertura circular.

onde λ representa o comprimento de onda da radiação, v é a distância da lente ao plano imagem e a o diâmetro da abertura. Quando a distância da lente ao objecto é muito maior que a distância desta ao plano imagem, pode considerar-se que a imagem se forma no plano focal da lente e substituir a expressão (4.1) por:

$$d_s = 1.22 \lambda \ (NA) \qquad (4.2)$$

onde NA representa a abertura numérica da lente. Da adição coerente de um feixe especular alinhado com o eixo do sistema óptico com o padrão de *speckle* inicial resulta um padrão de *speckle* cujo tamanho do grão é o dobro do obtido no padrão inicial. A intensidade resultante em cada ponto depende da diferença de fase entre os feixes.

Considerando um sistema de ESPI com uma referência especular, a amplitude complexa do feixe de referência pode ser descrita por :

$$A_r = |A_r| \exp[i\phi_r] \qquad (4.3)$$

em que ϕ_r representa a fase e A_r a amplitude da radiação luminosa. O feixe objecto consiste num padrão de *speckle* resultante da reflexão da luz coerente por uma superfície difusa. A imagem desse padrão é realizada através de um sistema óptico cuja abertura deve ser ajustada por forma que o detector *video* resolva completamente o padrão de *speckle*. A imagem obtida corresponde a um padrão de *speckle* com uma distribuição de amplitude gaussiana circular no plano complexo [26], que pode ser representada pela seguinte expressão:

$$A_o = |A_o| \exp[i(\psi_o + \phi_o)] \qquad (4.4)$$

A amplitude e a fase são funções de x e y, coordenadas do ponto considerado sobre a imagem. A fase total é o resultado de duas contribuições independentes: ψ_o é uma variação rápida e aleatória característica dos padrões de *speckle*, enquanto ϕ_o é uma variação lenta que depende da posição do ponto na imagem. Ao sobrepor ambos os feixes sobre o detector *video* obtém-se o padrão de interferência primário, cuja intensidade em cada ponto depende das intensidades individuais dos dois feixes e da sua diferença de fase de acordo com a expressão:

$$\begin{aligned} I(x,y,t) &= |A_o(x,y)|^2 + |A_r(x,y)|^2 + 2|A_o(x,y)||A_r(x,y)| \\ &\times \mathrm{Re}\left(\exp\{i[\psi_o(x,y) + \phi_o(x,y,t) - \phi_r(x,y,t)]\}\right) \end{aligned} \qquad (4.5)$$

Esta equação admite que os dois termos de autocorrelação, que correspondem às intensidades de cada um dos feixes tomados individualmente, são independentes do tempo. A dependência temporal do termo de intercorrelação, terceira parcela da equação (4.5), é devida à diferença de fase entre ambos os feixes. Uma deformação da superfície que implique uma alteração de fase do feixe de referência de $\Delta\phi(x,y)$ conduz a uma variação na amplitude complexa do feixe objecto para:

$$A_{o'} = |A_o| \exp[i(\psi_o + \phi_o + \Delta\phi)] \qquad (4.6)$$

A função de franja M_n, introduzida por Stetson [27], que descreve a distribuição espacial das franjas correspondentes à imagem de ordem n, é obtida

considerando apenas os termos dependentes do tempo. Numa medição em tempo médio, onde cada quadro *video* contém a informação resultante da integração de vários ciclos de vibração, M_n será:

$$M_n = \int_T \exp\left[i\phi_m(x,y,t) - i\phi_{on}(x,y,t)\right]dt \qquad (4.7)$$

onde T é o tempo correspondente ao varrimento da imagem *video* designada pelo indice n. Esta função é aplicável quer as variações de fase sejam sinusoidais, como em tempo médio, quer se trate de variações entre dois quadros, como acontece em dupla exposição. Depois do padrão de *speckle* ter sido registado, filtrado para remoção do termo contínuo, rectificado e desmodulado por detecção quadrática, obtém-se uma função bi-dimensional que representa a distribuição espacial de brilho no monitor. Essa expressão, quando referida à imagem n, pode ser escrita da seguinte forma [28]:

$$\begin{aligned} B(x,y) = \quad & a_n^2\Big[|A_o(x,y)|^2 + |A_r(x,y)|^2 \\ & +2\,\mathrm{Re}\left[A_r^*(x,y)A_o(x,y)M_n(x,y)\right] + N_n(x,y)\Big]^2 \end{aligned} \qquad (4.8)$$

o termo a_n é uma constante dependente do processo de conversão e nesta dedução será, sem perda de generalidade, admitida igual à unidade. N_n representa o ruído electrónico associado à imagem n pelo processo de detecção e tratamento do sinal *video*. A determinação do valor esperado para o brilho no monitor implica o cálculo do valor médio para os vários termos envolvidos. Admitindo que:

- o ruído electrónico tem uma distribuição gaussiana estatisticamente independente do ruído óptico;
- os dois braços do interferómetro são independentes um do outro;
- o feixe objecto tem uma distribuição de amplitude que, no campo complexo, obedece a uma distribuição gaussiana circular;

a distribuição de brilho no monitor pode ser determinada usando a seguinte expressão [28]:

$$\langle B(x,y)\rangle = \langle I_r\rangle^2 + \langle I_0\rangle^2 + 2\langle I_r\rangle\langle I_0\rangle|M|^2 + \sigma_e^2 \qquad (4.9)$$

onde $\sigma_e^2 = \langle N^2 \rangle$ se refere ao ruído electrónico do sistema.

Os dois primeiros termos da equação (4.9) são os termos devidos à autocorrelação dos feixes de referência e objecto, respectivamente, enquanto o terceiro termo, termo de intercorrelação, contém o sinal de franja modulado numa portadora aleatória de *speckle*. Calculando a razão sinal/ruído (S/R), e admitindo que se trata de uma imagem obtida em tempo-médio, onde está envolvido apenas um padrão de *speckle*, obtemos:

$$\alpha_I = \frac{S}{R} = \frac{2|M(x,y)|^2 \langle I_r \rangle \langle I_0 \rangle}{\langle I_r \rangle^2 + \langle I_0 \rangle^2 + \sigma_e^2} \qquad (4.10)$$

Esta expressão é aplicável a sinais obtidos na observação de vibrações em tempo-médio. Os termos de autocorrelação podem ser praticamente eliminados pela filtragem passa-alto utilizada para remoção do termo continuo, se for convenientemente ajustada a relação entre os feixes referência/objecto [17].

Um outro método muito comum nas aplicações de ESPI é a dupla exposição. Neste caso o padrão de franjas secundárias é obtido por subtracção de dois padrões de *speckle* correspondentes a duas situações distintas da mesma superfície. Se no período entre a gravação dos dois padrões de *speckle* a superfície for deformada de maneira a variar a fase do feixe objecto, a subtracção dos dois padrões permite obter um conjunto de franjas secundárias que identifica a deformação sofrida pela superfície entre as duas imagens. A subtracção, que deve ser efectuada antes do processamento electrónico do sinal, permite remover facilmente todos os termos que permaneçam constantes nas duas imagens.

A distribuição do brilho obtida por este processo será descrita pela expressão:

$$B(x,y) = \sum_{n=1}^{2} \{a_n [I_n(x,y) + N_n(x,y)]\}^2 \qquad (4.11)$$

onde I_n representa a distribuição de intensidade em cada um dos padrões de interferência primários e é dado pela expressão (4.5). Substituindo I_n na expressão anterior e fazendo a_1=1 e a_2=-1 obtemos:

$$B(x,y)=\left(\left\{I_{r1}(x,y)+I_{o1}(x,y)+2\,\mathrm{Re}\left[A^{*}_{r1}(x,y)\times A_{o1}(x,y)M_1(x,y)\right]+N_1(x,y)\right\}\right.$$
$$\left.-\left\{I_{r2}(x,y)+I_{o2}(x,y)+2\,\mathrm{Re}\left[A^{*}_{r2}(x,y)\times A_{o2}(x,y)M_2(x,y)\right]+N_2(x,y)\right\}\right)^2 \tag{4.12}$$

Como I_r e I_o não dependem do tempo, pode considerar-se que permanecem constantes nas duas imagens. Esta condição é válida se o deslocamento da superfície for pequeno quando comparado com o comprimento de onda da radiação coerente utilizada na iluminação. Enquanto os termos resultantes da autocorrelação se anulam, o ruído electrónico, dado a sua natureza aleatória, aparecerá na imagem final com contribuições de ambas as imagens. Efectuando a subtracção na equação 4.9 obtém-se:

$$B(x,y)=\left(2\,\mathrm{Re}\left[A^{*}_{r}(x,y)\times A_{o}(x,y)\left|M_1(x,y)-M_2(x,y)\right|\right]\right.$$
$$\left.+\left[N_1(x,y)-N_2(x,y)\right]\right)^2 \tag{4.13}$$

Admitindo as mesmas condições impostas na definição da expressão 4.9 e determinando os valores médios dos vários termos, obtemos para o brilho mostrado no monitor a expressão:

$$\langle B(x,y)\rangle = 2\langle I_r\rangle\langle I_o\rangle\left|M_1(x,y)-M_2(x,y)\right|^2+2\sigma_e^2 \tag{4.14}$$

A razão S/R será, neste caso, dada por:

$$\alpha_{II}=\frac{\langle I_r\rangle\langle I_o\rangle\left|M_1(x,y)-M_2(x,y)\right|^2}{\sigma_e^2} \tag{4.15}$$

Ao comparar esta expressão com a obtida para tempo médio verifica-se que no denominador se encontra apenas o termo correspondente ao ruído, enquanto na equação 4.7 aparecem também os termos de autocorrelação. Os valores a_n que conduzem à máxima relação S/R são: $a_1 = 1$ e $a_2 = -1$. Substituindo estes valores nas expressões correspondentes obtém-se uma relação S/R que é o dobro da obtida com (4.10), se desprezarmos os termos de autocorrelação. Na prática, embora esses termos possam ser minimizados ao ajustar a relação entre os feixes, não se anulam completamente, pelo que a razão S/R com uma só imagem é inferior a metade da obtida em subtracção.

4.5.2 Referência de *speckle*.

Qualquer sistema de ESPI em que a referência não seja especular pode ser classificado como tendo referência de *speckle*. Neste grupo incluem-se vários tipos de interferómetros, tais como:

i) a montagem de Michelson em que ambos os braços são feixes reflectidos por superfícies difusas;

ii) a montagem com dupla iluminação utilizada para medir deslocamentos no plano da superfície;

iii) a montagem utilizada na medição de gradientes de deslocamentos fora do plano da superfície, vulgarmente designada por interferometria de *shear*.

É exemplo do primeiro tipo o interferómetro proposto por Slettemoen em 1980 [29] e que se representa na figura 4.7. Neste caso, ambos os feixes são padrões de *speckle* obtidos por reflexão da radiação *laser* em superfícies difusas que podem, inclusivamente, pertencer ao mesmo objecto. Utilizando uma abertura constituida por um conjunto de faixas opacas, transparentes e espelhadas perpendiculares à direcção do varrimento *video* é possível separar, no espectro das frequências espaciais, os termos de autocorrelação do termo de intercorrelação, portador da informação. A utilização conjunta desta abertura e dum filtro de banda ajustado para permitir apenas a passagem do espectro correspondente ao termo de intercorrelação permite, com uma referência de *speckle*, obter padrões de interferência com contraste ligeiramente inferior aos obtidos com referência especular.

As expressões utilizadas para descrever o sinal óptico são identicas às utilizadas para o sistema de ESPI convencional, tendo em atenção que a referência é também um padrão de *speckle* [29]. Apesar da qualidade das imagens obtidas com este sistema ser inferior, possui características que poderão recomendá-lo em algumas aplicações. Além de uma montagem óptica mais simples, este sistema é imune ao ruído óptico introduzido por poeiras e riscos nos componentes e é menos sensível a instabilidades. Se a superfície de referência for colocada próximo da superfície a analisar, obtém-se um

interferómetro em que ambos os braços percorrem aproximadamente o mesmo caminho, o que torna o sistema autocompensado em termos de comprimento de coerência e diminui a sua sensibilidade às perturbações externas, como correntes de convexão e movimentos de corpo rígido.

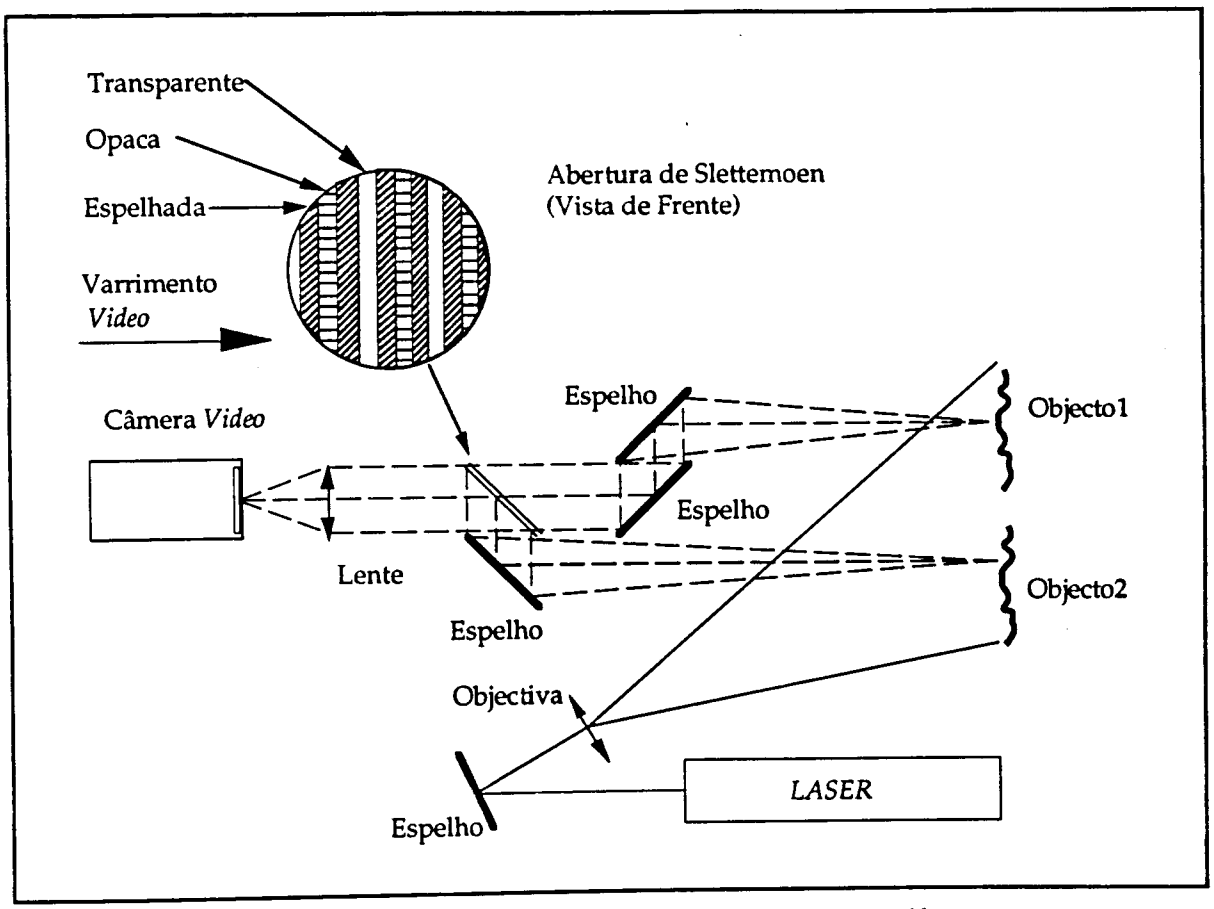


Figura 4.7 Montagem de ESPI com referência de *speckle* .

O interferómetro de dupla iluminação proposto por Leendertz [19] que se encontra representado na figura 4.4 a) pode também ser classificado como tendo referência de *speckle*. Neste caso, o detector regista a interferência de dois padrões de *speckle* obtidos por reflexão numa superfície difusa de dois feixes inclinados que iluminam a mesma área e fazem o mesmo ângulo com a sua normal. Com esta montagem, utilizando dois feixes colimados, é possível medir deslocamentos que ocorram no plano da superfície sem a interferência de possíveis movimentos em qualquer outra direcção. O deslocamento d_x e a ordem da franja n estão relacionados pela seguinte expressão [19]:

$$2 d_x \sin\theta = n\lambda \qquad (4.16)$$

onde θ é o ângulo entre cada um dos feixes e a direcção normal à superfície, e λ é o comprimento de onda da radiação coerente utilizada na iluminação.

Por último, pode ainda ser considerado interferómetro com referência de *speckle* uma montagem igualmente proposta por Leendertz [20] que é vulgarmente designada por *Shearography*. Neste interferómetro, cuja configuração se encontra esquematizada na figura 4.4 b), a interferência verifica-se entre dois padrões de *speckle* cujas imagens se encontram deslocadas numa direcção. Os padrões de interferência obtidos são o gradiente do deslocamento fora do plano da superfície segundo a direcção em que as imagens se encontram deslocadas, sendo a sua sensibilidade condicionada pela grandeza desse deslocamento.

Não obstante o contraste das imagens obtidas ser bastante inferior ao das imagens conseguidas com as outras técnicas referidas, o facto de se tratar de um interferómetro muito simples permitiu a sua divulgação em testes não destrutivos, principalmente em testes envolvendo materiais compósitos. Trata-se de uma montagem com uma grande estabilidade, que lhe é conferida pelo reduzido número de componentes ópticos e por ter um percurso comum para ambos os feixes. Como é sensível a gradientes, adapta-se perfeitamente à detecção de defeitos de estruturas que se manifestem na superfície sob a forma de concavidades ou convexidades normais à superfície. Na figura 4.8 pode observar-se a detecção do deslocamento das camadas numa placa de material compósito obtida com um interferómetro deste tipo.

Se a fonte de luz for um *laser* de impulsos com funcionamento síncrono com a câmera de *video*, é possível obter um sistema de medida para aplicação em ambientes de grande instabilidade [29].

4.6 Obtenção do sinal *video* em ESPI.

O detector de imagem, colocado no plano de focagem do conjunto formador de imagem do sistema de ESPI, ao ser exposto ao padrão de franjas de interferência altera a sua distribuição de carga de acordo com a intensidade

luminosa. O varrimento *video* converte a distribuição bi-dimensional de carga eléctrica num sinal temporal unidimensional, cuja tensão depende da intensidade luminosa incidente e do tempo de exposição. Admitindo que o detector responde linearmente ao padrão de intensidade, o sinal *video* resultante da imagem n será obtido por:

$$V_n(x,y,t_n) = g\iiint I(x',y',t')\, m_n(t_n - t') \times h_n(x - x', y - y')\, dt'dx'dy' \tag{4.17}$$

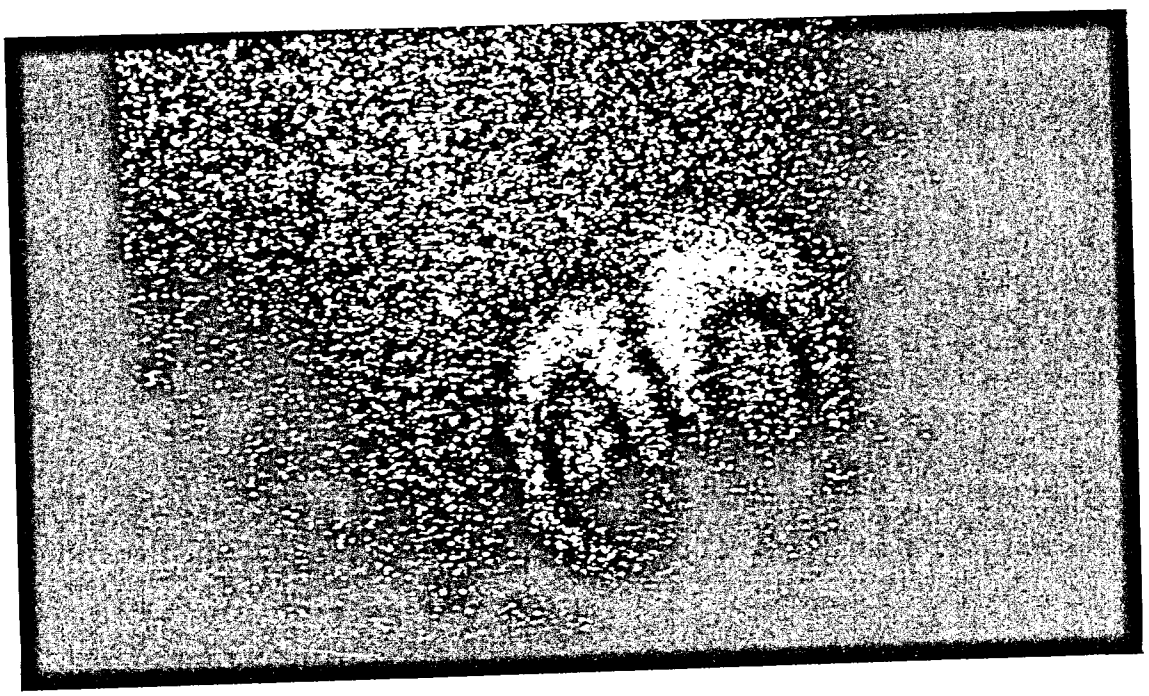


Figura 4.8 Detecção por *shearography* de um descolamento de camadas num material compósito.

onde g é o ganho do detector, $h_n(\Delta x,\Delta y)$ é a resposta do detector a um impulso espacial (descreve o poder de resolução), t_n é o tempo de leitura da imagem n e $m_n(\Delta t)$ é uma função de peso normalizada que caracteriza a exposição e inclui a resposta do detector à acumulação de carga devido a atrasos [30]. A integração de (4.17) conduz à função que define o sinal de saída da câmera:

$$V(x,y) = g[I(x,y)] + V_e(x,y) \tag{4.18}$$

Nesta expressão o sinal *video* dependente da intensidade luminosa é representado por g [I], enquanto o segundo termo, $V_e(x,y)$, representa ruído

electrónico aditivo que, por simplificação, se supõe independente do sinal óptico. A função g [I] é normalmente não linear; no entanto, para pequenas oscilações em torno do valor médio da intensidade, pode ser representada por uma série de Taylor em torno do ponto de funcionamento g [<I>] [31], o que conduz a:

$$V(x,y) \approx g[\langle I\rangle] + g'[\langle I\rangle]\big(I(x,y) - \langle I\rangle\big) + V_e(x,y) \qquad (4.19)$$

o parêntese angular indica o valor médio e g'[<I>] representa o gradiente da curva de resposta do detector *video* no ponto correspondente a g [<I>].

Como resulta do terceiro termo de (4.5), admitindo completa resolução do *speckle*, a função de franja é modulada numa portadora aleatória com valor médio nulo. A sua desmodulação inicia-se com uma filtragem passa-alto para remover o termo continuo e isolar a parte do sinal correspondente à modulação, obtendo assim :

$$\begin{aligned} \Delta V(x,y) &= V(x,y) - \langle V(x,y)\rangle \\ &= g'\Delta I(x,y) + \Delta V_e(x,y) \end{aligned} \qquad (4.20)$$

Este sinal é rectificado por detecção quadrática e mostrado no monitor *video*, sendo o brilho resultante proporcional ao quadrado da diferença de tensão obtida, de acordo com a expressão:

$$\begin{aligned} \Delta V^2(x,y) = \big[&(g')\Delta I_r(x,y) + (g')\Delta I_o(x,y) \\ &+2(g')\,\mathrm{Re}\left\{A_r^*(x,y)A_o(x,y)M(x,y)\right\} + \Delta V_e(x,y)\big]^2 \end{aligned} \qquad (4.21)$$

Dadas as características da portadora, o brilho do monitor na posição (x,y) terá valor aleatório. A obtenção das franjas devidas a deslocamentos do objecto implica a determinação do valor médio da equação (4.21), que corresponde ao valor médio da intensidade do *speckle* nesse ponto. O valor obtido para o sinal é proporcional à variância σ^2 do sinal *video* à saída da câmera e pode ser determinado por [31] :

$$\left\langle \Delta V^2(x,y)\right\rangle = \sigma^2 = (g')^2\left(\gamma_r^2\langle I_r\rangle^2 + \gamma_o^2\langle I_o\rangle^2 + 2|M|^2\langle I_r\rangle\langle I_o\rangle\right) + \sigma_e^2 \qquad (4.22)$$

onde $\gamma_r^2=\sigma_r/<I_r>$ é o valor da raíz quadrática média (*root-mean square* -r.m.s) do contraste na distribuição de intensidade do feixe de referência, $\gamma_o^2=\sigma_o/<I_o>$ é o valor r.m.s. do contraste na distribuição de intensidade do feixe objecto e $\sigma_e^2=<\Delta V_e^2>$ é a variância do ruído electrónico. A maximização do sinal portador da informação implica maximizar o valor médio do brilho esperado para esse ponto.

O valor médio dos termos de intercorrelação é nulo, pois é admitido que:

- o ruído electrónico e o sinal óptico são estatisticamente independentes;
- existe independência entre o feixe objecto e o feixe de referência;
- o feixe objecto obedece a uma distribuição cuja função de probabilidade é Gaussiana-circular no campo complexo.

A equação (4.22) mostra que a função de franja M(x,y) descreve as franjas devidas ao movimento do objecto através do termo $2\,|M(x,y)|^2<I_r><I_o>(g')^2$. Os restantes termos representam ruído: $\gamma_r^2<I_r>^2(g')^2$ é o ruído devido ao feixe de referência, $\gamma_o^2<I_o>^2(g')^2$ é o ruído devido ao feixe objecto e σ_e^2 é o ruído electrónico. Pode concluir-se que apenas o termo de intercorrelação contém a modulação correspondente aos fenómenos de interferência entre os dois feixes, sendo os outros dois feixes indesejáveis na imagem final, pois contribuem apenas para lhe reduzir o contraste.

Admitindo que o varrimento é feito ao longo da direcção x, as frequências espaciais ao longo dessa direcção são convertidas em frequências temporais de acordo com a relação:

$$v_t = v_x \cdot v \tag{4.23}$$

Nesta expressão v_t é a frequência temporal, v_x é a frequência espacial e v é a velocidade de varrimento.

A função de transferência da modulação $H_n(v)$ é calculada pela transformada de Fourier da função de resposta do detector *video* à um impulso $h_n(\Delta x,\Delta y)$ na equação (4.17) [17]. Mantendo a direcção x como direcção do varrimento, obtém-se para $H_n(v)$:

$$H_n(v_x, v_y) = H_{detec}(v_x, v_y).H_e(v_x) \tag{4.24}$$

Nesta expressão, o primeiro termo refere-se ao poder de resolução do detector *video*, enquanto o segundo engloba as contribuições dos componentes electrónicos devidas às respectivas respostas em frequência. Enquanto as caracteristícas do detector são mais ou menos constantes, o segundo termo, onde se incluem amplificadores, filtros e memórias *video* (quando utilizadas), pode ser alterado.

A análise da função densidade espectral dos vários termos permite avaliar a forma como a energia se distribui pelas várias frequências em cada um deles. Na figura 4.9 a) representa-se o espectro de Wiener de ambos os termos de autocorrelação e do termo de intercorrelação para uma abertura circular de raio r. A análise da figura permite concluir que, para aberturas de diâmetro superior a um valor limite, não existe qualquer contribuição para o termo de correlação cruzada, portador do sinal. Tal valor para a abertura pode ser calculado por:

$$D = 2\lambda z v_c \qquad (4.25)$$

em que z representa a distância da abertura à superfície fotossensível e v_c é a frequência limite da resolução do detector.

Ao aumento da abertura para valores superiores a D corresponde um aumento do ruído devido ao termo de autocorrelação do feixe objecto. Por outro lado, a uma diminuição da abertura corresponde um aumento do tamanho do *speckle*, com a consequente diminuição da resolução das franjas secundárias.

Os termos de autocorrelação contribuem fundamentalmente para as frequências mais baixas do sinal *video* e são removidas na filtragem electrónica. Se a correlação for efectuada por subtracção, todos os termos não dependentes do tempo, como os termos de autocorrelação, são eliminados. Neste modo de funcionamento é possível obter imagens de bom contraste, mesmo com um feixe de referência com algum ruído.

Na correlação por adição, a razão sinal/ruído varia directamente com o valor médio da intensidade do feixe de referência e inversamente com a variância deste [35]. Este facto impõe limitações ao ruído do feixe de referência que podem ser ultrapassadas se o termo de intercorrelação for filtrado dos restantes. A abertura circular não permite separar os vários termos, pelo que implica a utilização de feixes de referência com baixos níveis de ruído.

A utilização de uma dupla abertura rectangular como se representa na figura 4.9 b) permite isolar, por via óptica, o termos de autocorrelação. Esta abertura foi proposta por Biedermann [34] para gravar hologramas imagem em meios de

baixa resolução e Slettemoen [32] utilizou a mesma abertura num sistema de ESPI para remover o termo de autocorrelação do feixe objecto. Ao separar o conteúdo espectral da informação, esta abertura permite remover facilmente o ruído dos termos de autocorrelação com um filtro electrónico ajustado para a banda correspondente ao sinal pretendido.

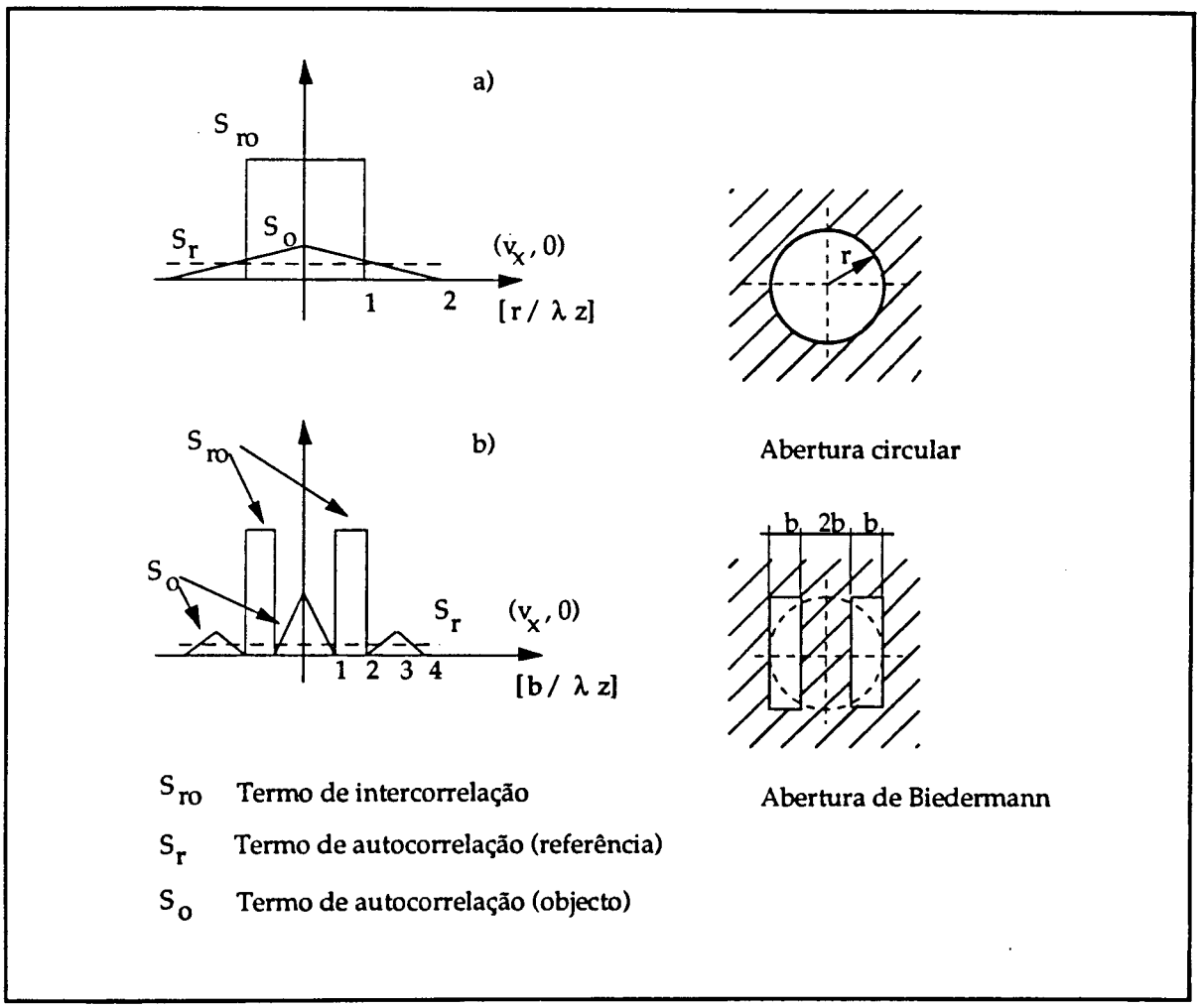


Figura 4.9 a) Espectro de Winer do sinal *video* obtido num sistema de ESPI com referência especular e abertura circular, b) Espectro de Winer obtido com uma abertura de Biedermann.

As vantagens da utilização de aberturas múltiplas em sistemas de ESPI com correlação por adição é obvia se for utilizada a abertura proposta por Slettemoen [33] para utilizar num interferómetro com referência de *speckle*, conforme se representa na figura 4.10. Com esta abertura é possível separar o espectro correspondente ao sinal e remover depois todo o ruído com um filtro

passa-banda convenientemente ajustado. Slettemoen apresentou franjas com um contraste próximo do obtido com um sistema de ESPI convencional, embora utilizasse uma referência de *speckle* e efectuasse a correlação em adição.

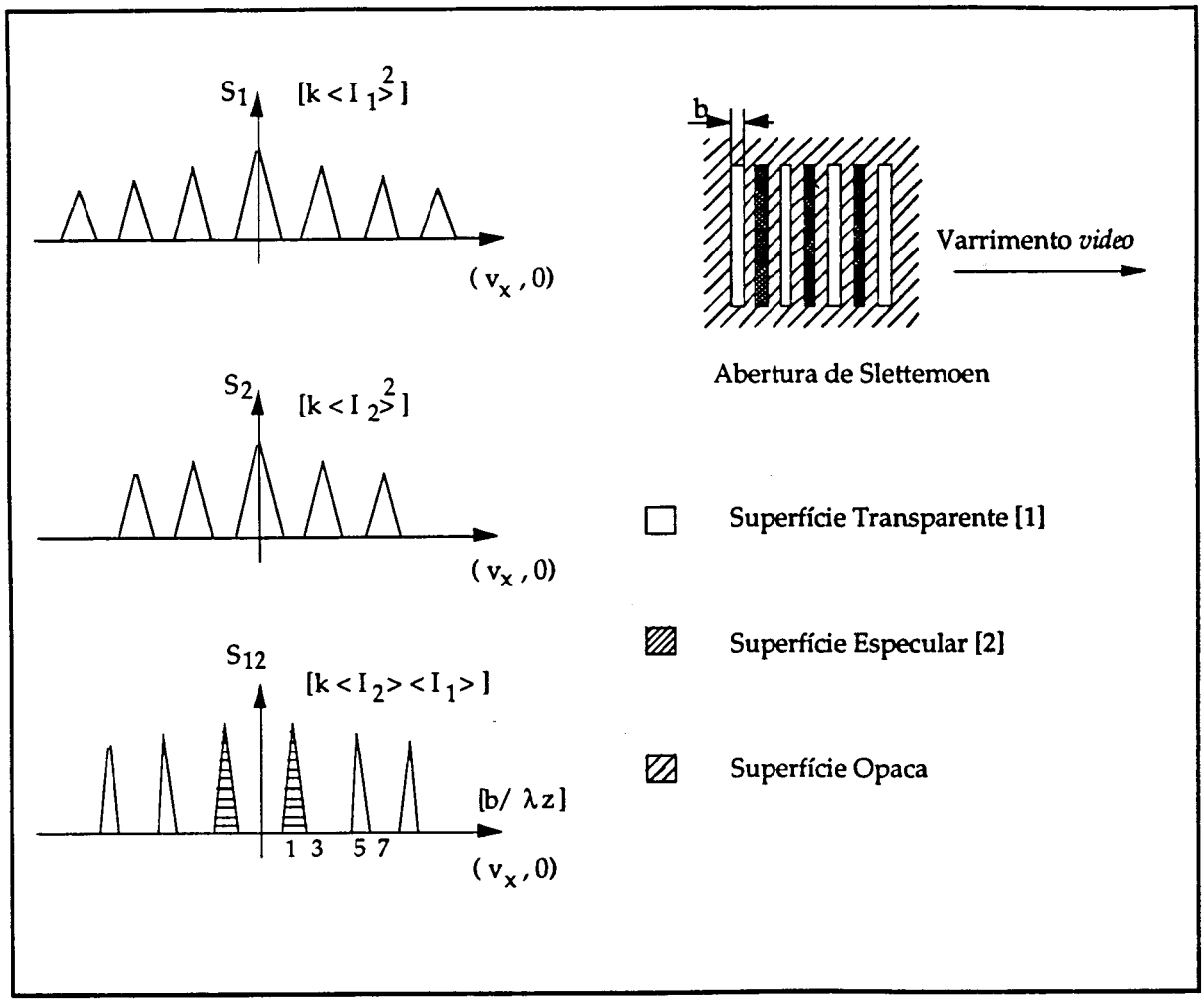


Figura 4.10 Abertura proposta por Slettemoen para utilizar num sistema de ESPI com referência de *speckle*.

A grande divulgação das placas de processamento com possibilidade de subtrair dois registos em tempo real veio permitir a vulgarização dos sistemas de *video* operando em subtracção. Este modo de funcionamento apresenta uma razão sinal/ruído superior à obtida com aberturas múltiplas e permite utilizar referências com *speckle* [15]. A correlação por subtracção é a única forma de obter franjas com o interferómetro de dupla iluminação utilizado para medir deformações no plano [17]. Neste caso, ambos os feixes passam pela mesma

abertura, pelo que todos os termos têm o mesmo espectro de frequências. Deste modo não é possível separar no domínio espacial o termo de intercorrelação. No entanto, utilizando uma memória de imagem e a correlação por subtracção, obtêm-se padrões de franjas com bom contraste.

O interferómetro sensível ao gradiente do deslocamento perpendicular ao plano da superfície é aquele que apresenta padrões de franjas com pior contraste. Tratando-se de um interferómetro com referência de *speckle*, em que ambos os feixes objecto e de referência partilham a mesma abertura, aquele possui as limitações do interferómetro de dupla iluminação no que respeita a distribuição espectral dos termos de autocorrelação. Como se verá mais adiante, a configuração deste interferómetro tem como principal limitação a descorrelação entre os dois padrões de *speckle* provocada pela rotação local da superfície [36]. Sendo precisamente a descorrelação que intervém na formação do padrão de franjas, a rotação da superfície implica uma diminuição do contraste do padrão de interferência ao introduzir uma descorrelação adicional. Esta descorrelação introduz *speckle* no interior das franjas, diminuindo drasticamente o contraste.

4.7 Realização da referência

No sistema de ESPI convencional, o feixe de referência deve iluminar uniformemente o detector *video*, e deve ser encaminhado por forma a garantir que as frequências espaciais obtidas na interferência se situem dentro da largura de banda espacial disponível.

Considere-se um interferómetro com referência especular e sensibilidade a deslocamentos fora do plano, como se mostra esquematicamente na figura 4.11. O feixe objecto, constituido pela radiação *laser* difundida pela superfície que é recolhida pela lente, é combinado com uma frente de onda esférica e especular proveniente da mesma fonte de luz, o feixe de referência. Admita-se que o ponto de divergência do feixe de referência não se situa no centro da abertura do sistema $(0, 0, l_o)$, mas num ponto próximo com coordenadas $(\Delta x_r, 0, l_r)$. Calculando a relação entre a frequência espacial do padrão de interferência ν e a posição do ponto de divergência do feixe de referência obtém-se, após alguns cálculos simples onde intervêm as distâncias percorridas pelos dois feixes e as diferenças de fase daí resultantes [37], a expressão:

$$v = \frac{1}{\lambda}\left\{\frac{x\,\Delta l}{l_0(l_0 - \Delta l)} + \frac{\Delta x_r}{l_r}\right\} \qquad (4.26)$$

Da análise desta expressão, onde $\Delta l = l_0 - l_r$ e λ é o comprimento de onda da radiação, pode concluir-se que a frequência espacial do padrão de interferência v é pouco sensível às variações de posição ao longo do eixo z (Δl), mas varia rapidamente com Δx_r.

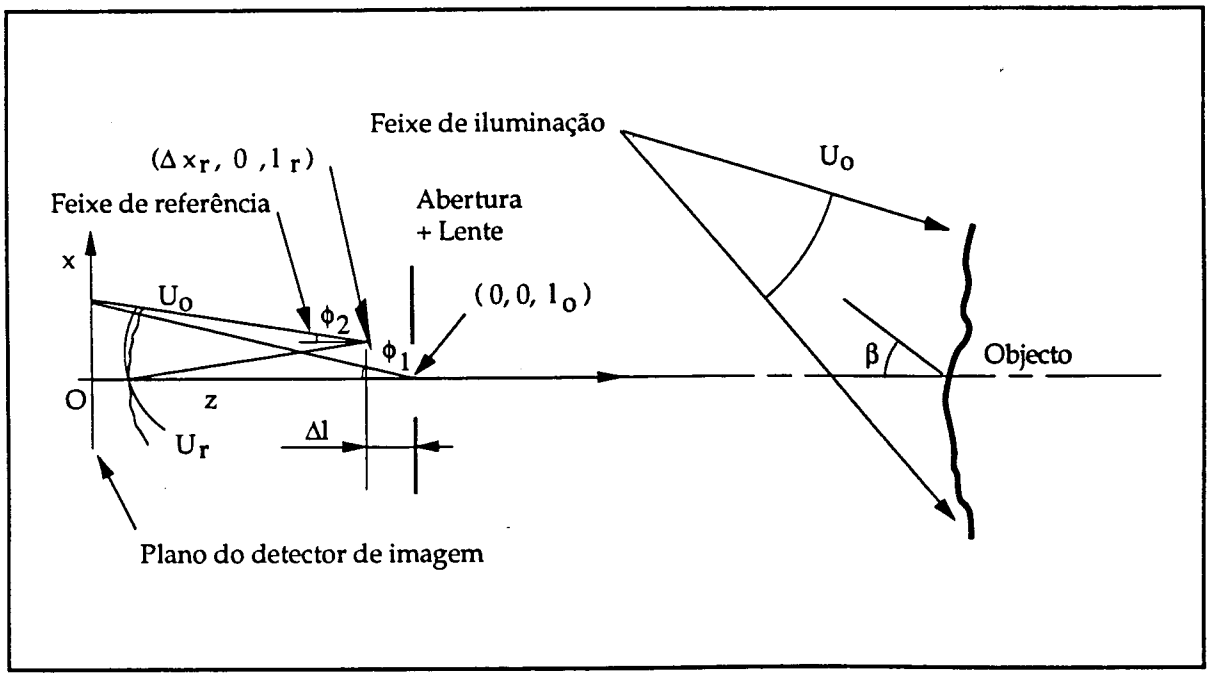


Figura 4.11 Interferómetro com referência especular e sensibilidade para deslocamentos fora do plano, com o feixe de referência não alinhado com o feixe objecto [37].

Com estas restrições na largura de banda espacial, impostas pela baixa resolução do meio de registo, a configuração que optimiza a razão sinal/ruído é aquela em que o feixe de referência diverge do ponto conjugado do sistema óptico, situado no centro geométrico da abertura do sistema que forma a imagem do feixe objecto.

Com o propósito de garantir um bom contraste nos padrões de interferência e aumentar a flexibilidade das montagens ópticas, foram propostas várias soluções para a realização da referência. Na maioria delas o feixe de referência é alinhado com o eixo do sistema óptico formador de imagem, diferindo nos elementos ópticos utilizados no seu encaminhamento. O divisor de feixe de faces

inclinadas, normalmente designado por cunha, o espelho plano com um orifício central, a fibra óptica e as aberturas múltiplas são algumas das soluções mais divulgadas que se descrevem a seguir.

Como curiosidade, deve referir-se ainda uma solução proposta por Joenathan [40] em que o feixe objecto e o feixe de referência não são alinhados. Esta montagem é semelhante à utilizada na gravação de um holograma imagem com substituição da placa holográfica por um vidro despolido. A câmera *video* é colocada por tràs do vidro despolido onde são formados os padrões de interferência e focada sobre a sua superfície. O efeito difusor do vidro despolido permite que a câmera receba parte da luz incidente na superfície sendo os padrões de franjas secundários obtidos por subtracção .

4.7.1 Cunha.

Nesta montagem, que se representa na figura 4.12 a), o feixe de referência é orientado por um divisor de feixe em forma de cunha com uma película anti-reflectora na face oposta à da reflexão. A inclinação entre faces é de ≈2° e tem como objectivo evitar que o padrão de franjas resultante das reflexões internas seja resolúvel pela câmera, o que diminuiria a razão sinal/ruído na imagem final.

O sistema obtido com esta configuração é pouco eficiente na utilização da luz, pois o divisor de feixe desperdiça parte do feixe objecto por reflexão e parte do feixe de referência por transmissão. Como a filtragem da referência é efectuada antes do divisor de feixe, esta montagem é muito sensível a ruído espacial devido a poeiras ou riscos nas superfícies deste componente.

A inserção do divisor de feixe no espaço que medeia entre o sistema óptico formador de imagem e o detector retira flexibilidade à montagem e impõe um limite mínimo na distância focal das lentes a utilizar na formação da imagem (≈ 40 mm) [15].

4.7.2 Espelho com orifício.

Esta alternativa à solução anterior tem como vantagens uma redução considerável na introdução de ruído óptico, devido a não ter qualquer componente após a filtragem, e uma maior eficiência na utilização da potência disponível.

Com a realização da referência através de um orifício de reduzidas dimensões (≈25μm) que faz 45° com a direcção de propagação, aumentam as dificuldades de alinhamento. Ao ter que conciliar a distância focal da objectiva microscópica utilizada na abertura do feixe de referência com a distância ao detector e com o tamanho do orifício utilizado na filtragem, esta montagem torna-se menos flexível que a anterior.

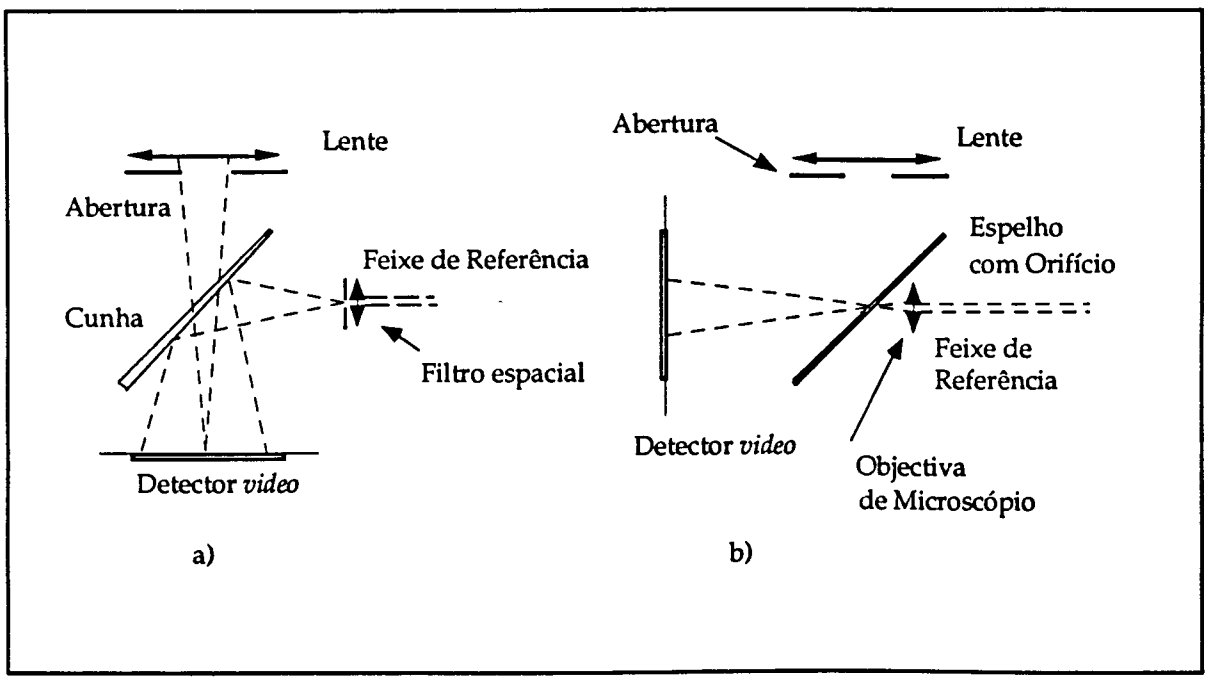


Figura 4.12 Realização da referência com cunha a) e com Espelho com orifício b).

Como se pode observar na figura 4.12 b), a introdução do espelho no encaminhamento do feixe objecto não permite que o ponto de divergência do feixe de referência e o centro da abertura sejam conjugados (Δl=10mm , na expressão (4.26), é um valor normal), o que diminui a razão sinal/ruído. Ao utilizar lentes com distâncias focais reduzidas na formação da imagem, pode

aparecer na zona central da imagem uma zona menos iluminada com a forma do orifício, diminuindo a qualidade da imagem.

4.7.3 Espelhos múltiplos.

Como se referiu em 4.5.2, a utilização de aberturas constituidas por superfícies alternadamente espelhadas e transparentes convenientemente orientadas permite separar, no dominio das frequências espaciais, os termos de autocorrelação do termo resultante da correlação cruzada. A associação desta abertura com um filtro electrónico passa-banda convenientemente ajustado permite obter imagens de qualidade aceitável em sistemas de ESPI com referências de *speckle* .

Esta forma de realização da referência com *speckle* perdeu algum interesse com a divulgação das placas de processamento digital de imagem controladas por computador e dos moduladores de fase. Este equipamento torna acessíveis modos de funcionamento que, utilizando operações como a subtracção em tempo real e a modulação de fase, permitem obter padrões de interferência com melhor contraste em sistemas de ESPI em que a referência é um padrão de *speckle*.

4.7.4 Fibra óptica.

Atendendo a que num sistema de ESPI com referência especular as baixas frequências respeitam maioritariamente aos termos de autocorrelação e são normalmente removidas por filtragem, Biedermann [38] propôs que a zona central da lente formadora de imagem fosse utilizada na condução do feixe de referência. A obstrução desta zona filtra ópticamente as baixas frequências da imagem aumentando a razão sinal/ruído e permite a colocação de componentes ópticos para orientação do feixe de referência.

Das várias soluções propostas que exploram esta possibilidade destacam-se:

-A colocação de uma fibra óptica sem revestimento orientada verticalmente no centro da abertura. O feixe de referência é focado sobre a superfície da fibra que funciona como espelho cilindríco, orientando o feixe para o detector.
-A utilização da superfície da lente para fixar uma superfície esférica espelhada côncava ou convexa onde o feixe é reflectido [39].
-O encaminhamento do feixe de referência com uma fibra óptica monomodo orientada segundo o eixo da lente [38][14], como se representa na figura 4.13.

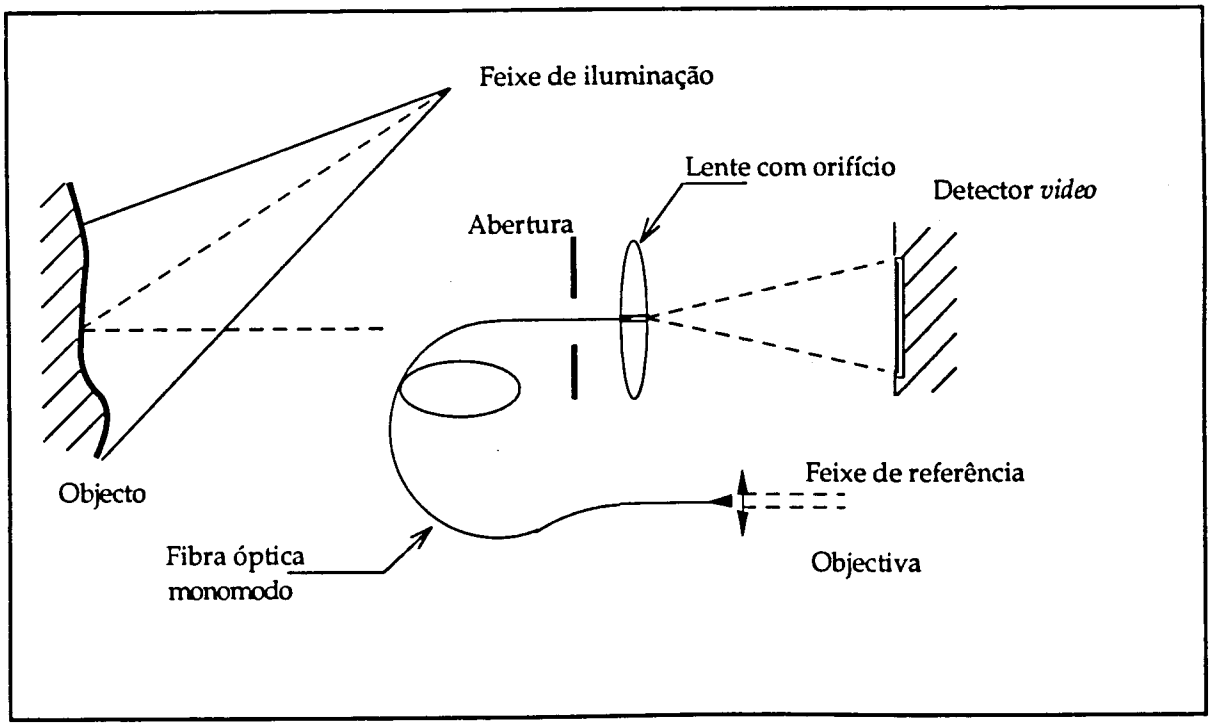


Figura 4.13 Realização da referência com fibra óptica monomodo e lente com orifício.

Das soluções acima referidas destaca-se a terceira, por associar à sua simplicidade um conjunto de vantagens que a tornam atractiva na realização de sistemas de ESPI compactos. Esta montagem tem maior flexibilidade e menores problemas de alinhamento que as anteriormente descritas. A fixação da fibra pode ser feita através de um orifício realizado no centro da lente, enquanto a sua excitação se consegue com uma objectiva de microscópio focada sobre a área da secção recta.

A razão sinal/ruído é bastante elevada, pois além de ser fácil eliminar o ruído no feixe de referência, o ponto de divergência do feixe de referência pode ser situado exactamento no ponto conjugado da abertura, aproveitando toda a banda de frequências espaciais disponível. Podem também ser utilizadas lentes com distâncias focais reduzidas, uma vez que o espaço entre a lente e o detector *video* não é ocupado.

Uma outra vantagem desta configuração, muito apreciada quando é utilizado um *laser* de baixa potência, é a sua boa eficência luminosa.

4.8 Parâmetros de ajuste do sistema de ESPI.

Quando se instala uma montagem de ESPI pela primeira vez num determinado local é também conveniente verificar se existe estabilidade mecânica compatível com a resolução desta técnica. Uma forma expedita de efectuar esta verificação consiste em montar nesse local um interferómetro de Michelson e analisar a estabilidade das suas franjas de interferência. A utilização de um fotodetector permitirá verificar a existência de vibrações com frequências não preceptíveis por análise do padrão de interferência à vista desarmada.

O contraste dos padrões de franjas obtidos com uma montagem de ESPI depende de vários factores, de entre os quais se destacam: o tipo de interferómetro, a resolução da câmera *video*, a forma como é efectuada a correlação dos padrões, o alinhamento dos vários componentes e o ajuste conveniente dos vários parâmetros da montagem.

Com o objecto no campo de visão do sistema e iluminado com a radiação *laser* deverá o sistema óptico formador de imagem ser ajustado por forma a que a imagem do objecto seja focada sobre o alvo da câmera. Estas operações de alinhamento serão facilitadas se a câmera estiver em funcionamento e a imagem for observada num monitor *video*.

Nesta fase do ajuste da montagem deverá garantir-se que existem condições de interferência entre os braços do interferómetro. Para que a capacidade de interferência seja máxima, a diferença de percursos entre os dois feixes deverá ser nula ou um múltiplo inteiro do dobro do comprimento da cavidade ressonante do *laser* [41] e os dois feixes deverão ter a mesma polarização. Deve referir-se que a reflexão da luz por uma superfície difusa altera a sua polarização, podendo

mesmo anulá-la completamente. Neste caso a superfície deverá ser pintada por forma a obter uma superfície difusa não despolarizante.

Um dos parâmetros mais importantes de um sistema de ESPI é a abertura do sistema óptico formador de imagem. Como a informação de fase associada ao fenómeno em estudo se encontra codificada na intensidade dos grãos de *speckle*, a abertura deverá ser ajustada por forma a tornar o tamanho do grão resolúvel pelo detector *video* e pelo processamento electrónico do sinal. O ajuste óptimo corresponde ao maior contraste da imagem, o que pode ser verificado por observação da imagem no monitor ou por cálculo do valor médio, pois o máximo contraste corresponde à imagem com menor valor médio. Num sistema de ESPI com a abertura convenientemente ajustada é possível observar os grãos de *speckle* variando aleatóriamente de intensidade quando se introduz uma pequena variação no comprimento de qualquer dos braços do interferómetro [15].

Algumas câmeras de *video* possuem controlo automático de ganho, realimentação que estabiliza o sinal de saída variando automaticamente o ganho em função da intensidade de luz. Este sistema poderá diminuir o máximo contraste, pelo que devem ser utilizadas câmeras sem controlo automático de ganho, ou com possibilidade de o desligar.

Como a gama dinâmica das câmeras é limitada, a soma de ambos os feixes não deverá exceder a saturação, o que implicaria perda de sinal. Contudo, para melhor aproveitamento da gama dinâmica disponível, a intensidade de ambos os feixes deverá ser ajustada por forma a obter uma situação próxima desse limite. A saturação, que a verificar-se deverá ser sempre inferior a 10% da imagem [42], é facilmente detectada quando se utilizam placas de processamento de imagem. Alterando convenientemente as tabelas de conversão do sinal *video* (LUTs) é possível fazer com que os *pixels* em que foi atingida a saturação apareçam coloridos.

O ajuste da abertura e da intensidade podem ser feitos em simultâneo, verificando visualmente o contraste dos padrões de franjas obtidos após cada alteração da abertura e ajuste da intensidade para repôr a intensidade total em valores próximos da saturação do detector. Embora o ajuste assim efectuado seja subjectivo, na proximidade do ponto de funcionamento óptimo o contraste varia lentamente com abertura, pelo que os resultados assim obtidos normalmente são satisfatórios.

Os sistemas de ESPI mais vulgares são aqueles em que a referência é especular, dado serem os que conduzem a padrões de interferência com melhor contraste, podendo até em certas circunstâncias ser utilizados para medir

deslocamentos no plano [43]. Neste tipo de interferómetro o ajuste da montagem deverá começar pelo conveniente alinhamento do feixe de referência com o eixo da abertura do sistema óptico pois, como se descreveu em 4.7, este parâmetro influencia fortemente o contraste da imagem.

Se o sistema for operado em adição, deve verificar-se a uniformidade do feixe de referência pois o ruído óptico neste feixe reduz significativamente o contraste do padrão de interferência. Esta dependência é bastante menor no caso da correlação por subtracção onde todo o ruído óptico que permaneça inalterado é removido pela subtracção.

Também neste caso o ajuste da abertura e das intensidades dos feixes pode ser feito simultâneamente. Esta tarefa será facilitada se for possível ajustar independentemente a intensidade do feixe de referência. Após cada ajuste da abertura aumenta-se ou diminui-se a intensidade da referência tentando utilizar o máximo da gama dinâmica da câmera. A observação dos padrões de correlação é normalmente suficiente para verificar a qualidade do ajuste.

Sempre que se altere a superfície a analisar, quer por substituição do objecto, quer por alteração das suas características de reflectividade, quer por variação da área observada, varia a intensidade do feixe objecto e, consequentemente, a razão entre os feixes, pelo que o sistema de ESPI deverá ser novamente ajustado.

Embora Slettemoen [31] e Jones [37] tenham determinado a razão de intensidades óptima para cada interferómetro é fácil, após alguma experiência, ajustar convenientemente uma montagem de ESPI sem efectuar qualquer cálculo ou medição.

4.9 Limitações do método.

As limitações de um sistema de ESPI devem-se não só a factores intrínsecos ao sistema como a factores que dependem do ambiente em que está inserido. A informação metrológica obtida surge, à semelhança de qualquer outro sistema interferométrico, sob a forma de lugar geométrico de pontos de igual fase na imagem da superfície a medir. A informação de fase encontra-se codificada numa modulação de amplitude de uma portadora e é obtida indirectamente a partir da medida de intensidade dessa portadora na imagem.

Como parâmetros inerentes ao sistema destacam-se as suas resolução e gama de medida. A primeira depende da resolução espacial e dos níveis de quantificação de intensidade da imagem, além da frequência máxima contida na portadora. A gama de medida é condicionada pela necessidade de existir correlação entre os *speckles* portadores da informação de fase. Os valores dos deslocamentos, quer paralelos quer perpendiculares à superfície, que acarretam a descorrelação total do *speckle* limitam a amplitude da medida segundo essas direcções [15].

Além das limitações próprias do sistema já enunciadas, a potência disponível do *laser*, a sensibilidade do detector de intensidade e as características de reflectividade da superfície condicionam as dimensões máximas do objecto a estudar. De referir ainda que a iluminação ambiente e a despolarização da luz pela superfície podem contribuir para a diminuição da razão sinal/ruído, aumentando o termo contínuo e diminuindo a gama disponível para o sinal.

Embora os tempos de amostragem do ESPI sejam muito reduzidos quando comparados com os da Holografia (1/25 s para vários segundos), também nesta técnica é necessário que a condições ambientais permaneçam constantes durante o período de amostragem. Devido à elevada resolução desta técnica, pequenas perturbações que alterem qualquer um dos feixes interferem directamente na medida, podendo mesmo inviabilizá-la.

Referências.

[1] Powell, R.L., Stetson, K.A., "Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 55, nº 12, pág. 1593-1598, 1965.

[2] Haines, K.A., Hildebrand, B. P. , "Surface-Deformation Measurement Using the Wavefront Reconstruction Technique", Applied Optics, Vol.5, nº 4, pág.595-602, 1966.

[3] Butters, J.N.; Leendertz, J.A., "Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology", Optics and Lasers Technology, pág.26-30, 1971.

[4] Macovsky, A.; Ramsey, S.D.; Schaefer, L.F.; "Time-Lapse Interferometry and Contouring Using Television Systems", Applied Optics, Vol.10, nº12, pág.2722-2727, 1971.

[5] Schwomma, O. "Holographisch-Interferometrisches oder moirémetrisches Verfaharen", Pantente de invenção 298 830, Austria, 1972.

[6] Løkberg, O.J.; Malmo, J.T.; Strand, A. "TV-Holography - a Tool for Vibration Measurements", Noise & Vibration Control Worldwide, pág. 286-289, Out. 1987.

[7] Stetson, K.A.; Brohinsky, W.R. "Electro-Optic Holography and its Application to Hologram Interferometry", Applied Optics, vol.24, nº20, pág. 3631-3637, 1985.

[8] Creath, K.; Slettemoen G.Å.; "Vibration-Observation Techniques for Digital Speckle-Pattern Interferometry", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 2, nº2, 1985.

[9] Pederson, H.M., Løkberg, O.J.; Førre, B.M. "Holographic Vibration Measurement Using a TV Speckle Interferometer with Silicon Target Vidicon", Optics Communications, Vol.12, nº4 , pág. 421-426, 1974.

[10] Biedermann, K. ; Ek, L. e Østlund, L. ; "A TV Speckle Interferometer", in "The Engineering Uses of Coherent Optics", (E. R. Robertson Ed.), pág. 219-221, Cambridge Univ. Press, London and New York, 1976.

[11] Nakadate, S.; Yatagai, T.; Saito, H.; "Electronic Speckle Pattern Interferometry Using Digital Image Processing Techniques", Applied Optics, Vol. 19, nº11, pág. 1879-1883, 1980.

[12] Soares, O.D.D.; Lage, A.L.V.S.; "Use of a TV-Frame Memory on Electronic Speckle Pattern Interferometry Applied to Orthopedics", Proc. SPIE, 15 th International Conference, Ago. 1982.

[13] Soares, O.D.D.;Lage,A.L.V.S.;Gomes,A.O.S.;"Memória Digital Dinâmica Operável em Tempo-Real", Registo de Invenção nº82382, INP 1986.

[14] Soares, O.D.D.;Lage,A.L.V.S.;"Sistema Óptico para Interferometria de Granitado Laser com com Fibras Ópticas", Registo de Invenção nº 80335, INP 1985.

[15] Lage,A.L.V.S.; "Técnicas Ópticas na Análise de Fenómenos Dinâmicos", Tese de Doutoramento,Faculdade de Engª. da Universidade do Porto, 1987.

[16] Fry, P. W.; "Silicon Photodiode Arrays", Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 8,pág.337-349, 1975.

[17] Løkberg, O.J.; Slettemoen G.Å.; "Basic Electronic Speckle Pattern Interferometry", Applied Optics and Optical Engineering, Vol X, Academic Press Inc.(Shannon, R.R.; Wyant, J.C. Ed.), pág. 455-504, 1987.

[18] Leith, E.; Upatnieks, J. ; "Reconstructed Wavefronts and Communication Theory", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 52, nº 10, pág. 1123-1130, 1962.

[19] Leendertz, J.A.;"Interferometric Displacement Measurement on scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect", Journal of Physics E (Sci. Instrum), Vol. 3,pág. 214 - 218, 1970.

[20] Leendertz, J.A.; Butters, J.N.; "An Image-Shearing Speckle-Pattern Interferometer for Measuring Bending Moments", Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 6, pág. 1107-1110, 1973.

[21] Spooren, R. ; "Fringe Quality in Pulsed TV-Holography", SPIE Vol. 1508, Industrial Applications of Holographic and Speckle Measuring Techniques, pág. 118-127, 1991.

[22] Butters, J.N.; "Electronic Speckle Pattern Interferometry: a General Review Background to Subsequent Papers"; The Engineering Uses of Coherent Optics ; (Robertson, E.R. ed.) , Cambridge University Press, Cambridge, pág. 155-169, 1976.

[23] Spooren, R.;"Pulsed Video Speckle Interferometry", Doktor Ingeniøravhandling 1992:52, Universitetet i Trondheim, Norges Teckniske Høgskole, (Tese de doutoramento), 1992.

[24] Spooren, R.; "Fringe Quality in Pulsed TV-Holography", Proc. SPIE, nº1508, pág. 118-127, 1991.

[25] Jones,R.; Wykes, C.; "De-correlation effects in Speckle-Pattern Interferometry. 2. Displacement Dependent De-correlation and Applications to the Observation of Machine-Induced Strain", Optica Acta, Vol. 24, pág. 533-550, 1977.

[26] Goodman, J. W.; "Laser Speckle and Related Phenomena", (ed. Dainty, J.C.) , Topics in Applied Physics, Vol. 9, pág. 9-75, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1984.

[27] Stetson, K.A."A Rigorous Treatment of the Fringes of Hologram Interferometry", Optik, nº29, Vol.4, pág.386-400, 1969.

[28] Creath K. ; Slettemoen, Å. G. ; "Vibration-Observation Techniques for Digital Speckle-Pattern Interferometry", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 2, nº 10, pág. 1629-1636, 1985.

[29] Spooren R., Dyrseth A.A., Vaz M.A.P.;"Electronic Shear Interferometry Applying a (double) Pulsed Laser", Applied Optics, Vol. 32, nº 25, 1993.

[30] Høgmoen, K; Pedersen, H.M.,"Measurement of Small Vibrations Using Electronic Speckle Pattern Interferometry: Theory", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 67, nº 11, pág. 1578 -1583, 1977.

[31] Slettemoen, G. Å.; "General Analysis of Fringe Contrast in Electronic Speckle Pattern Interferometry", Optica Acta, Vol.26, nº3, pág. 313-327, 1979.

[32] Slettemoen, G. Å.;"Optimal Signal Processing in Electronic Speckle Pattern Interferometry", Optics Communications, Vol. 23, nº2, pág. 213-216, 1977.

[33] Slettemoen, G. Å.;"Electronic Speckle Pattern Interferometric System Based on a Speckle Reference Beam", Applied Optics, Vol. 19, nº 4, pág. 616-623, 1980.

[34] Biedermann, K.; Ek, L.; Östlund, L.;"A Tv Speckle Interferometr", in The Engineering Uses of Coherent Optics", (Ed. Robertson, E.R.); Cambridge University Press, Cambridge, 1976.

[35] Jones, R.; Wykes, C.; "Holographic and Speckle Interferometry", Cambridge University Press, Cambridge, 1983.

[36] Owner-Petersen, M.;"Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry (DSPSI) . Limitations and Prospects"; Proc. SPIE; Holographic Interferometryand Speckle Metrology"; 5-8 Nov.; Baltimore,1990.

[37] Jones, R.; Wykes, C.; "General Parameters for the Design and Optimization of Electronic Speckle Pattern Interferometers", Optica Ata, Vol. 28, nº7, pág. 949-972, 1981.

[38] Biedermann, K.; Ek, L.; "A recording and Display System for Hologram Interferometry with Low Resolution Imaging Devices", Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 8, pág. 571-576, 1975.

[39] Virdee, M.S.; Williams, D.C.; Banyard, J.E.; Nassar, N.S.; "A Simplified System for Digital Speckle Interferometry", Optics & Laser Technology, Vol. 22, nº 5, pág. 311-316, 1990.

[40] Joenathan, C.; Torroba, R.; "Modified Electronic Speckle Pattern Interferometer Employing an Off-Axis Reference Beam"; Applied Optics, Vol. 20, Nº10, pág. 1169-1171, 1991.

[41] Løkberg, O.J.; Malmo, J.T. ; "Long-Distance Electronic Speckle Pattern Interferometry"; Optical Engineering, Vol. 27, nº 2, pág. 150-156, 1988.

[42] Wykes, C.; "A Theoretical Approach to the Optimization of Electronic Speckle Interferometry Fringes with Limited Laser Power"; Journal of Modern Optics, Vol 34, nº 4 , pág. 539-554, 1987.

[43] Løkberg, O.J.; "Mapping of in-Plane Vibration Modes by Electronic Speckle Pattern Interferometry"; Optical Engineering , Vol. 24 , nº 2, pág. 356-359, 1985.

CAPÍTULO 5

5. ESTUDO DE FENÓMENOS DINÂMICOS

5.1 **Introdução**

5.2 **Técnicas de medição de deslocamentos associados a fenómenos dinâmicos**

5.2.1 Fenómenos de baixa velocidade

5.2.2 Medições em tempo médio (*time average*)
5.2.2.1 Como melhorar o contraste dos padrões de franjas obtidos em tempo médio

5.2.3 Modulação de fase do feixe de referência

5.2.4 Modulação de amplitude
5.2.4.1 Modulação de amplitude com *lasers* de emissão contínua
5.2.4.2 Modulação de amplitude com *lasers* de impulsos

Referências

CAPÍTULO 5

5. ESTUDO DE FENÓMENOS DINÂMICOS.

5.1 Introdução.

Quando se altera o equilibrio energético de uma estrutura por aplicação de uma carga ou fazendo variar a sua temperatura, esta deforma-se no sentido de recuperar a situação de equilibrio que corresponde à energia miníma para a nova situação. Os fenómenos físicos resultantes destas acções dependem das caracteristícas intrínsecas dos componentes estruturais envolvidos e da natureza das solicitações aplicadas. A estrutura é caracterizada pela geometria e propriedades físicas dos seus componentes, enquanto a solicitação é definida pela sua variação temporal de intensidade. O estudo dos fenómenos resultantes destas solicitações, efectuado com recurso às técnicas ópticas, é o assunto deste capítulo.

Considerando apenas os fenómenos resultantes da acção de forças de espectro variável, normalmente designados por dinâmicos (do grego *dynamiké* "relativo a força"), estes podem ser classificados de acordo com a sua persistência, em duas grandes famílias: estacionários e não estacionários. Por fenómenos estacionários designam-se todos aqueles que se mantêm ao longo do tempo, sendo a designação de não estacionários aplicada a todos os outros.

Quanto à forma como varia a energia, os fenómenos não estacionários podem ainda subdividir-se em contínuos e transitórios. Nos primeiros a variação de energia faz-se lentamente até o sistema atingir a sua posição de equilibrio. Nos

segundos a variação dá-se subitamente, sendo a recuperação do equilibrio acompanhada de algumas oscilações onde é dissipada parte da energia envolvida.

Por sua vez os fenómenos estacionários podem também ser classificados de acordo com a sua evolução. Quando se trata de fenómenos cuja história permite prever o seu comportamento futuro são designados por deterministícos. Aleatórios serão todos aqueles cuja evolução não é previsível, pelo que o seu tratamento matemático é efectuado em termos estatistícos.

Por último, os fenómenos estacionários deterministícos, podem ainda ser divididos em periódicos e quase-periódicos. Periódicos serão todos aqueles que se repetem ao fim de um determinado intervalo de tempo, normalmente designado por período. Estes fenómenos têm comportamento sinusoidal ou podem ser decompostos na soma de vários componentes sinusoidais com diferentes amplitudes, mas com frequências múltiplas inteiras de um valor fundamental. Quando os vários fenómenos componentes não têm frequências relacionadas harmonicamente, isto é, pelo menos dois deles têm frequências cuja relação é um número irracional, o fenómeno não é exactamente periódico, sendo comum a designação de quase-periódico.

O estudo de fenómenos variáveis no tempo pode ser descrito por uma amostragem temporal ao longo da sua evolução. As medições relativas assim efectuadas podem ter uma referência fixa, préviamente definida, ou uma referência dinâmica actualizável ao longo do seu desenvolvimento.

A aplicação da Óptica ao estudo deste tipo de fenómenos permitiu desenvolver várias técnicas que, diferindo entre si no suporte de registo dos padrões de interferência ou na forma como esses padrões são obtidos, melhor se ajustam ao estudo dos vários tipos de fenómenos acima descritos, e cuja classificação se representa na figura 5.1. A capacidade que estas técnicas possuem de gravar e posteriormente reconstruir a fase das frentes de onda codificadas pela evolução do fenómeno em estudo, permite conceber técnicas de medição diferenciais com referência estática como a Holografia interferométrica e com referência estática ou dinâmica como a Holografia Moiré e o ESPI.

Tratando-se de técnicas de campo não destrutivas, que não necessitam de qualquer contacto fisico com a superfície onde é efectuada a medida, tornam-se particularmente adaptadas ao acompanhamento de fenómenos cujas características possam ser alteradas pela colocação de transdutores ou seja difícil a sua colocação. A elevada resolução destas técnicas, que resulta de ser utilizado o comprimento de onda da luz como unidade de medida, permite utilizar carregamentos reduzidos ou encurtar os intervalos entre amostragens.

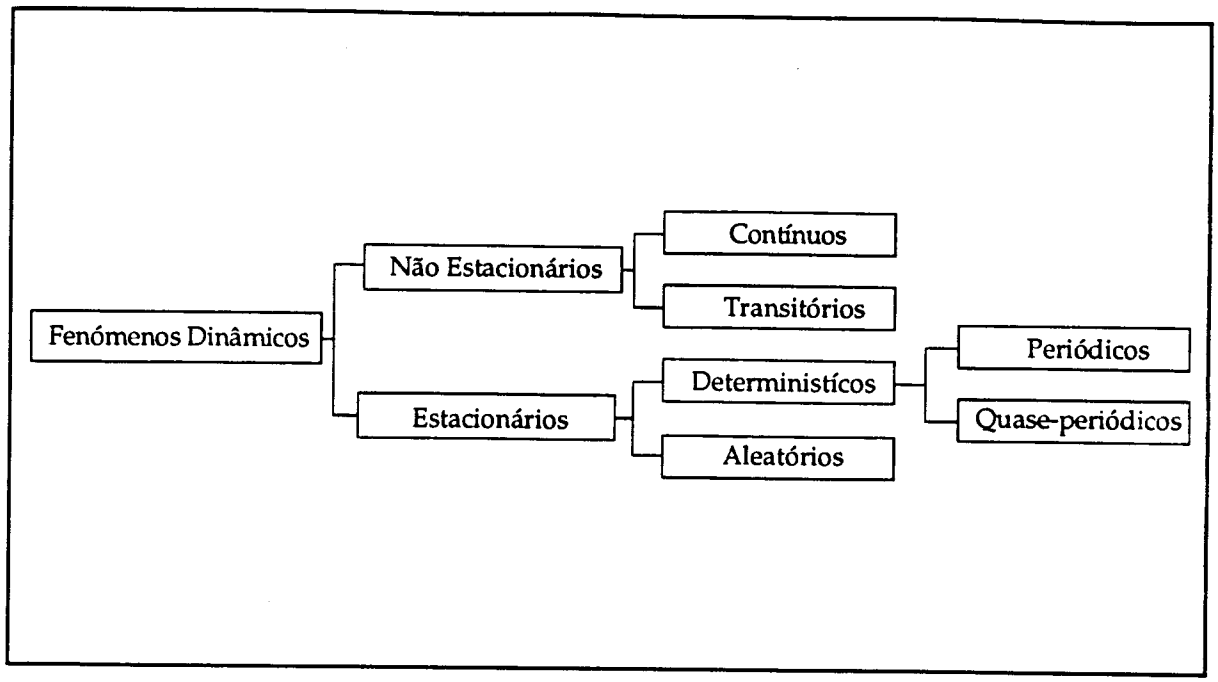


Figura 5.1 Classificação dos fenómenos dinâmicos.

Sendo a medida efectuada por detecção e comparação de padrões de interferência, é necessária a utilização de um suporte com capacidade para registar a distribuição espacial de intensidade. O tempo necessário à exposição e processamento dos registos acarreta algumas restrições que devem ser tidas em conta na selecção da técnica a utilizar no estudo de um determinado fenómeno.

Utilizando modulação de amplitude de ambos os feixes de iluminação ou modulando a fase relativa entre as frentes de onda que participam na formação do padrão de interferência, é possível desenvolver processos que permitem aumentar as capacidades de medida destas técnicas.

5.2 Técnicas de medição de deslocamentos associados a fenómenos dinâmicos.

As várias técnicas ópticas desenvolvidas para aplicação no estudo de fenómenos variáveis no tempo diferem entre si na forma como são obtidos os padrões de interferência e no suporte físico utilizado para registar a distribuição espacial de intensidade correspondente a esses padrões. Na tabela 5.1 estão

representadas as propriedades dos materiais fotossensíveis mais utilizados para esta aplicação.

Material	Reutilizável	Processamento	Tipo de holograma	Exposição necessária [J/m^2]	Sensibilidade Espectral [nm]	Resolução [l/mm]	Máx. eficiência de difracção *
Emulsão fotográfica	N	químico/húmido	amplitude **	5E-3 a 5E-1	400-700	1000-10000	*0,05*
			fase ***				*0,6*
Gelatina dicromática	N	químico/húmido	fase	1E2	350-580	>10 000	*0,9*
Photoresists	N	químico/húmido	fase	1E2	UV-500	3 000	*0,3*
Fotopolímeros	N	pós exposição	fase	10-1E4	UV-650	200-1 500	*0,9*
Photocromics	S	nenhum	amplitude	10E2-10E3	300-700	>5 000	*0,02*
Phototermoplástics	S	carga elec. + calor	fase	1E-1	400-650	500-1200	*0,3*
Cristais fotorefractivos							
$LiNbO_3$	S	nenhum	fase	1E4	350-500	>1500	*0,2*
$Bi_{12}SiO_{20}$	S	nenhum	fase	10	350-550	>10 000	*0,25*

* para uma rede sinusoidal
** com processamento químico normal
*** com branqueamento

Tabela 5.1 Características dos materiais mais utilizados na gravação de hologramas [1].

Os tempos de exposição e processamento dos vários materiais são características importantes na selecção do meio de registo a utilizar em determinada medição. A exposição é condicionada pela densidade de energia necessária à activação do processo de escrita do registo e a sua duração pode ser alterada se, para uma dada área iluminada, variar a potência luminosa disponível. Como à exposição corresponde uma convolução da função obturação com o fenómeno em estudo [22], esta provoca uma filtragem no domínio das frequências temporais, sendo conveniente que a sua duração seja o menor possível, de acordo com a evolução do fenómeno a medir. A redução do tempo de exposição diminui a sensibilidade da montagem às perturbações ambientais que interfiram com o processo de medida, desde que tenham frequências bastante diferentes.

A duração do processamento depende do meio de registo, podendo ser de alguns minutos, como no caso das emulsões fotográficas, dos fotopolímeros e dos termoplásticos [2] [3] ou praticamente imediato, como acontece com os cristais fotorefractivos. O tempo necessário a esta operação impede a aplicação de certos materiais ao acompanhamento de fenómenos que exijam utilização de referência dinâmica. Os cristais fotorefractivos, embora registem os padrões de interferência sem necessitarem de processamento, são apagados durante o processo de leitura [7], não permitindo registar permanentemente a evolução de um fenómeno com actualizações da referência.

As técnicas de Holografia Multiplexada, em que o processamento é efectuado apenas após a sequência de amostragens, permitem ultrapassar esta limitação utilizando os meios clássicos de registo. Com esta técnica é possível gravar várias amostragens sobre um mesmo registo, sendo a actualização da referência acompanhada por uma separação espacial do registo das várias amostragens [13], [14] ou por codificação das várias frentes de onda [4], [54].

Comum a todas as técnicas ópticas é a limitação imposta pela necessidade de existir correlação entre os registos efectuados. Nos casos em que as direcções de iluminação e observação são perpendiculares às superfícies em estudo, o valor de 50λ, em que λ é o comprimento de onda da radiação coerente utilizada, é normalmente indicado como limite de deslocamento sem perda de correlação [4]. O acompanhamento em contínuo de fenómenos em cuja evolução é ultrapassado o comprimento de correlação só é possível se forem utilizadas técnicas com referência dinâmica.

A introdução dos detectores *video* no registo dos padrões de interferência veio aumentar o campo de aplicação destas técnicas e facilitar a sua utilização. Este meio de registo permite tempos de gravação e processamento de 40 ms (sistema europeu) e memorização contínua dos registos efectuados. O acompanhamento de fenómenos que se desenvolvem ao longo do tempo com actualização dinâmica da referência é assim bastante facilitado. O aparecimento dos detectores CCD (*charge coupled devices*) [15] com grande sensibilidade, e dispondo de funções como controlo electrónico do tempo de exposição (desde 1/20 000 s até vários segundos com integração de vários quadros) e *reset* imediato, permitiu desenvolver sistemas integrados de interferometria para estudo de fenómenos dinâmicos. Na figura 5.2 está esquemáticamente representado um sistema interferométrico, com registo em *video* (ESPI), para aplicação ao estudo de fenómenos variáveis no tempo [8].

A utilização combinada de placas digitais de imagem e de sistemas *video* na gravação dos padrões de interferência permitiu desenvolver técnicas que recorrem quer à modulação de amplitude de ambos os feixes do interferómetro, quer a modulação de fase de qualquer deles. É assim possível acompanhar fenómenos dinâmicos como se se tratasse de fenómenos estáticos, e medir com rigor a informação de fase presente no feixe proveniente do objecto que transporta a informação do fenómeno em estudo.

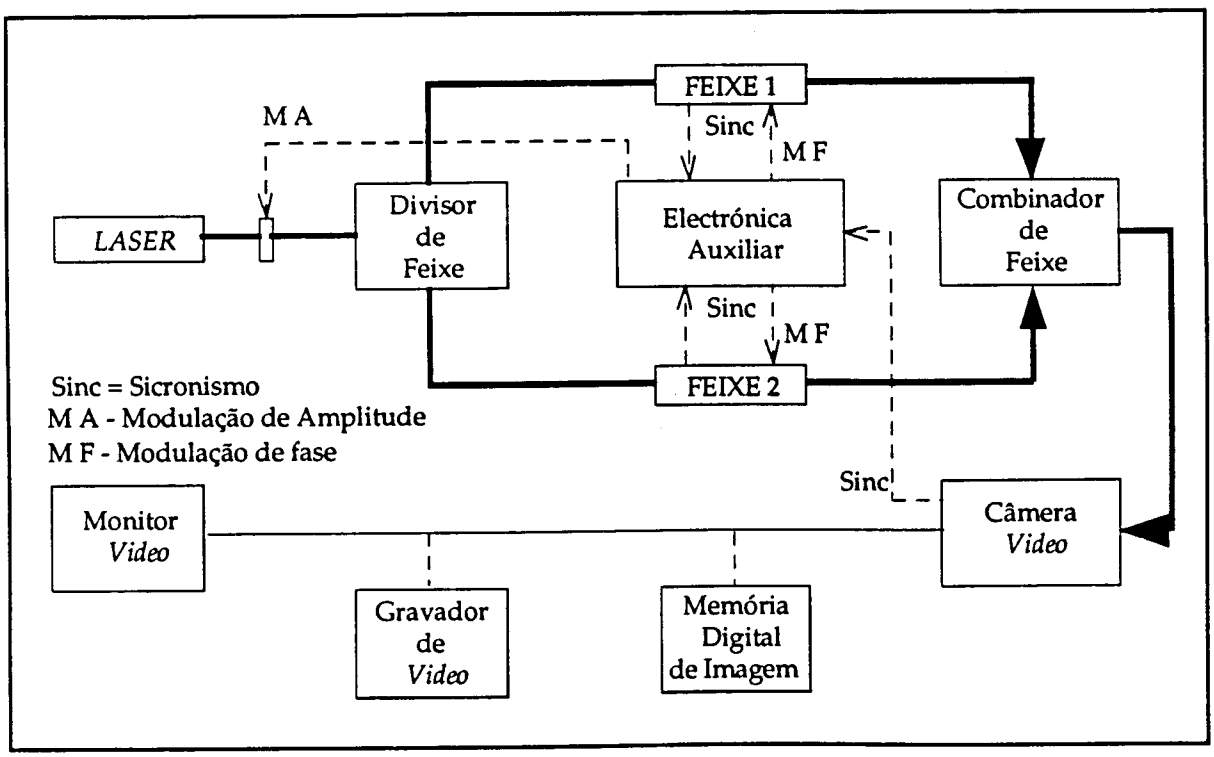


Figura 5.2 Esquema de um sistema interferométrico com registo electrónico para estudo de fenómenos dinâmicos.

A modulação em amplitude de um feixe *laser* de emissão contínua, para diminuir o tempo de exposição, reduz drasticamente a potência disponível para a escrita do registo, sendo pouco eficiente em termos de utilização da energia disponível. Com os *lasers* de impulsos é possível dispôr de grandes quantidades de energia durante períodos de tempo extremamente curtos, da ordem da dezena de nanosegundos. As potências libertadas em cada impulso fazem com que estes sejam a fonte de luz mais adequada ao estudo de fenómenos de elevada velocidade com modulação de amplitude. Utilizando pares de impulsos, é

possível efectuar medições relativas em fenómenos que se desenrolam a elevada velocidade, sem as condições de estabilidade mecânica existentes em laboratório [9].

Os *lasers* de rubi [10] (cristal de safira (Al_2O_3) com uma pequena percentagem de Al^{3+} substituída por Cr^{3+}, tem uma energia por impulso variável entre 0.03 e 100 J, com frequências de repetição possíveis entre 0.01 e 4 Hz [11]). Foram dos primeiros a ser utilizados e, apesar das dificuldades na sincronização do disparo e da instabilidade na excitação dos modos de funcionamento, ainda são usados com bons resultados neste tipo de aplicações [12]. Estes *lasers*, embora desenvolvam uma elevada energia por impulso (cuja duração pode variar entre os 10 ns e 10 ms) têm um tempo de recuperação demasiado lento para poderem ser sincronizados com sistemas *video* convencionais.

Os *laser* de Nd:YAG (cristal sintético de *yttrium aluminum garnet* dopado com Neodímio) emitem impulsos de radiação infravermelha, λ= 1,064 μm, com potências médias que podem ir até aos 600 W e taxas de repetição que variam entre 0.01 e 50 kHz [11] . A utilização de cristais não lineares como geradores de segundo harmónico permite duplicar a frequência da radiação, obtendo uma emissão *laser* visível com λ = 532 nm (verde). A taxa de repetição deste tipo de *lasers* permite sincronizá-los com o varrimento *video* e construir sistemas de medida com registo de padrões em suporte electrónico, como são por exemplo os sistemas de ESPI com *lasers* pulsados [9] .

A selecção da técnica a utilizar no estudo de um determinado fenómeno deverá ter em conta o rigor pretendido na medida, a velocidade a que o fenómeno se desenrola e a sua amplitude de variação. O rigor da medida pode ser melhorado optando por técnicas de modulação de fase quase-heteródinas (modulação temporal de fase) ou heteródinas, que permitem um grande aumento da resolução. A velocidade do fenómeno influencia a escolha do meio de registo e a opção por técnicas de modulação de amplitude. A gama de variação da grandeza medida, quando se estende para além do comprimento de correlação, implica o uso de referência dinâmica com tempos de actualização compatíveis com o fenómeno em estudo.

No caso em que os fenómenos são periódicos ou, sendo transitórios e não destrutivos podem repetir-se periódicamente, o acompanhamento da sua evolução é facilitado na medida em que este pode ser feito ao longo do tempo, efectuando amostragens em vários períodos distintos.

5.2.1 Fenómenos de baixa velocidade.

Serão designados por fenómenos de baixa velocidade os fenómenos transitórios quase-estáticos que se desenrolam a uma velocidade muito reduzida ou aqueles que, sendo estácionários, têm períodos largamente superiores aos tempos de registo e processamento dos padrões de interferência. O acompanhamento de deslocamentos associados a fenómenos de fluência [16], crescimento de plantas [6] [16] ou devidos às dilatações sofridas por um determinado material durante o seu aquecimento [17] [18], são exemplos deste tipo de fenómenos.

Quando os deslocamentos envolvidos são inferiores ao comprimento de correlação da montagem utilizada e não é necessário recorrer a referência dinâmica, é possível efectuar medições com Holografia interferométrica em tempo real efectuando o registo da evolução em *video*. Neste caso o *video* será utilizado apenas para registar o resultado da interferência entre a frente de onda préviamente gravada no holograma e as várias frentes de onda provenientes do objecto e codificadas pelo fenómeno. Se, *a priori,* for conhecida a natureza linear do fenómeno, é possível conhecer a sua evolução a partir de uma qualquer medição diferencial que poderá ser obtida por Holografia interferométrica de dupla exposição .

Ao efectuar medições em circunstâncias que conduzem à perda de correlação entre registos, como acontece quando é ultrapassado o comprimento de correlação, há alteração microscópica da textura da superfície ou se modificam significativamente as condições ambientais, é necessário recorrer a uma medida com referência dinâmica. Se for utilizado um detector *video* para registar os padrões de interferência, os 40 ms envolvidos na actualização da referência são insignificantes quando comparados com a duração deste tipo de fenómenos. Contudo, os vários minutos necessários à escrita e processamento das emulsões fotográficas podem destruir a continuidade da medida.

As técnicas de Holografia multiplexada permitem eliminar os tempos de processamento intermédio ao efectuar vários registos numa mesma placa holográfica que é processada no final da sequência de amostragens. A separação dos vários registos pode ser feita por codificação do feixe de referência [4] ou por separação espacial da informação [6]. O feixe de referência pode ser codificado fazendo variar o seu ângulo de incidência na placa holográfica, como se representa na figura 5.3, enquanto a separação espacial da informação

correspondente aos vários registos é obtida fazendo uso de janelas que são deslocadas ao longo da área do holograma, como está esquematicamente representado na figura 5.4 .

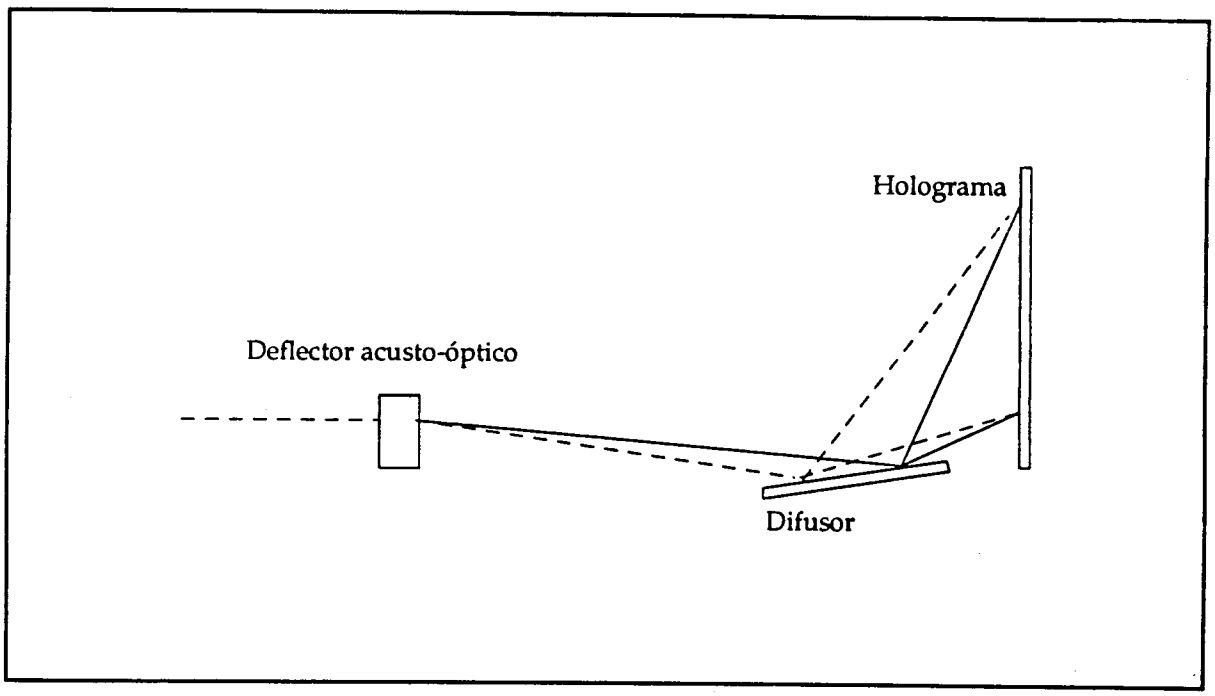


Figura 5.3 Multiplexagem e desmultiplexagem por codificação da frente de onda de referência [4].

As limitações associadas a esta técnica são impostas pelo tempo de comutação e pelo número de amostras permitidas. Enquanto a comutação das janelas obriga a utilizar sistemas mecânicos de resposta lenta, a codificação do feixe de referência, comandada electrónicamente por meio de cristais acusto-ópticos, permite diminuir os tempos de comutação. O número de amostras registado num holograma é limitado pelo aumento de ruído que cresce com $\sqrt{n}$, em que n é o número de amostras gravadas.

Os sistemas apoiados no processamento electrónico dos registos podem também ser utilizados, com algumas vantagens, neste tipo de aplicações. Além de permitirem tempos de gravação bastante reduzidos, sem recurso a qualquer tipo de processamento auxiliar, são particularmente vocacionados para a construção de sistemas automáticos de medida com registo em contínuo.

A aplicação das técnicas ópticas ao estudo deste tipo de fenómenos pressupõe que as condições ambientais da montagem se mantêm estáveis durante a medição. Dada a elevada resolução da medida, nem sempre é fácil obter as

condições de estabilidade necessárias, principalmente quando estas técnicas são utilizadas fora do ambiente laboratorial. Contudo, a elevada experiência alcançada por alguns grupos de investigação tem permitido que alguns trabalhos nesta área tenham sido levados a cabo com sucesso fora dos laboratórios.

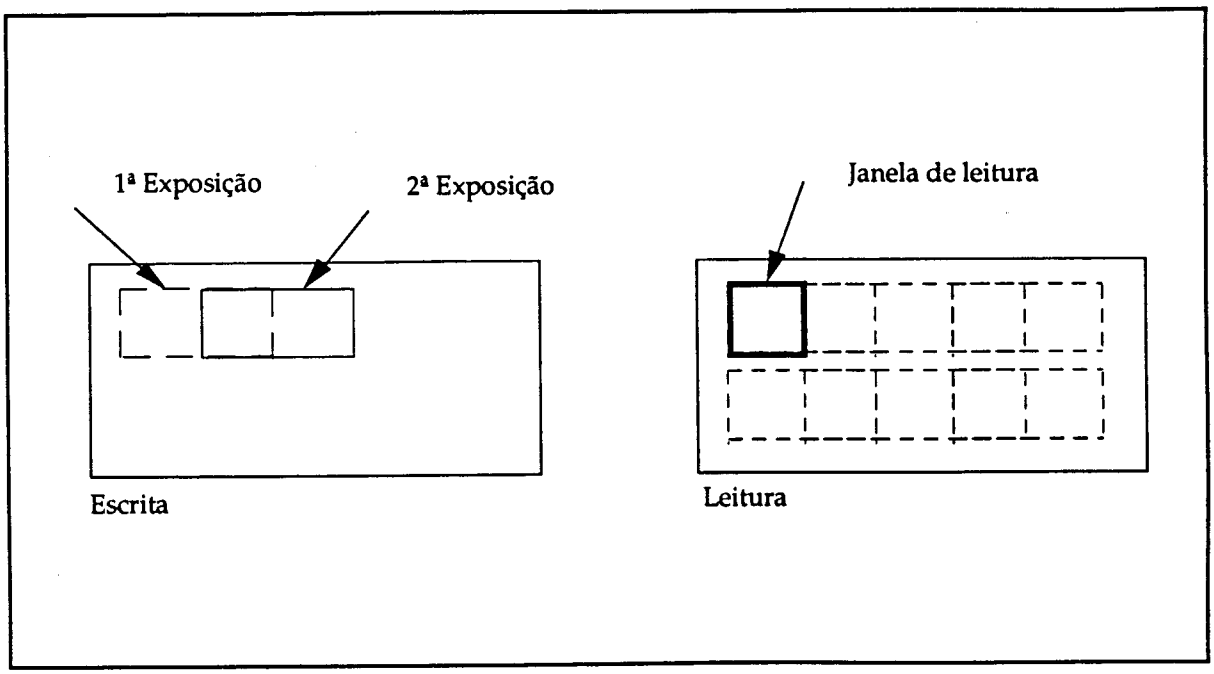


Figura 5.4 Holografia multiplexada, escrita e leitura de um holograma de dupla exposição com separação espacial dos vários registos [4].

5.2.2 Medições em tempo médio *(time average)*.

Foi com a aplicação das técnicas de tempo médio à determinação dos modos próprios de vibração que, em 1965, Powell e Stetson [19] publicaram o primeiro trabalho de aplicação da interferometria holográfica à Mecânica Experimental. Os primeiros sistemas de ESPI, devido às dificuldades então existentes na subtracção de imagens *video*, eram também particularmente vocacionados para este tipo de medições [20].

A medição em tempo médio consiste em registar o padrão de interferência de um objecto enquanto este se encontra a vibrar numa das suas frequências próprias. O tempo de exposição deverá ser maior que o período de vibração do objecto, traduzindo o registo obtido o resultado da integração dos padrões de

interferência correspondentes às várias posições ocupadas pelo corpo durante o seu movimento. Os padrões de franjas resultantes têm uma intensidade modulada por uma função não linear que depende do movimento do objecto e correspondem ao lugar geométrico dos pontos com igual amplitude de vibração.

As técnicas de interferometria holográfica, operando em tempo médio, são bem adaptadas ao estudo de fenómenos estacionários periódicos. Um exemplo de aplicação é a determinação das frequências e modos próprios de vibração de componentes estruturais. Sendo o componente excitado por uma carga sinusoidal de frequência variável e amplitude constante, as frequências próprias de vibração são detectadas pelo seu efeito no aumento da amplitude do movimento. O registo do padrão de interferência permite conhecer a geometria do modo de vibração correspondente, revelando as zonas de maior amplitude e o respectivo deslocamento, assim como as zonas nodais. A elevada resolução, o carácter global da medida e a ausência de qualquer contacto com a superfície faz com que estas técnicas, em determinadas circunstâncias, substituam com vantagens os métodos tradicionais baseados em medições pontuais de aceleração.

Admitindo que um corpo se encontra em movimento harmónico em torno de uma posição média, o seu deslocamento fora do plano pode ser descrito por:

$$U(t) = a_0 \cos \omega t \qquad (5.1)$$

onde a_0 é a amplitude do deslocamento e ω é a frequência angular, relacionada com a frequência do movimento através de $f = \omega/2\pi$. Se for gravado um holograma do objecto segundo uma direcção perpendicular à sua superfície, obtém-se um padrão de franjas de interferência cuja fase é modulada sinusoidalmente pelo movimento do objecto. A amplitude do padrão obtido é modulada por uma função que, para um movimento harmónico do objecto, corresponde à expansão em funções de Bessel, normalmente utilizada em modulação de fase [21]. Quando o tempo de exposição é muito superior ao período do movimento apenas é considerado o termo correspondente à portadora [22], pelo que a função de franja correspondente a este registo é descrita por [23]:

$$M(x,y)=\exp(i\phi)J_0\left(\frac{4\pi a_0}{\lambda}\right) \qquad (5.2)$$

com ϕ a representar a diferença de fase entre as frentes de onda objecto e de referência (que é independente do tempo). J_0 representa a função de Bessel de ordem 0, a_0 refere-se à amplitude do movimento do objecto e λ ao comprimento de onda da radiação *laser* utilizada na gravação do holograma.

A função de franja que é obtida por reconstrução do holograma, ou electronicamente no caso de um sistema com registo em *video* com completa resolução de *speckle* pela câmera, será:

$$|M(x,y)|^2 = k J_0^2\left(\frac{4\pi a_0}{\lambda}\right) \qquad (5.3)$$

em que k é uma constante. Na figura 5.5 representam-se graficamente as funções $J_0(x)$ e $J_0^2(x)$ para uma variação de x no intervalo [0 , 12].

A qualidade de imagem obtida com os sistemas interferométricos com registo em *video* (ESPI) é normalmente satisfatória para este tipo de aplicações. Além disso a possibilidade de obter múltiplos hologramas sem necessitar de processamento ou ter que os reposicionar, torna os sistemas de ESPI bastante adaptados a este tipo de aplicações.

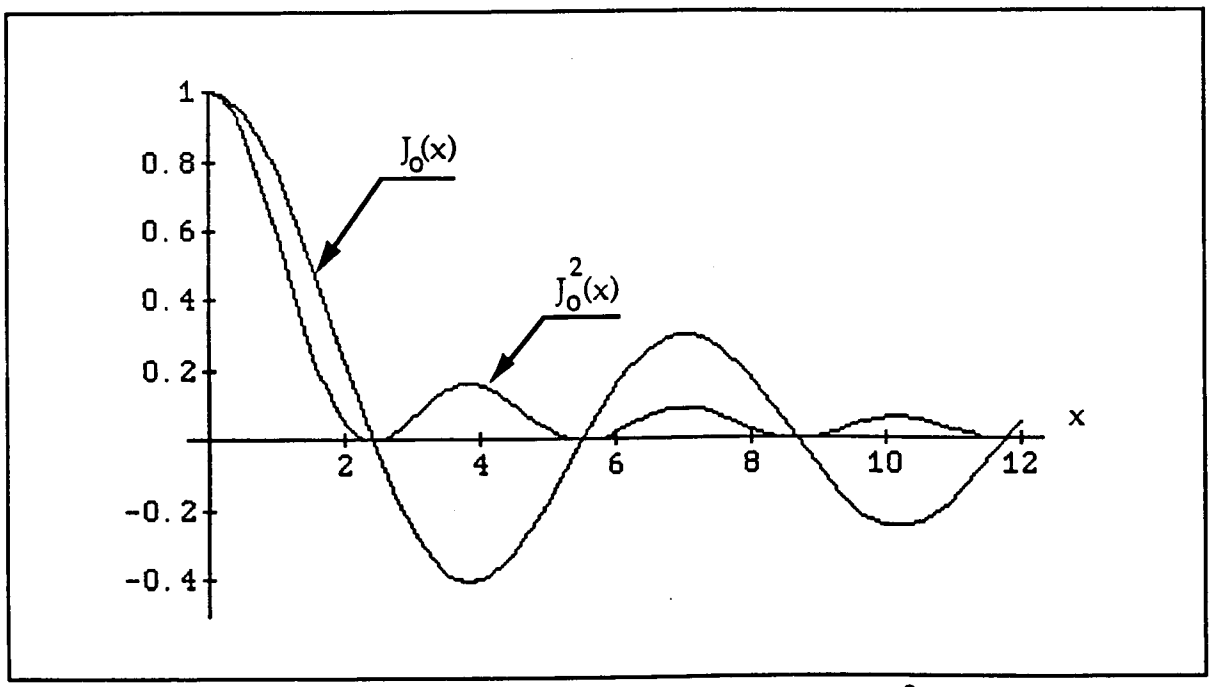


Figura 5.5 Representação gráfica das funções $J_0(x)$ e $J_0^2(x)$.

Nos sistemas de ESPI convencionais, o registo do padrão de interferência e a sua reconstrução são obtidos electronicamente recorrendo à filtragem passa banda

do sinal *video*, para diminuir os termos de autocorrelação e aumentar o contraste da imagem. A resposta do detector *video*, a resposta da filtragem e a rectificação, quando convenientemente ajustadas, permitem eliminar quase na totalidade os termos de autocorrelação. Na figura 5.6 pode ver-se um padrão de franjas obtido em tempo médio, com um sistema de ESPI convencional, de um tubo de bronze com ø= 100 mm, e l= 900 mm e 1 mm de espessura, a vibrar num dos seus modos próprios quando excitado acusticamente.

A utilização de placas de processamento de imagem com subtracção de oito *bits* em tempo real permite conceber sistemas onde são possíveis outras formas de processamento de sinal. Neste caso é gravada préviamente uma imagem de referência, à qual são depois subtraídas em contínuo as imagens provenientes do objecto em vibração. A subtracção, ao remover todos os termos invariáveis no tempo, melhora o contraste das franjas embora, neste caso, o ruído electrónico seja o dobro do ruído presente quando é envolvida uma só imagem. O contraste da imagem final depende quer das imagens adquiridas em contínuo quer da imagem inicial utilizada como referência. Podem assim ser definidas várias formas de correlação que se distinguem na forma de obtenção da primeira imagem e na diferença de fase introduzida entre esta e as seguintes:

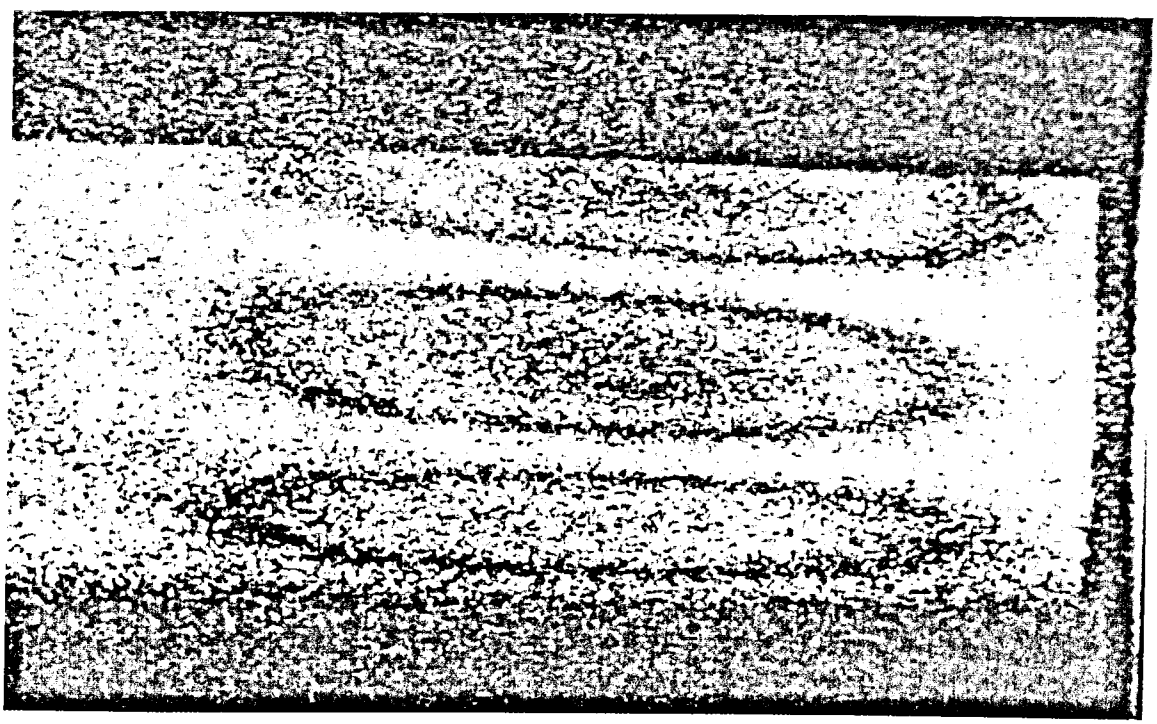


Figura 5.6 Padrão de franjas obtido em tempo médio com um sistema de ESPI convencional de um tubo a vibrar num dos seus modos próprios.

i) caso A.

As imagens em tempo médio são continuamente subtraídas de uma referência préviamente gravada com o objecto em repouso. A imagem inicial contém os termos de autocorrelação de ambos os feixes e o termo de intercorrelação devidos a interferência entre eles. Definindo as funções de franja das imagens de referência e de sinal, respectivamente, por:

$$M_1 = \exp(i\phi) \tag{5.4}$$

$$M_2 = \exp\left[\, i(\phi+\Delta\phi)\,\right] J_o\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right) \tag{5.5}$$

onde, $\Delta\phi$ representa a diferença de fase entre a imagem de referência e a imagem do objecto em vibração, devida a qualquer deslocamento de corpo rigido ou distorção sofrida por este. Combinando as duas funções e normalizando os resultados no intervalo [0,1], obtém-se a seguinte expressão para o padrão de franjas secundárias:

$$|M_1 - M_2|^2 = \frac{1}{1.986}\left[1 - 2J_o\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right)[\cos(\Delta\phi)] + J_o^2\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right)\right] \tag{5.6}$$

A esta expressão corresponde um sinal variável entre 0 e 1. O valor zero ocorre nos pontos em que não existe movimento, pelo que os nodos de vibração serão escuros. O segundo termo em cosseno corresponde a um conjunto adicional de franjas sobrepostas às resultantes da medida, originadas por alterações no feixe objecto. Se, durante o intervalo da medida, a montagem óptica for suficientemente estável para $\Delta\phi$ poder ser considerado nulo, a expressão (5.6) pode ser simplificada para:

$$|M_1 - M_2|^2 = \frac{1}{1.986}\left[1 - J_o\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right)\right]^2 \tag{5.7}$$

onde a constante que multiplica a expressão corresponde ao valor máximo alcançado pela função $[1-J_o^2(x)]^2$ e se destina à normalização da função de franja. Se após a gravação da primeira imagem for introduzida, entre os feixes objecto e

de referência, uma diferença de fase de π [24], obter-se-á um padrão de franjas onde os pontos estacionários serão claros. No caso da montagem ser estável, será representado pela equação:

$$|M_1 - M_2|^2 = \frac{1}{4}\left[1 + J_o\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right)\right]^2 \qquad (5.8)$$

Como nem sempre é possível controlar com rigor a estabilidade da montagem, esta forma de obtenção das franjas de correlação não é das mais aconselháveis. O ruído presente na imagem final corresponde à soma do ruído de cada uma das imagens envolvidas na obtenção das franjas de correlação.

ii) caso B.

Neste método, que foi desenvolvido por Creath e Slettemoen [25], a imagem de referência inclui apenas os termos de autocorrelação. A eliminação dos termos de intercorrelação devidos à interferência é conseguida através de um espelho móvel introduzido no encaminhamento do feixe de referência. Se durante a gravação da primeira imagem for introduzida uma vibração de grande amplitude no espelho, ou o mesmo for posto a vibrar com uma amplitude correspondente a um zero da função J_o^2, obtém-se uma imagem que contém apenas os termos de autocorrelação. O espelho é imobilizado para adquirir as imagens do objecto em vibração, que são subtraídas da imagem inicial. Com este artifício, é possível eliminar completamente os termos de autocorrelação, cuja presença na imagem final apenas serve para lhe diminuir o contraste. A função de franja correspondente a este método é descrita por:

$$|M_1 - M_2|^2 = J_o^2\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right) \qquad (5.9)$$

Embora esta expressão seja semelhante à obtida para os sistemas de ESPI convencionais (5.3), existem contudo algumas diferenças. Neste caso os termos de autocorrelação são completamente eliminados. Nos sistemas de ESPI convencionais, tal só é conseguido com a utilização de aberturas especialmente

desenhadas, como são as aberturas de Biedermann e Slettemoen, referidas no capitulo anterior. O ruído electrónico presente na imagem é, neste caso, quatro vezes mais elevado, resultando da contribuição de ambas as imagens. Apesar do aumento do ruído electrónico, este método permite obter imagens com bom contraste, tendo muitas das fotografias de tempo médio presentes neste trabalho sido obtidas desta forma.

iii) caso C.

É também possível utilizar como referência uma imagem obtida com o objecto em movimento. Neste caso, após a gravação da imagem de referência, é introduzida uma diferença de fase de π entre o feixe objecto e o feixe de referência, obtendo assim duas imagens cujas funções de franja são representadas por:

$$M_1 = \exp(i\phi) J_o\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right) \tag{5.10}$$

$$M_1 = \exp(i[\phi + \Delta\phi + \pi]) J_o\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right) \tag{5.11}$$

A subtracção conduz a um padrão de interferência cuja função de franja pode ser descrita pela expressão:

$$|M_1 - M_2|^2 = J_o^2\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right)\cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \tag{5.12}$$

Mais uma vez $\Delta\phi$ é uma função das coordenadas (x,y) na imagem. Esta quantidade representa a diferença de fase entre ambos os feixes do interferómetro, induzida quer por instabilidades na montagem, quer por alterações no objecto. A presença deste factor torna este método de correlação dependente da estabilidade da montagem. Contudo, se a montagem for estável, este método permite, obter padrões com contraste equivalente ao obtido com um sistema de ESPI convencional, ou com o segundo método descrito atrás.

Na figura 5.7 representam-se graficamente as funções moduladoras de amplitude dos padrões de franjas obtidos com cada um dos casos referidos. Em todas estas técnicas são obtidos padrões de franjas cuja intensidade é modulada pela função de Bessel de ordem zero. Os padrões obtidos com o segundo e terceiro caso são de fácil interpretação. Conduzem a imagens com a mesma modulação (função A na figura 5.7) das obtidas com os sistemas de ESPI convencionais, onde os pontos estacionários aparecem claros e as áreas escuras têm amplitudes próximas de zero. No entanto, se o ruído electrónico for reduzido e as montagens tiverem boa estabilidade, com estes dois métodos é possível obter imagens de contraste igual ou superior.

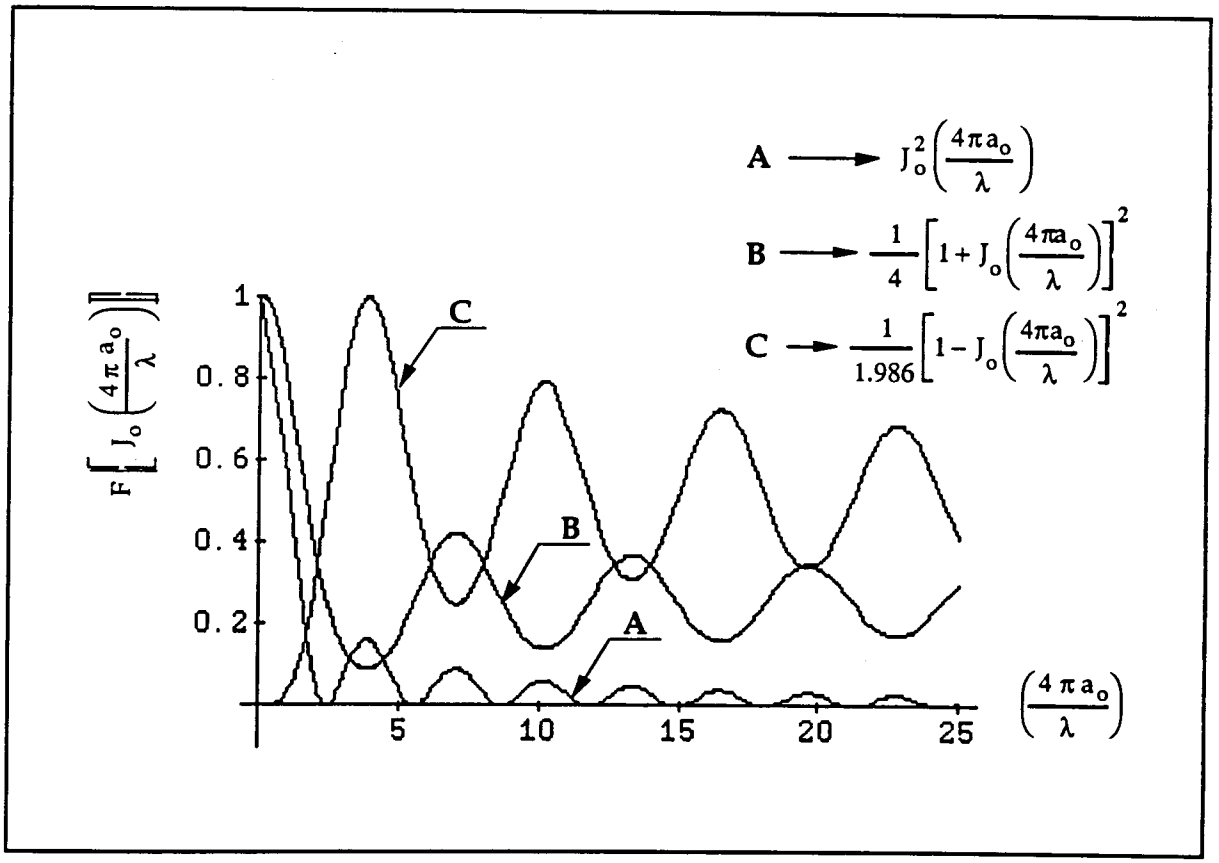


Figura 5.7 Representação gráfica das funções moduladoras de amplitude dos padrões de franjas obtidos com os vários métodos de correlação por subtracção.

Nos outros dois métodos referidos, a intensidade das franjas oscila em torno de um determinado valor e nunca chega a anular-se, conduzindo a imagens de menor contraste [23]. Os sistemas de ESPI convencionais, dado não necessitarem

de imagem de referência, são melhor adaptados às medições efectuadas em montagens instáveis. Contudo, não sendo grande a instabilidade, é com o método de subtracção que se obtêm os padrões de interferência com maior contraste.

5.2.2.1 Como melhorar o contraste dos padrões de franjas obtidos em tempo médio.

Quando os padrões de franjas secundárias de tempo médio são obtidos por Holografia, embora apresentem a modulação de amplitude que os caracteriza, têm um contraste semelhante ao dos padrões obtidos por dupla exposição. Em Holografia, a possibilidade de separar espacialmente os termos de intercorrelação permite obter imagens de elevado contraste onde, devido à ausência de sistema óptico formador de imagem, o *speckle* não é normalmente visível.

As vantagens que os sistemas com registo em *video* apresentam neste tipo de aplicações são suficientes para justificar a sua utilização, mesmo com registos de contraste inferior. Os padrões de franjas secundárias obtidos com estes sistemas, além do ruído aditivo introduzido pelos circuitos electrónicos envolvidos na aquisição e processamento do sinal (equação 4.9), possuem também ruído multiplicativo. Este ruído manifesta-se sob a forma de *speckle* e é introduzido pela portadora de informação do sistema. Sobreposto às variações suaves de intensidade correspondentes ao padrão de franjas secundárias aparece um padrão de *speckle* que resulta de variações aleatórias de fase, e cujo contraste pode ser calculado por [26]:

$$C_s = \frac{\sigma_B}{\langle B \rangle} \qquad (5.13)$$

onde σ_B se refere ao desvio padrão do brilho do monitor, cujo valor médio é representado por <B>. Idealmente C_s deveria ser nulo, correspondendo a um padrão de franjas secundárias isento de *speckle*. Na prática, obtém-se o valor de $\sqrt{2}$ para um interferómetro em que um dos feixes é uniforme e $(2 + 3\tau)^{1/2}$ para um interferómetro em que ambos os feixes são padrões de *speckle* [27]. O parâmetro τ que figura na segunda expressão varia no intervalo [0,1], diminuindo

com o aumento da abertura do sistema óptico, e representa a razão entre a resolução do sistema óptico e a resolução do sensor de imagem da câmera [26]. O facto de o contraste ser superior ao valor unitário obtido por Goodman[28] para um padrão de *speckle* convencional resulta de o par de imagens virtual e conjugada ser reconstruido simultâneamente. O contraste obtido em interferómetros com referência de *speckle* é ligeiramente superior, dado que ambos os padrões contribuem para as variações verificadas no termo de intercorrelação.

A adição de várias imagens com a mesma função de franja e padrões de *speckle* não correlacionados permite, após determinar o valor médio da intensidade para cada *pixel*, obter uma redução no contraste do ruído. Se forem envolvidas N imagens obter-se-á uma redução de

$$C_{reduz} = \frac{C_s}{\sqrt{N}} \qquad (5.14)$$

Para que haja descorrelação nos padrões de *speckle* é necessário que o ângulo de iluminação seja alterado por forma a admitir novos *speckles* na abertura do sistema óptico [29]. O mesmo efeito pode ser obtido deslocando a abertura do sistema óptico formador de imagem no seu plano [26]. Se o objecto for iluminado com o padrão de *speckle* resultante do espalhamento da luz por um difusor, a descorrelação é facilmente obtida deslocando o difusor [30]. Foi esta a técnica usada na obtenção das imagens da figura 5.8.

O contraste do padrão das franjas secundárias cresce proporcionalmente ao número de imagens envolvidas até ser atingido um determinado valor limite, após o qual apenas o ruído de *speckle* é alterado de forma significativa. Utilizando um elevado número de imagens, num sistema de ESPI com reduzido ruído electrónico, é possível obter padrões de franjas com qualidade próxima dos obtidos com a Holografia. O autor verificou que, utilizando 8 imagens possuindo a mesma função de franja mas provenientes de padrões de *speckle* não correlacionados, se obtêm padrões com bom contraste, como pode ser observado nas figuras 5.8 e 5.9. A continuação do processo, envolvendo mais imagens, apenas diminui o ruído de *speckle*, aumentando contudo a contribuição do ruído electrónico.

Num trabalho publicado por Joenathan *et al* [31], em que em vez da descorrelação de *speckle* se faz variar controladamente a diferença de fase entre as várias imagens envolvidas na determinação da média, é indicado o número de

12 imagens para o limite a partir do qual a variação de contraste do padrão de franjas deixa de ser significativa.

Boxiang Lu *et al* [32], verificou que era possível melhorar o contraste de padrões de franjas secundárias, determinando médias de imagens obtidas em tempo médio em montagens com alguma instabilidade. As alterações de fase do padrão de *speckle* provocadas por correntes de convecção ou pequenas instabilidades mecânicas são suficientes para, com médias de seis imagens, se obter reduções significativas do ruído de *speckle.*

A utilização de sistemas de processamento digital com capacidade de memória para armazenar várias imagens permite utilizar técnicas de varrimento de fase com tratamento de informação *pixel* a *pixel.* O varrimento de máximo/mínimo (máx/mín) [33] consiste em fazer variar a fase entre o feixe de referência e o feixe objecto por forma a que a amplitude em cada ponto percorra toda a modulação do sinal.

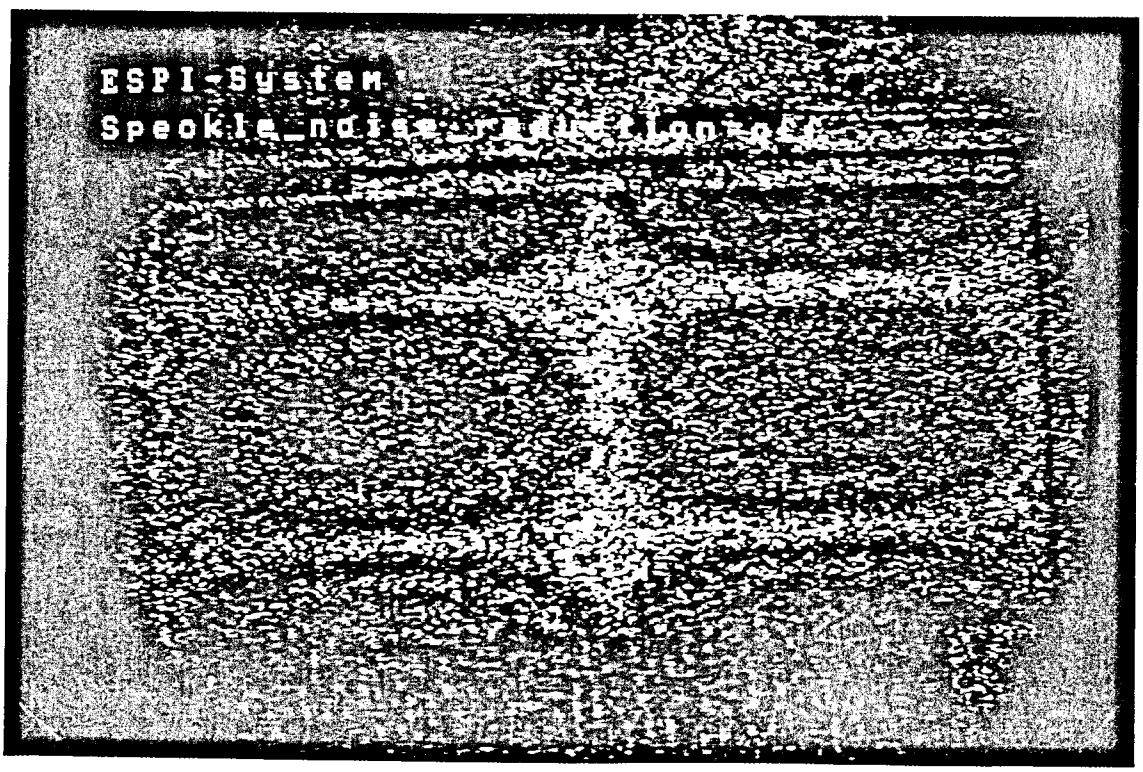


Figura 5.8 Redução de ruído de *speckle* por adição de imagens obtidas com padrões de *speckle* não correlacionados. Padrão inicial obtido por correlação em tempo médio.

Considerando que o ponto (x´,y´) dum objecto vibra harmonicamente com uma amplitude fora do plano $a_0(x',y')$ e que esse ponto da superfície tem como

imagem o *pixel* (x,y) no alvo da câmera *video*, a intensidade no ponto (x,y) pode ser descrita por:

$$I(x,y)=I_o(x,y)+I_a(x,y)\times J_o\left[\frac{4\pi}{\lambda}a_o(x',y')\right]\cos\left[\alpha(x,y)\right] \qquad (5.15)$$

Nesta expressão I_o é o valor médio da intensidade no *pixel* (x,y), I_a é a intensidade da modulação para esse *pixel* , J_o é a função de Bessel de ordem zero e $\alpha(x,y)$ é a diferença de fase entre ambos os braços do interferómetro para esse ponto. A utilização de um cristal piezoeléctrico para deslocar um dos espelhos utilizados no encaminhamento do feixe de referência permite variar a fase entre os feixes, alterando assim o valor de $\alpha(x,y)$. Com o objecto a vibrar, e medindo a intensidade num *pixel* com modulação, calibra-se o sistema deslocando o espelho e detectando o deslocamento correspondente a uma variação de fase de 2π, ponto 1 e ponto 2 na figura 5.10. O varrimento de máx/mín corresponde a fazer variar a fase $\alpha(x,y)$ em n incrementos $d\alpha$, por forma que $\sum_n d\alpha = 2\pi$, registando as imagens obtidas para cada incremento de fase.

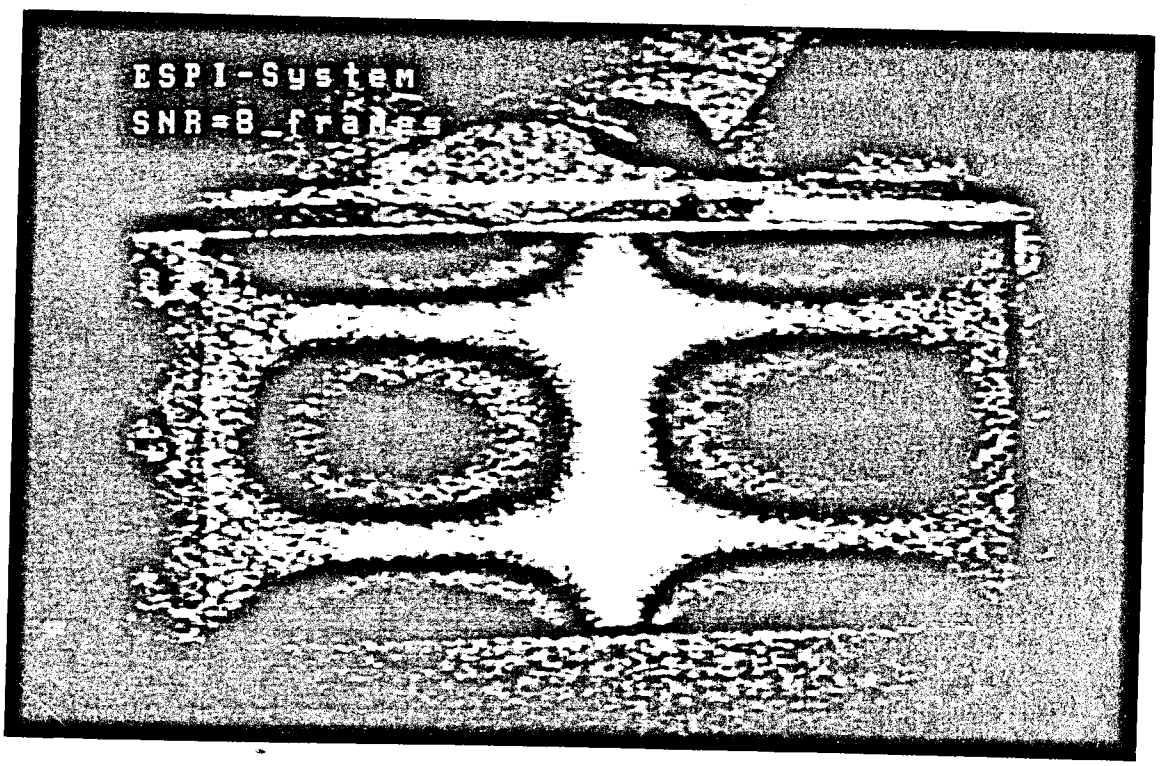


Figura 5.9 Padrão de interferência após redução de ruído de *speckle*. Média de 8 padrões não correlacionados.

A análise das intensidades de cada *pixel* nas várias imagens permite detectar os que não têm modulação e, para cada um daqueles em que I_a é diferente de zero, determinar quais são os valores máximo e mínimo da intensidade. O padrão de franjas secundárias é obtido substituindo a intensidade de cada *pixel* com modulação pela diferença entre os valores máximo e mínimo de intensidade determinada pelo varrimento. Nos pontos sem modulação, a sua intensidade é obtida interpolando entre as intensidades dos pontos com modulação mais próximos. Obtém-se assim uma imagem cuja intensidade é descrita por:

$$I(x,y)= I_a(x,y)\times J_0\left[\frac{4\pi}{\lambda}a_0(x',y')\right] \qquad (5.16)$$

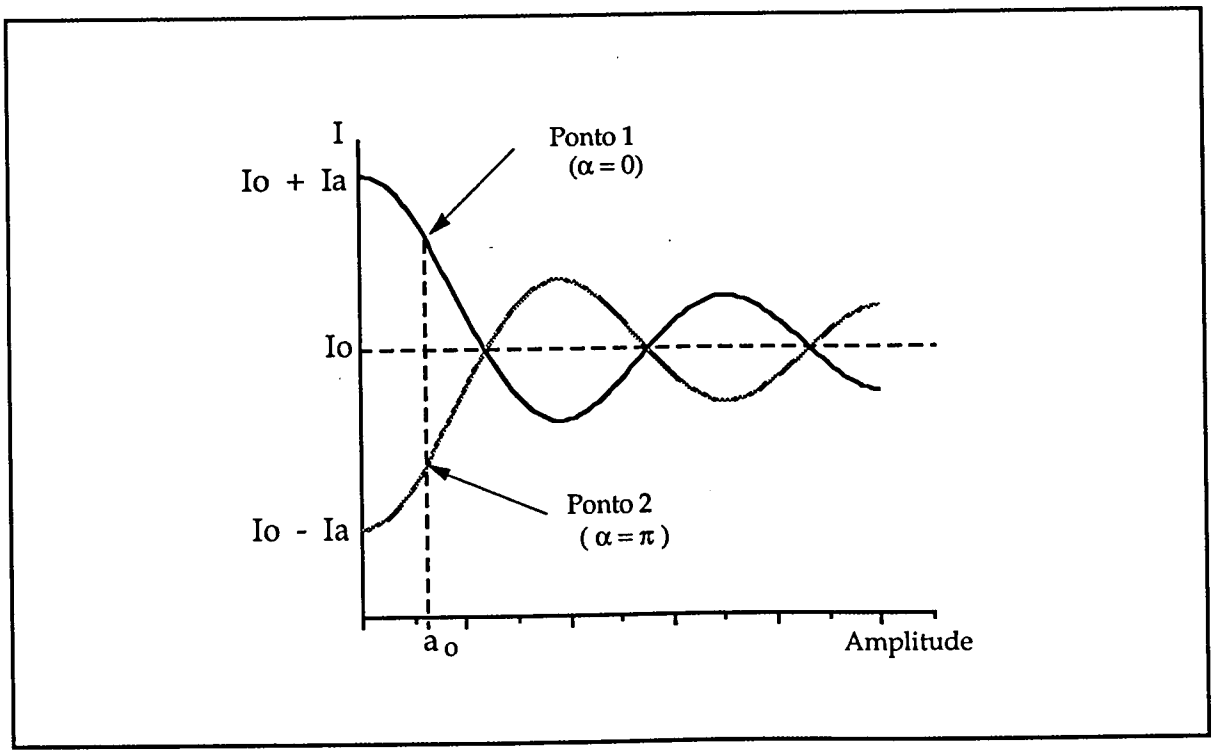


Figura 5.10 Curvas de modulação de amplitude obtidas para $\alpha=0$ e $\alpha=\pi$. O ponto 1 e o ponto 2 representam respectivamente o limite superior e inferior da modulação para o *pixel* da posição (x,y) que corresponde ao ponto (x´,y´) do objecto que vibra com amplitude a_0.

Neste caso, a intensidade do padrão de franjas secundárias é modulada por $|J_0|$, em vez de J_0^2, o que , como se pode ver na figura 5.5, corresponde a uma modulação cuja envolvente diminui mais lentamente. Esta diferença na função moduladora permite aumentar a visibilidade dos padrões de franjas secundárias, aumentando também o número de franjas identificáveis.

O contraste dos padrões obtidos com o varrimento de máx/mín pode ainda ser melhorado isolando o único termo com informação sobre a amplitude de vibração. Esta técnica é designada por varrimento de máx/mín normalizado e consiste em dividir a imagem obtida pelo varrimento por outra resultante de varrimento idêntico, efectuado com o objecto em repouso [34]. Ao eliminar a vibração do objecto faz-se $a_0(x',y')=0$, e o varrimento de máx/mín permite obter $I_a(x,y)$ isoladamente. Dividindo *pixel* a *pixel* a expressão (5.16) por $I_a(x,y)$, normaliza-se a amplitude da modulação, obtendo uma imagem onde existe apenas o termo $J_0[k\ a_0(x',y')]$. A imagem assim obtida é multiplicada por 256 para fazer uso de todos os níveis de cinzento possíveis na placa de processamento.

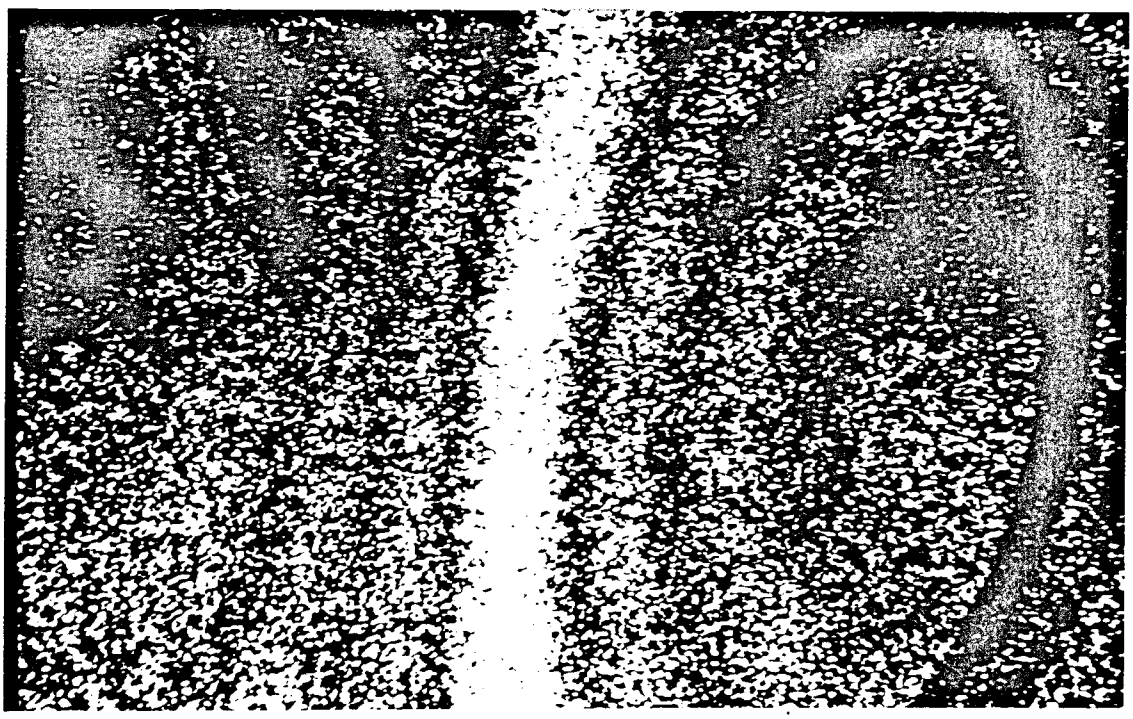


Figura 5.11 Padrão de interferência obtido em tempo médio com um sistema de ESPI com referência de speckle.

As técnicas já referidas para melhorar o contraste dos padrões de franjas secundárias obtidos com ESPI não podem ser utilizadas em tempo-real. A aquisição das várias imagens, bem como o controlo da fase entre elas ou a

descorrelação do padrão de *speckle,* tornam o processo moroso quando comparado com os 20 ms da amostragem *video.*

Quando os padrões de franjas de tempo médio são obtidos por subtracção, é possível melhorar o seu contraste simplesmente variando a fase entre a imagem de referência e as imagens adquiridas continuamente [35]. O máximo contraste obtido com esta técnica corresponde a uma diferença de fase de $\pi/2$ e é inferior ao obtido com qualquer outra das técnicas anteriormente referidas. Além da qualidade inferior de imagem e da maior sensibilidade a perturbações ambientais, esta técnica tem contudo a grande vantagem de poder ser utilizada em tempo real.

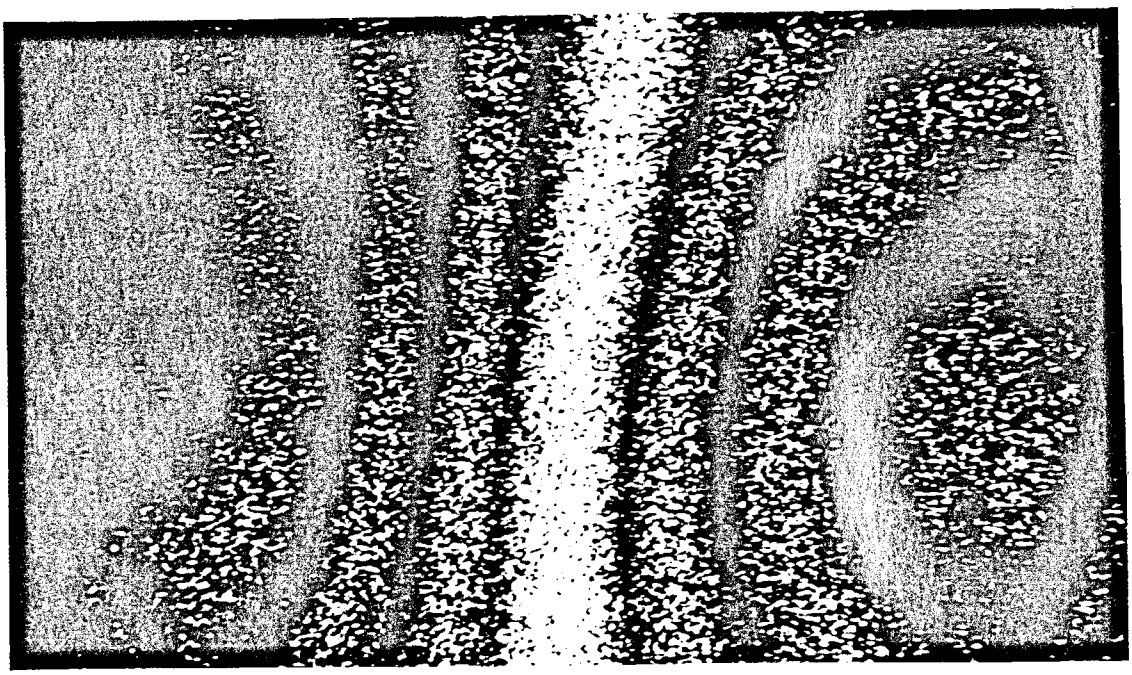


Figura 5.12 Padrão de interferência da figura 5.11 após o processamento de máximo/mínimo.

5.2.3 Modulação de fase do feixe de referência.

Os registos obtidos em tempo médio resultam da integração no tempo das imagens correspondentes às sucessivas posições ocupadas pelo objecto no seu movimento. As franjas secundárias obtidas, máximos e minímos relativos da função de Bessel J_0, permitem determinar a amplitude do movimento dos vários

pontos da superfície. Contudo, estes registos não possuem qualquer informação sobre a fase do movimento.

Tendo em atenção que o feixe objecto é modulado em fase pelo movimento em estudo, Aleksoff [36] propôs que se utilizasse o mesmo tipo de modulação no feixe de referência para tornar esta técnica sensível à fase .

Se na condução do feixe de referência for utilizado um espelho montado sobre um cristal piezoeléctrico, a modulação de fase do feixe de referência pode ser obtida deslocando o espelho por aplicação de uma tensão eléctrica no cristal. Embora existam outras formas de modular o feixe de referência, a utilização de cristais piezoeléctricos é das menos dispendiosas e tem uma resposta que, sendo limitada pelas forças de inércia, é aceitável entre 0-50 KHz [37]. A utilização de cristais electro-ópticos ou técnicas ultrasónicas, embora permitam obter frequências de modulação superiores (0 - 100 MHz), têm um preço bastante mais elevado.

As técnicas de modulação de fase, tratadas na sua forma mais geral por Aleksoff [38] permitem, na versão mais simples de modulação sinusoidal de fase (MSF), determinar com relativa precisão a fase de movimentos sinusoidais estudados com técnicas de tempo médio.

Em MSF o feixe de referência é modulado sinusoidalmente em fase com a mesma frequência do movimento do objecto. Esta modulação permite que o padrão de franjas secundárias seja alterado de acordo com as diferenças de amplitude e fase entre ambos os braços do interferómetro. Admitindo que o espelho utilizado na modulação tem um movimento sinusoidal de frequência idêntica à do objecto e amplitude descrita por:

$$\Delta r_r(t) = a_r \sin(\omega t + \varnothing_r) \qquad (5.17)$$

onde a_r e $\varnothing_r$ representam respectivamente a amplitude e fase do movimento do espelho, a expressão (5.3) referente a um sistema de ESPI convencional será alterada por forma a incluir a modulação

$$|M(x,y)|^2 = k J_0^2\left(\frac{4\pi}{\lambda}\left\{|a_o(x,y)|^2+|a_r|^2-2|a_o(x,y)||a_r|\cos[\varnothing_o(x,y)-\varnothing_r]\right\}^{\frac{1}{2}}\right) \qquad (5.18)$$

Embora se mantenha a função moduladora J_o o seu argumento tornou-se dependente da diferença entre os fasores representativos dos dois feixes, como se representa na figura 5.13.

A intensidade das franjas diminui rapidamente com o aumento da ordem da franja, sendo a de ordem zero, correspondente a $J_o^2(0)$, cerca de seis vezes mais intensa que a de ordem um. Esta franja será observada nos pontos em que seja verificada a igualdade entre as fases e amplitudes dos dois feixes, isto é, $a_o(x,y)=a_r$ e $\varnothing_o(x,y)=\varnothing_r$. Utilizando MSF e aproveitando a fácil detecção da franja de ordem zero, foram desenvolvidas técnicas que permitem determinar mapas de fase do movimento [39] e aumentar a gama [40] ou a resolução da medida [41]. Apesar destas técnicas serem mais frequentemente utilizadas em sistemas de ESPI, podem também ser utilizadas com Holografia, como provam os trabalhos publicados por Aleksoff e Neumann [38] e [42].

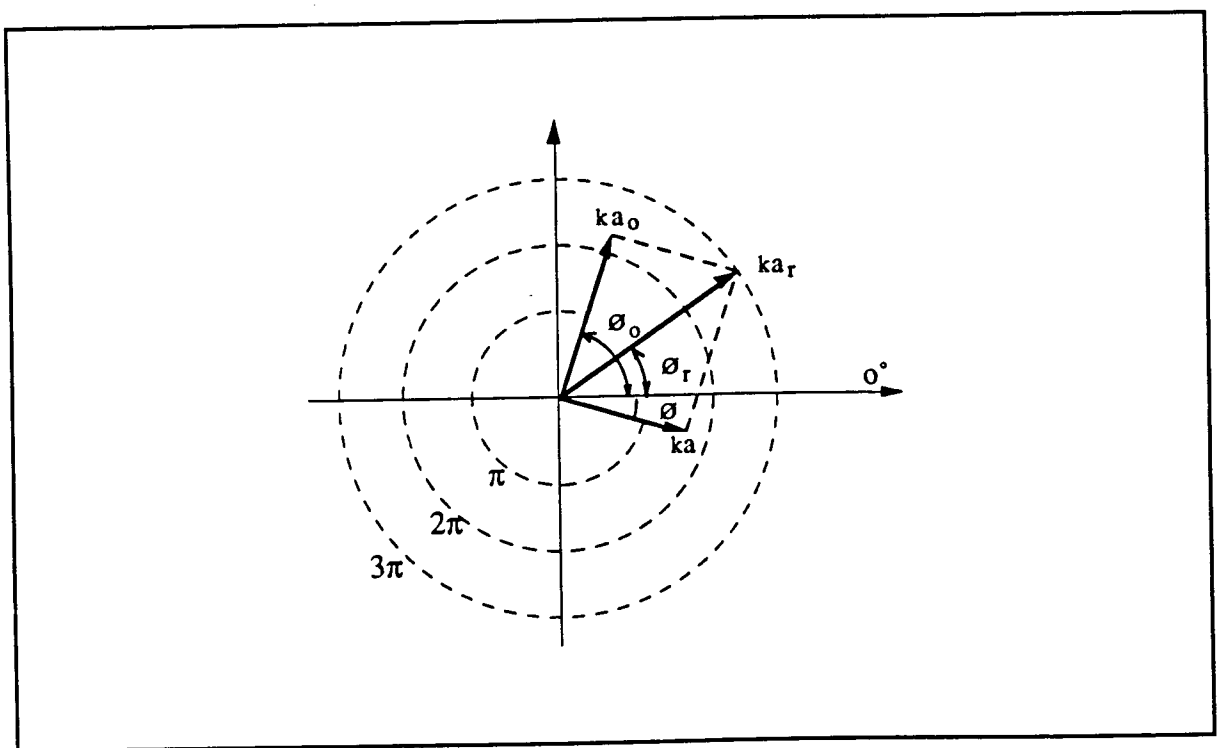


Figura 5.13 Diagramas dos fasores representativos do feixe de referencia ka_r e feixe objecto ka_o para um determinado ponto (x,y) que terá como resultante o fasor ka [42].

Se a amplitude da modulação $|a_r|$ for constante, à variação de fase da referência corresponderá um deslocamento da franja de ordem zero ao longo da superfície, percorrendo todos os pontos em que a amplitude do movimento é igual à da modulação, isto é, $|a_o(x,y)|=|a_r|$. Embora um movimento sinusoidal

fique perfeitamente definido a partir do conhecimento de duas situações desfasadas de π ($\varnothing$ e $\varnothing+\pi$), a utilidade desta técnica revela-se na medição de deslocamentos de grande amplitude. Controlando com rigor a amplitude e fase da referência em MSF, é possível aumentar a gama de medida de um sistema de ESPI convencional até amplitudes da ordem de $100\ J_0^2$ [40].

Fixando o valor da fase da modulação $\varnothing_r$ e variando a amplitude entre 0 e o valor máximo do deslocamento do objecto, a franja de ordem zero percorrerá todas as áreas da superfície que se deslocam em fase com a referência, pontos em que $\varnothing(x,y)=\varnothing_r$. Efectuando vários varrimentos na gama de amplitudes com incrementos de fase de $\Delta\varnothing_r$ podem ser obtidos mapas de fase da vibração. A precisão da medida de fase assim obtida depende da amplitude da vibração, crescendo com o aumento desta. Para grandes amplitudes de vibração, a franja de ordem zero fica praticamente reduzida a uma linha, aumentando assim o rigor da medida.

Para obter uma variação contínua da fase, a frequência da modulação deverá ser ligeiramente diferente (0.5 a 10 Hz) da frequência utilizada para excitar o objecto. Com este artifício consegue-se um batimento entre ambas as frequências, obtendo no monitor uma imagem do objecto a deslocar-se com uma frequência igual à diferença entre as duas. É assim possível uma análise qualitativa do modo de vibração, identificando em tempo real quais as zonas que se deslocam em fase.

A MSF pode ainda ser utilizada para aumentar a resolução da medida. Høgmoen *et al* [41] desenvolveram uma técnica que, utilizando MSF sem qualquer mecanismo de estabilização das franjas, permite detectar vibrações com amplitudes de 20 Å com observação visual ou 0.1 Å utilizando técnicas de detecção por *lock-in* .

Nesta técnica o espelho utilizado na modulação de fase é posto a vibrar à frequência do objecto e com uma amplitude bem definida. A amplitude do movimento é ajustada por forma a situar o ponto de funcionamento, ver figura 5.14, sensivelmente a meio da gama linear da função $J_0^2(4\pi a_0/\lambda)$. Se a frequência da MSF for alterada para uma frequência ligeiramente diferente da utilizada na excitação do objecto, será observado o batimento já descrito. Este fenómeno permitirá detectar visualmente vibrações de pequena amplitude, pela oscilação periódica da intensidade do *speckle* nas zonas do objecto em movimento.

Para a detecção de movimentos com amplitudes da ordem do Å é utilizada a detecção síncrona com *lock-in* [43]. Sobre a superfície do monitor é colocado um fotodetector cuja área deverá ser tal que inclua vários *speckles*. Pretende-se assim

obter o valor médio da intensidade para essa área, evitando a influência das variações aleatórias de intensidade próprias dos padrões de *speckle*. A abertura do sistema óptico e a sua ampliação deverão ser ajustados por forma a que a área do detector traduza a informação correspondente ao ponto do objecto que se pretende estudar. O sinal proveniente do detector consiste em picos devidos ao varrimento *video*, cuja amplitude é modulada pelo batimento introduzido com a MSF. Se o sinal assim obtido for amplificado com um amplificador de *lock-in*, utilizando como referência a frequência do batimento, é possível, com tempos de integração elevados e dada a reduzida largura de banda destes amplificadores, detectar sinais de fraca amplitude. Com esta montagem Høgmoen declarou ter efectuado a detecção de vibrações com amplitudes inferiores a um Angstrom Å [41].

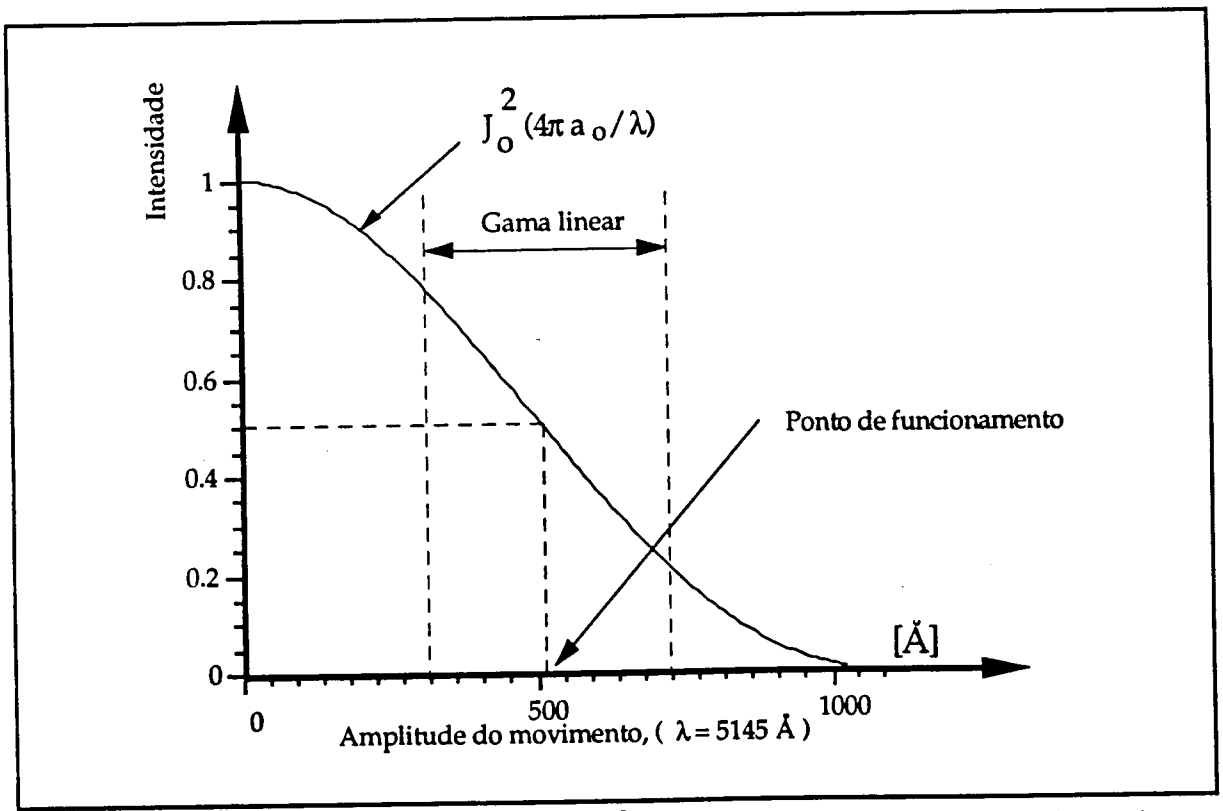


Figura 5.14 Intensidade da função moduladora $J_o^2(4\pi a_o/\lambda)$ em função da amplitude do movimento sinusoidal. O ponto de funcionamento dentro da zona de proporcionalidade é obtido por MSF.

De referir que esta técnica é também utilizada em Holografia interferométrica para, com a detecção por *lock-in*, aumentar a resolução da

medida. Nesta técnica, que se encontra descrita no capitulo 3, são utilizados dois feixes sendo o batimento introduzido na frequência da luz.

5.2.4 Modulação de amplitude.

A modulação de amplitude pode ser obtida colocando um obturador no caminho percorrido pela luz ou por modulação directa da intensidade do *laser*. Enquanto o primeiro tipo de modulação pode ser obtido com *lasers* de emissão contínua, o segundo obriga a utilizar *lasers* pulsados que, embora mais dispendiosos, são mais eficientes em termos de utilização da energia disponível.

Admitindo que existe modulação simultânea de ambos os feixes e que a diferença de percurso entre eles é pequena, permitindo desprezar eventuais atrasos, as frentes de onda moduladas podem ser representadas por:

$$A_{o'}(t')=A(t'-t)A_o(t') \tag{5.19}$$

$$A_{r'}(t')=A(t'-t)A_r(t') \tag{5.20}$$

o índice o indica o feixe proveniente do objecto, r identifica o feixe de referência e a função A(t) modela ambos os feixes. A exposição utilizada para registar o termo portador de informação, termo resultante da correlação cruzada de ambos os feixes que tem vindo a ser designado por termo de intercorrelação, será determinada por:

$$E_{ro}(t)=\int_{-\infty}^{\infty} A_{r'}^{*}(t')\,A_{o'}(t')dt' \tag{5.21}$$

o sobreíndice * indica o conjugado da frente de onda de referência. Após substituição das expressões (5.19) e (5.20) em (5.21) obtém-se:

$$E_{ro}(t)=\int_{-\infty}^{\infty} \left|A(t-t')\right|^2 A_r^{*}(t')\,A_o(t')dt' \tag{5.22}$$

$$E_{ro}(t)=S(t)*[A_r^*(t)A_o(t)] \tag{5.23}$$

Nesta expressão, $S(t)=|A(t)|^2$ representa a função obturação e * indica a correlação cruzada. Calculando a transformada de Fourier de (5.23) obtém-se [38]:

$$e_{ro}(f)=s^*(f)\,\chi(f) \tag{5.24}$$

em que

$$\chi(f)=u_r^*(f)*u_o(f) \tag{5.25}$$

representa o espectro do termo de intercorrelação. A função s*(f) descreve a acção de filtragem da obturação sobre o espectro $\chi(f)$. Como S(t) é o quadrado de um módulo, é sempre real. Contudo, a sua transformada s(f) é geralmente complexa. Se a função S(t) além de real for simétrica, a sua transformada também será real e simétrica. Uma função obturação muito utilizada em aplicações estáticas é a função $S(t) = |\mathrm{rect}(t/T)|^2$, em que T é o tempo de exposição.

Se o feixe for modulado em amplitude com impulsos igualmente espaçados, cuja forma normalizada é definida por H(t), a função S(t) será definida por:

$$S(t)=\left(\frac{1}{T_1T_2}\right)\sum_{-\infty}^{\infty}H\left[\left(\frac{1}{T_1}\right)(t-nT_2)\right]\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \tag{5.26}$$

O significado das variáveis presentes nesta equação torna-se evidente na figura 5.15, onde se representa graficamente a função S(t) com impulsos H(t) rectangulares

Nas situações práticas correntes T_1 é menor que T_2 e muito inferior a T. Logo, fazendo o intervalo de tempo $T \to \infty$ e utilizando a relação

$$\lim_{T\to\infty} T\,\mathrm{sinc}(Tf)=\delta(f) \tag{5.27}$$

obtém-se [38]

$$E_{ro}=\sum_{n=-\infty}^{\infty}h^*\left(\frac{nT_1}{T_2}\right)\chi\left(\frac{n}{T_2}\right) \tag{5.28}$$

Nestas condições, a exposição é uma soma ponderada das várias amostragens efectuadas no espectro do termo de intercorrelação. Os vários pesos associados às diferentes parcelas do somatório tendem para um valor constante à medida que se reduz a duração dos impulsos. Assim sendo, se $1/T_1\ H(t/T_1) \rightarrow \delta(t)$ com $T_1 \rightarrow 0$, $h(T_1 f) \rightarrow 1$ e

$$E_{ro} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \chi\left(\frac{n}{T_2}\right) \qquad (5.29)$$

pelo que se pode considerar que a exposição obtida para uma longa série de impulsos curtos é a soma das amostragens efectuadas no espectro da correlação cruzada.

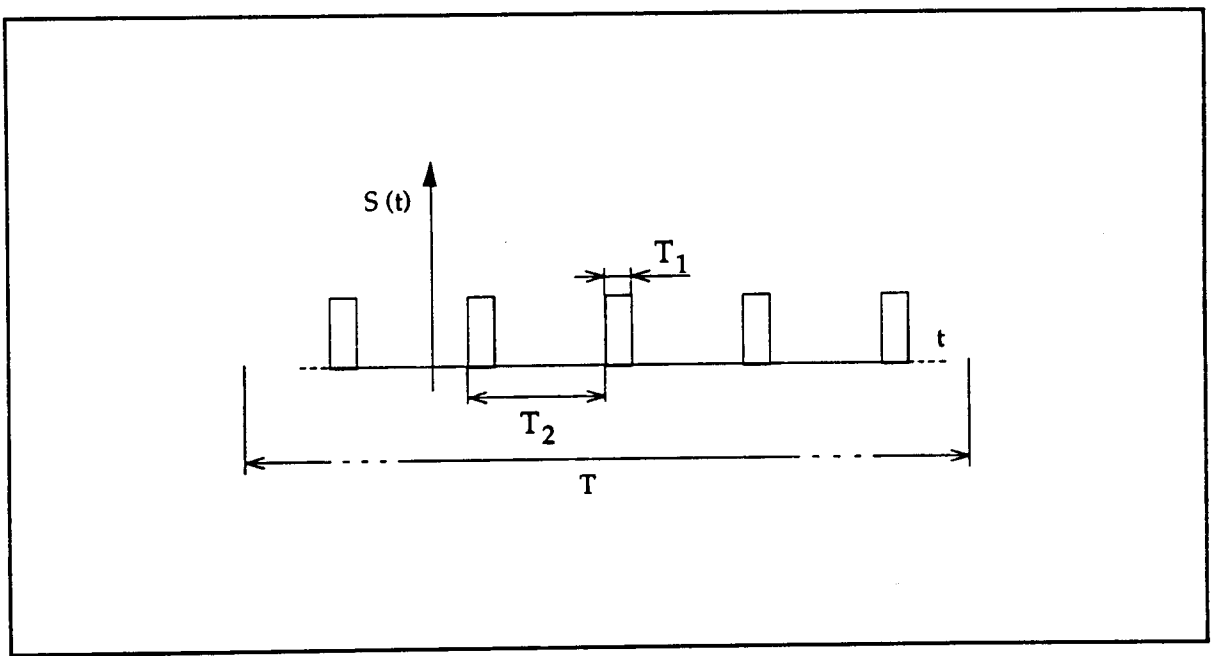


Figura 5.15 Função obturação para uma sequência de impulsos rectangulares de largura T_1 com período de ocorrência T_2 durante o intervalo de tempo T.

Se a modulação de amplitude for utilizada sobre um objecto que vibra com frequência F o termo de intercorrelação, devido à modulação de fase introduzida pelo movimento, tem um espectro que pode ser representado por:

$$a_o(f)=\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right)\exp(in\phi_o)\delta(f-nF) \qquad (5.30)$$

Nesta expressão J_n representa a função de Bessel de ordem n e a_o e ϕ_o são, respectivamente, a amplitude e a fase do movimento do objecto. Utilizando uma frequência de amostragem múltipla inteira da frequência de vibração do objecto e fazendo a substituição $T_2=q/T$, sendo q um inteiro, obtém-se de (5.29):

$$E_{ro}=\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{nq}\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right)\exp(inq\phi_o) \qquad (5.31)$$

A equação (5.31) descreve a exposição para um registo com modulação de amplitude de um objecto em vibração. Esta equação tem várias soluções, dependendo do valor de q. Se q=1 o movimento será amostrado uma vez em cada período, pelo que:

$$|E_{ro}|^2=\left|\exp\left(i\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right)\sin\phi_o\right)\right|^2=1 \qquad (5.32)$$

A esta solução não correspondem franjas de interferência. Se forem recolhidas duas amostras por período, o que corresponde a considerar q=2, (5.31) será alterada para:

$$|E_{ro}|^2=\left|\cos\left(\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right)\sin\phi_o\right)\right|^2=\frac{1}{2}\left[1-\cos\left(2\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right)\sin\phi_o\right)\right] \qquad (5.33)$$

Esta expressão representa um padrão de franjas cuja frequência espacial é determinada pela diferença de fase entre as duas amostragens do movimento ϕ_o. Se for efectuado um elevado número de amostragens durante o período do movimento, $q\rightarrow\infty$ e obtém-se

$$|E_{ro}|^2\rightarrow J_o^2\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right) \qquad (5.34)$$

cujo resultado tende para o correspondente ao registo em tempo médio.

As técnicas de modulação de amplitude podem ser utilizadas para estudar fenómenos dinâmicos quer em Holografia quer em ESPI. A obturação do feixe, que pode verificar-se uma ou mais vezes em cada ciclo de vibração, deverá ser síncrona com o movimento em estudo. Normalmente o objecto é iluminado duas vezes em cada período do movimento, em intervalos de tempo bastante curtos. O controlo do tempo entre impulsos permite efectuar medições relativas entre as diversas situações do movimento. Ao reduzir os tempos de iluminação evita-se que a modulação de fase provocada pelo movimento do objecto contribua para o padrão de interferência, obtendo registos onde a intensidade varia linearmente com a fase.

5.2.4.1 Modulação de amplitude com *lasers* de emissão contínua.

Quando as técnicas referidas no parágrafo anterior são aplicadas com *lasers* de emissão contínua, os tempos de exposição são relativamente longos e resultam de uma combinação de vários factores tais como: a potência disponível, a transmissibilidade/reflectividade do objecto e a sensibilidade do meio de registo utilizado para gravação dos padrões de interferência. Com tempos de exposição da ordem dos milisegundos, mantêm-se as restrições associadas à estabilidade das montagens ópticas e os padrões de franjas, embora parcialmente, conservam as caracteristícas dos registos em tempo médio. A fraca eficiência energética obtida com os *lasers* de emissão contínua operando em modulação de amplitude não permite que fenómenos muito rápidos ou em condições de instabilidade possam ser estudados. Deve lembrar-se que o caminho da luz está obstruido durante a maior parte do tempo.

Tratando-se de fenómenos periódicos, é possível amostrá-los sincronamente em duas situações distintas de um mesmo ciclo, como se representa na figura 5.16. Neste tipo de fenómenos a determinação da variação de amplitude ao longo do período é efectuada variando o atraso do segundo impulso, T_3 na figura 5.16. Fenómenos não periódicos, mas que não tendo caractér destrutivo possam ser repetidos ciclicamente, podem também ser estudados desta forma.

Em montagens envolvendo *lasers* de emissão contínua é possível obter a energia necessária à activação do meio de registo, fazendo T corresponder a vários períodos do movimento e mantendo todos os outros tempos constantes. Neste

caso, em termos de estabilidade, mantêm-se todas as limitações associadas à gravação de um holograma de um objecto estático, acrescidas de possíveis erros na colocação dos impulsos. A aplicação da modulação de amplitude nesta situação tem como vantagem principal a obtenção de padrões de interferência cuja intensidade é descrita por uma função cosseno.

A utilização desta técnica associada ao registo electrónico dos padrões de interferência é vulgarmente designada por ESPI estroboscópico [44]. Embora também possam ser utilizadas câmeras integradoras, esta técnica é normalmente utilizada com a frequência normal do *video* (25 imagens/s no sistema europeu). Em cada amostragem *video* sobrepõem-se uma ou mais amostragens duplas efectuadas sincronamente em cada período do movimento, sendo a correlação obtida por adição. Com um sistema de ESPI operando desta forma é possível obter padrões de franjas em situações envolvendo alguma instabilidade. Løkberg *et al* [45], utilizando um sistema que operava nestas condições, obteve padrões de interferência de objectos em vibração suportados livremente nas mãos de um dos operadores.

A correlação por subtracção implica normalmente a utilização de imagens recolhidas em ciclos de movimento diferentes, pelo que aumenta a sensibilidade a instabilidades.

A obtenção de um feixe modulado em amplitude a partir de um feixe contínuo implica a utilização de dispositivos que, variando a amplitude do feixe, possam ser sincronizados com a vibração do objecto e respondam às frequências utilizadas na sua excitação. Os dispositivos mais utilizados para este efeito são: os moduladores acusto-ópticos, os moduladores electro-ópticos e os "*choppers*".

Nos moduladores acusto-ópticos são utilizadas ondas ultrasónicas para alterar as propriedades ópticas de um meio transparente e assim introduzir modulação num feixe de luz que o percorra segundo um determinado ângulo. O feixe é separado espacialmente em várias ordens de difracção, às quais correspondem também alterações de frequência múltiplas inteiras da frequência do sinal acústico. Normalmente é utilizada a primeira ordem de difracção que, além da modulação, possui uma alteração da frequência igual a mais ou menos a frequência de excitação do meio (1 a 100 MHz) [37]. O principal inconveniente deste método é que só parte do feixe inicial é aproveitado.

A modulação de amplitude com cristais electro-ópticos baseia-se no aproveitamento do efeito de Pockels. Descoberto por F. Pockels em 1893 este efeito consiste numa propriedade que determinados materiais transparentes possuem de alterarem a sua birrefringência por aplicação de uma tensão eléctrica. A

colocação de uma célula de Pockels entre dois polarizadores planos de eixos cruzados permite construir moduladores de amplitude com respostas em frequência até 10^{10} Hz. O elevado preço destes moduladores é o principal inconveniente à sua utilização.

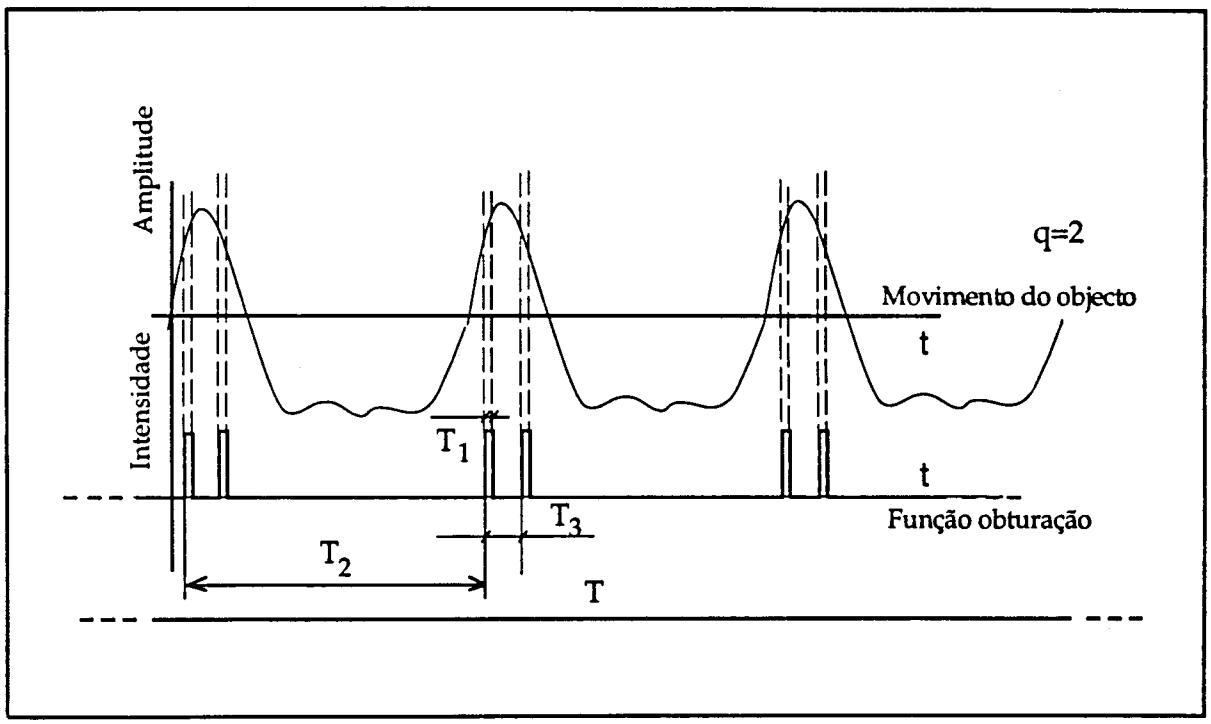


Figura 5.16 Amostragem síncrona de um fenómeno periódico.

Por último, os "*choppers*" consistem em discos ranhurados que são montados concêntricos no veio de um motor síncrono. A rotação do motor pode ser controlada com rigor e a utilização de um díodo e de um fotodetector, montados em frente à zona do disco que faz a obturação do feixe, permite obter um sinal para sincronizar o movimento do objecto. Sendo a solução menos dispendiosa, é também a mais limitada em termos de resposta.

5.2.4.2 Modulação de amplitude com *lasers* de impulsos.

Os *lasers* de impulsos emitem quantidades elevadas de energia em intervalos de tempo relativamente curtos (da ordem dos nanosegundos, e até inferiores) estando, por isso, melhor adaptados para aplicações em modulação de

amplitude. A possibilidade de, com estes *lasers*, obter pares de impulsos cuja duração e espaçamento podem ser controlados permite a sua utilização na análise de fenómenos que se desenvolvam a elevada velocidade, quer tenham ou não carácter repetitivo. Efectuando registos de dupla exposição em Holografia convencional, associados a câmeras de alta velocidade [46] ou integrados em sistemas de ESPI, podem ainda ser utilizados para estudar fenómenos que impliquem movimentos de grande amplitude .

O *laser* de rubi, primeira emissão *laser* obtida, foi o primeiro a ser utilizado na obtenção de registos interferométricos em Holografia pulsada. Neste *laser*, um cristal de safira (Al_2O_3) onde parte dos iões Al^{3+} foi substituida por Cr^{3+}, alinhado com o eixo de uma cavidade óptica ressonante é excitado ópticamente por meio de potentes lâmpadas de *flash*.

O ganho da cavidade ressonante é controlado por meio de um obturador colocado no seu eixo. Como se pretendem tempos de comutação rápidos, os obturadores normalmente utilizadas consistem em células de Pockels que, combinadas com polarizadores, introduzem elevadas perdas na cavidade óptica ressonante, evitando a oscilação do *laser*. Se durante um ciclo de excitação, após o tempo necessário para se verificar a inversão de população do meio emissor, a célula for comutada aumentando bruscamente o ganho da cavidade óptica, obter-se-á um impulso de radiação monocromática e coerente cujo comprimento de onda é λ=0.6943 μm.

O funcionamento em duplo impulso pode ser obtido comutando duas vezes a célula de Pockels durante o mesmo ciclo de *flash*. A duração dos impulsos pode ser controlada pelo sinal de comutação aplicado na célula e é normalmente da ordem dos 20-30ns. O tempo entre impulsos tem um valor mínimo condicionado pela recuperação energética do cristal, e um tempo máximo que depende da duração do ciclo do *flash* (duração do ciclo de flash 0.5-1.0 ms, *laser* de rubi HLS-4 Lumonics [12]).

As dificuldades na sincronização do disparo e a instabilidade nos modos de funcionamento (nem sempre a emissão se faz em TEM_{oo} como sería desejável) não foram obstáculos á sua divulgação para este tipo de aplicação, tendo sido desenvolvidas várias soluções para melhorar o desempenho. As elevadas quantidades de energia presentes em cada impulso permitiram que pela primeira vez se gravassem hologramas em situações de grande instabilidade, como por exemplo a gravação de hologramas de seres vivos [47] (100mJ por impulso com duração de 40ns).

Uma limitação importante deste *laser* é não poder ser utilizado com uma frequência de emissão superior a ≈ 4Hz, pelo que é necessário um *laser* de emissão contínua (normalmente um pequeno *laser* de He-Ne) alinhado com o eixo da cavidade para efectuar as operações de alinhamento das montagens ópticas. A utilização do registo electrónico, ESPI pulsado [48] [49], fica também prejudicada pelo facto de não ser possível visualizar os padrões de interferência em tempo real .

Os *laser* de Nd:YAG, em que o meio óptico activo é constituído por um cristal de *Yttrium Aluminum Garnet* ($Y_3Al_5O_{15}$), onde alguns iões de *yttrium* são substituídos por iões de Nd^{3+} [10], embora de construção e funcionamento semelhantes aos *lasers* de rubi, exigem energias de excitação inferiores e podem ser operados com frequências de emissão bastante mais elevadas. Disparado uma vez em cada ciclo de *flash*, podem produzir impulsos cuja energia varia entre 0.01J e 100J, a uma frequência que pode ir até aos 300Hz [50]. Embora a emissão *laser* se verifique no infravermelho (a emissão mais intensa tem um comprimento de onda λ=1.064 μm) a utilização de cristais não lineares como geradores de segundo harmónico permitem obter radiação visível com λ=0.532 μm.

Utilizando um *laser* de Nd:YAG como fonte de iluminação é possível construir sistemas interferométricos de registo electrónico com possibilidade de visualização dos padrões de interferência em tempo real [51],[52]. Estes sistemas são vulgarmente designados por ESPI pulsado e são em tudo semelhantes aos sistemas de ESPI convencionais, embora a utilização deste tipo de *lasers* imponha alguns cuidados devidos às elevadas densidades de energia presentes em cada impulso. Na figura 5.17 representa-se um diagrama temporal de um *laser* de Nd:YAG operado por forma a obter um par de impulsos em cada ciclo de *flash*.

Analisando a variação da energia acumulada no cristal de Nd:YAG, verifica-se que a separação entre impulsos tem um limite inferior e um limite superior, que neste *laser* são respectivamente 20 e 400 μs. Além desta limitação, a utilização em duplo impulso implica também alguma instabilidade entre impulsos, que se manifesta quer na colocação espacial dos impulsos quer na variação aleatória da sua intensidade média [52]. As limitações no intervalo de tempo entre impulsos condicionam as velocidades máxima e mínima dos fenómenos a estudar, e as instabilidades entre impulsos degradam o contraste dos padrões de interferência obtidos.

A associação de uma cavidade ressonante em anel [10], onde se pode gerar um feixe que se propaga sempre no mesmo sentido, com díodos de emissão

monocromática e coerente, permitiu construir sistemas *laser* de grande estabilidade emitindo em larguras de banda muito apertadas. Um sistema deste tipo construído pela LIGHTWAVE emite radiação infravermelha (λ=1.064 μm) com uma largura de banda de 10KHz e uma potência ligeiramente superior a 1 mW.

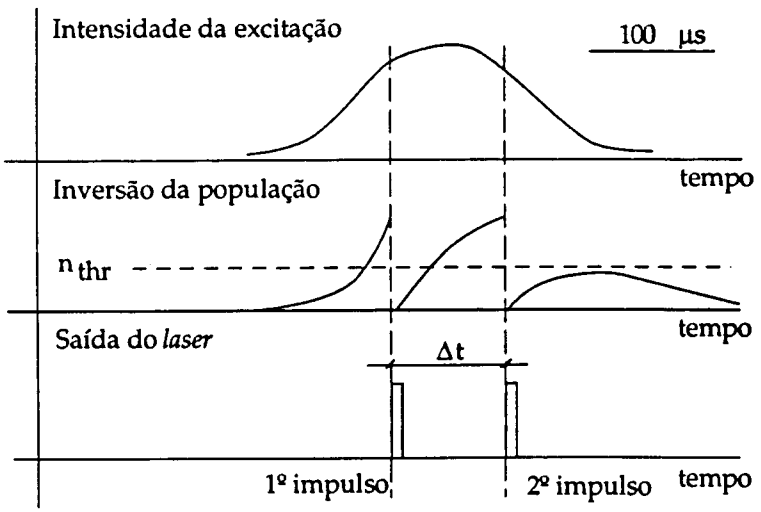


Figura 5.17 Diagrama temporal de um *laser* de Nd:YAG operado em duplo impulso; n_{thr} limiar energético para inversão da população do meio *laser* [51].

O apertado controlo que pode ser exercido sobre a frequência de emissão destes *lasers* é aproveitado para obter um feixe que, injectado na cavidade de um *laser* de Nd:YAG durante o tempo de abertura da célula de Pockels, garante o seu funcionamento monomodo. Esta operação é conhecida pela designação anglo-saxónica de *injection seeding* e consiste em substituir a emissão espontanêa de fundo que dá inicio à emissão *laser* por um feixe axial de frequência conhecida, vulgarmente designado por *seeder*. Este artifício, associado a sistemas electrónicos de controlo da frequência de ressonância da cavidade, permite reduzir a largura da banda de emissão do *laser* e aumentar assim o seu comprimento de coerência de, pelo menos, duas ordens de grandeza.

A utilização do *seeder* como *master* associado ao controlo automático da frequência de ressonância das cavidades ópticas permitiu construir sistemas duplos onde dois *lasers* de Nd:YAG (os *slaves*) emitem com a mesma frequência. A utilização de sistemas duplos, embora implique um custo bastante mais elevado, tem contudo algumas vantagens:

- cada cavidade pode ser operada em simples impulso na sua zona de maior eficiência, longe do limiar de emissão, garantindo assim uma maior estabilidade entre impulsos;

- ao utilizar dois *lasers* independentes, evitam-se as limitações temporais entre impulsos impostas pela recuperação do meio óptico emissor, sendo possíveis tempos de separação superiores a 1ms;

- variando a polarização de um dos *lasers* é possível separar espacialmente ambos os impulsos, o que permite gravar hologramas com dupla referência da forma elegante que se descreveu no capitulo 3 [53].

O grupo de Óptica e Mecânica Experimental do DEMEGI adquiriu recentemente um destes *lasers*, pelo que se prevê para um futuro próximo a sua utilização neste tipo de técnicas e no desenvolvimento de novas aplicações.

Referências.

[1] Hariaran, P.; "Optical Holography-Principles, techniques and applications"; Cambridge University Press, Cambridge, 1984.

[2] Smith, H.M. (editor); "Holographic Recording Materials"; Springer-Verlag ; Berlin, 1977.

[3] Weber, A. M. ; Smothers, W. K.; Trout, T.J.; Mickish, D.J.; "Hologram Recording in Du Pont's New Photopolymer Materials", SPIE Proc. ; Vol. nº 1212, Practical Holography IV; pág. 30-38, 1990.

[4] Lage,A.L.V.S.; "Técnicas Ópticas na Análise de Fenómenos Dinâmicos", Tese de Doutoramento, Faculdade de Engª. da Universidade do Porto, 1987.

[5] Caulfield, H.J.; "Multiplexing Double Exposure Holographic Interferograms", Applied Optics, Vol. 11, nº 11, pág. 2711-2712, 1972.

[6] Kakunai, S.; Iwata, K.; Nagata, R.; Hasegawa, M.; "Multiple Apertura Holographic Interferometry and its Application to the Measurement of Plant Movement", Applied Optics, Vol. 25, nº 10; pág. 1638-1641, 1986.

[7] Wang, X.; Magnusson R.; Haji-Sheikh, A.; "Real-Time Interferometry with Photorefractive Reference Holograms", Applied Optics, Vol. 23, nº 11 , pág. 1983-1986.

[8] Løkberg, O.J.; Slettemoen G.Å.; "Basic Electronic Speckle Pattern Interferometry", Applied Optics and Optical Engineering, Vol X, Academic Press Inc.(Shannon, R.R.; Wyant, J.C. Ed.), pág. 455-504, 1987.

[9] Spooren, R.;"Pulsed Video Speckle Interferometry", Doktor Ingeniøravhandling 1992:52, Universitetet i Trondheim, Norges Teckniske Høgskole, (Tese de doutoramento), 1992.

[10] Koechner, W.; "Solid-State Laser Engineering", Springer-Verlag, 2 ª edição, Berlin, 1988.

[11] Lasers & Optronics, 1989- Buying Guide, Gordon Publication, Inc..

[12] Svensson, L.B.M.; "The Application of Interferometric Measurements with Double-Pulsed Holography, Light-in-Flight Holography, and Thermoplastic Sandwich Holography", Ph. D. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockolm, Suécia, 1988.

[13] Caulfield, H.J. ; "Multiplexing Double Exposure Holographic Interferograms", Applied Optics, Vol. 11, nº 11, pág. 2711-2712, 1972.

[14] Kakunai, S.; Iwata, K.; Nagata, R.; Hasegawa, M.; "Multiple Apertura Holographic Interferometry and its Application to the Measurement of Plant Movement", Applied Optics, Vol. 25, nº 10, pág. 1638-1641, 1986.

[15] Fry, P. W.; "Silicon Photodiode Arrays", Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 8,pág.337-349, 1975.

[16] Hinsch, K.; "Coherent Optical Metrology for Environmental Diagnostics", SPIE, Vol. 1524, "Bioptics- Optics in Biomedicine and Environmental Sciences2,(ed. Soares O.D.D.; Scheggi, A.M.) , University of Porto, Portugal, pág. 292-313, 1991.

[17] Løkberg, O.J.; Malmo, J.T.; Slettemoen, Å.; "Interferometric Measurements of High Temperature Objects by Electronic Speckle Pattern Interferometry", Applied Optics, Vol. 24, nº 19, pág. 3167-3172, 1985.

[18] Höfling, R.; Aswendt, P.; Totzauer, W.; Jüptner, W.; "DSPI: A Tool for Analysing Thermal Strain on Ceramic and Composite Materials", SPIE, Vol. 1508, "Industrial Applications of Holographic and Speckle Measuring Techniques", pág. 135-142, 1991.

[19] Powell, R.L., Stetson, K.A., "Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 55, nº 12, pág. 1593-1598, 1965.

[20] Butters, J.N.; "Electronic Speckle Pattern Interferometry: a General Review Background to Subsequent Papers"; The Engineering Uses of Coherent Optics ; (Robertson, E.R. ed.) , Cambridge University Press, Cambridge, pág. 155-169, 1976.

[21] Taub, H.; Schilling, D.L.; "Principles of Communication Systems ", McGraw-Hill Book Co., New York, ,1971.

[22] Goodman, J. W.; "Temporal Filtering Properties of Holograms", Applied Optics, Vol. 6, nº 5, pág. 857- 859, 1967.

[23] Jones, R.; Wykes, C.; "Holographic and Speckle Interferometry", Cambridge University Press, Cambridge, 1983.

[24] Nakadate, S.; Yatagai, T.; Saito, H.; "Digital Speckle-Pattern Shearing Interferometry", Applied Optics, Vol. 19, nº 24, pág. 4241-4246, 1980.

[25] Creath, K. ; Slettemoen, Å. G. ; "Vibration-Observation Techniques for Digital Speckle-Pattern Interferometry", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 2, nº 10, pág. 1629-1636, 1985.

[26] Løkberg, O.J.; Slettemoen G.Å.; "Basic Electronic Speckle Pattern Interferometry", Applied Optics and Optical Engineering, Vol X, Academic Press Inc.(Shannon, R.R.; Wyant, J.C. Ed.), pág. 455-504, 1987.

[27] Slettemoen, Å. G. ; "First-Order Statistics of Displayed Speckle Patterns in Electronic Speckle Pattern Interferometry", Journ. of the Opt. Soc. of America, Vol. 71, nº 4, pág. 474 -482, 1981.

[28] Goodman; J.W.; "Statistical Properties of Laser Speckle Patterns", in "Laser Speckle and Related Phenomena", Springer-Verlag,, Vol 9, London,(Dainty, J.C., Ed), 2ª Edição, pág. 9-75, 1984.

[29] Slettemoen, G. Å.;"Electronic Speckle Pattern Interferometric System Based on a Speckle Reference Beam", Applied Optics, Vol. 19, nº 4, pág. 616-623, 1980.

[30] Montgomery, P.C.; Berquist, B.D.; "Contrast Enhancement of ESPI Vibration Patterns by Speckle Averaging in a video Frame Store", Optics in Engineering Measurements,(Fagan, W.F.; Ed.), Proc. Soc. Photo-Opt. Instrumentation., Eng., pág. 201-206, 1985 .

[31] Joenathan, C.; Khorana, B.M.; "Contrast of the Vibration Fringes in Time-Averaged Electronic Speckle-Pattern Interferometry: Effect of Speckle Averaging", Applied Optics, Vol. 31, nº 11, pág. 1863-1870, 1992.

[32] Lu, B. ; Hu, Z.; Abendroth, H.; Eggers, H., Ziolkowski, E.; "Improvement of Time-Average Subtraction Technique Applied to Vibration Analysis with TV-Holography", Optics Communications, Vol. 78, nº 3,4, pág. 217-221, 1990.

[33] Vikhagen, E.; "Vibration Measurement Using Phase Shifting TV_Holography and Digital Image Processing", Optics Communications, Vol. 69, nº 3,4, Pág 214 - 218, 1989.

[34] Nakadate, S.; "Vibration Measurement Using Phase-Shifting Speckle-Pattern Interferometry", Applied Optics, Vol. 25, nº 22, pág. 4162-4167, 1986.

[35] Lu, B.; Yang, X.; Abendroth, H.; Eggers, H.; "Time-Average Subtraction Method in Electronic Speckle Pattern Interferometry", Optics Communications, Vol. 70, nº 3, pág. 177-180, 1989.

[36] Aleksoff, C. C.; "Time Average Holography Extended", Applied Physics Letters, Vol. 14, nº 1, pág. 23 - 24, 1969.

[37] Aleksoff, C. C.;"Temporal Modulation Techniques", in "Holographic Nondestructive Testing", (ed. Erf, R.K.), Academic Press, Inc., New York, 1974.

[38] Aleksoff, C. C.; "Temporally Modulated Holography", Applied Optics, Vol. 10, nº 6, pág. 1329 - 1341, 1971.

[39] Løkberg, O.J.; Høgmoen, K.; "Vibration Phase Mapping Using Electronic Speckle Pattern", Applied Optics, Vol. 15, nº 11, pág. 2701 - 2704, 1976.

[40] Løkberg, O.J.; Høgmoen, K.;"Use of Modulated Reference Wave in Electronic Speckle Pattern Interferometry", Journal of Physics E, 9, pág. 847- 851, 1976.

[41] Høgmoen, K.; Løkberg, O.J.; "Detection and Measurement of Small Vibrations Using Electronic Speckle Pattern Interferometry", Applied Optics, Vol. 16, nº 7, pág. 1869 - 1875, 1977.

[42] Neumann, D.B.; Jacobson, C.F.; Brown, G.M.;"Holographic Technique for Determining the Phase of Vibrating Objects", Applied Optics, Vol. 9, nº 6, pág. 1357- 1362, 1970.

[43] Meada, M.L.;"Lock-in Amplifiers principles and applications", IEE Electrical Measurement Series 1,Pub. Peter Peregrinus Ltd., Londres UK, 1983 .

[44] Pedersen, H.M.; Løkberg, O.J.; Førre, B.M.; "Holographic Vibration Measurement Using a TV Speckle Interferometer with Silicon Target Vidicon", Optics Communication , Vol. 12, nº 4, pág. 421-426, 1974.

[45] Løkberg, O.J.;"Use of Chopped Laser Light in Electronic Speckle Pattern Interferometry", Applied Optics, Vol.18, nº 14, pág. 2377-2384, 1979.

[46] Deason, V.A.; Epstein, J.S.; "High Pulse Rate Interferometry Using a Ruby Laser and a Cordin Model 330A Camera", Optics and Lasers in Engineering , 19, pág. 161-170, 1993.

[47] Siebert, L.D.;"Front-Lighted Pulse Laser Holography",Applied Physics Letters, 11,pág. 326-328, 1967.

[48] Hughes, R.G.;"The Determination of Vibration Patterns Using a Pulsed Laser with Holographic and Electronic Speckle Pattern Interferometry Techniques", Proc. de "The Engineering Uses of Coherent Optics", 8- 11 Abril 1975, Strathclyde, Glasgow, pág. 199-218, 1975.

[49] Cookson,T.J.; Butters, J.N.; Pollard, H.C.,"Pulsed Lasers in Electronic Speckle Pattern Interferometry", Optics and Laser Technology, pág. 119-124, 1978.

[50] Wilson,J.; Hawkes, J.F.B.,"Lasers Principles and Applications", Prentice Hall, International Series in Optoelectronics, New York, 1987.

[51] Santoyo, F. M.; Shellabear, M.C.; Tyrer, J.R.;"Whole Field in-Plane Vibration Analysis Using Pulsed Phase-Stepped ESPI", Applied Optics, Vol. 30, nº 7, pág. 717-721, 1991.

[52] Spooren, R.;"Double-Pulse Characteristics of a Single - Oscilator Nd:YAG Laser Affecting its Performance in TV Holography", Applied Optics, vol. 31, pág. 208-216, 1992.

[53] Crawforth, L.; Lee, C.-K.; Munce, A.C.; "Application of Pulsed Laser Holographic Interferometry to the Study of Magnetic Disk Drive Component Motions", Proc. da SEM , Hologram Interferometry and Speckle Metrology, Baltimore, 5/8 Nov. 1990, pág. 404-412, 1990.

[54] Lin, Y.; Hu, K.; Wu, J.; "Rotating Prism Multiplex Holography and its Application", Optical Engineering, Vol. 33, nº 1, pág. 209-212, 1994.

CAPÍTULO 6

6. TÉCNICAS HÍBRIDAS

6.1 Introdução

6.2 Técnicas numéricas de análise de tensões

6.2.1 Método das diferenças finitas
6.2.2 Métodos Semi-Analíticos
6.2.3 Método dos Elementos Finitos
6.2.4 Formulação Estática do Problema de Elementos Finitos
6.2.5 Formulação Dinâmica do Problema de Elementos Finitos

6.3 Técnicas híbridas em Mecânica dos sólidos

6.3.1 Modelação das condições de fronteira e do carregamento
6.3.2 Técnicas de subestruturação
6.3.3 Obtenção directa do campo de deslocamentos

6.3.3.1 Obtenção dos deslocamentos a partir de medições discretas sobre registos interferométricos
6.3.3.2 Interpolação de medições discretas apresentando ruído
6.3.3.3 Obtenção do campo de deslocamentos a partir de medições contínuas

Referências

CAPÍTULO 6

6. TÉCNICAS HÍBRIDAS.

6.1 Introdução.

Os meios de cálculo disponíveis são hoje extremamente potentes e acessíveis à maior parte dos investigadores. Desta forma é possível utilizá-los na obtenção de soluções numéricas para grande parte dos problemas de engenharia. As soluções numéricas obtidas são soluções aproximadas, baseadas em modelos matemáticos que, tendo em atenção as condições de fronteira e carregamento, são ajustados a cada aplicação.

As técnicas experimentais foram também beneficiadas pelo desenvolvimento e divulgação dos microcomputadores e do mais variado *hardware* como são, por exemplo: as placas de aquisição de dados, as placas de aquisição e processamento de imagem, os detectores fotossensíveis de imagem, etc. Estes equipamentos vieram contribuir, quer para o desenvolvimento de novas técnicas experimentais, quer para a análise de resultados obtidos por técnicas já conhecidas.

A necessidade de validar novos modelos numéricos ou controlar a aplicação de soluções numéricas conhecidas sugeriu a utilização conjunta das técnicas numéricas e das técnicas experimentais, criando-se assim um conjunto de técnicas mistas normalmente designadas por híbridas. Aqui é utilizado o intercâmbio de valores entre as técnicas numéricas e experimentais aplicadas ao mesmo problema com vista a aumentar o rigor e eficácia das soluções obtidas.

A associação de sistemas de processamento e aquisição de imagem às técnicas interferométricas com modulação de fase permitiu desenvolver sistemas de medida quantitativa de deslocamentos. Deste modo é possível obter, sobre a forma de ficheiros numéricos, a distribuição dos deslocamentos na superfície de protótipos. Os ficheiros obtidos podem ser utilizados depois em programas gráficos de análise de resultados, ou constituirem a entrada para programas numéricos de cálculo de tensões.

6.2 Técnicas numéricas de análise de tensões.

Na análise de deformações de sólidos seguindo leis lineares em regime elástico o estado de tensão é caracterizado pelo estabelecimento de um conjunto de relações diferenciais que definem condições de equilibrio e alterações geométricas de um elemento de volume infinitesimal. A solução referente ao estado de tensão de um sólido de dimensões finitas e forma mais ou menos complexa passa inevitavelmente pela integração de um sistema de equações diferenciais que envolve as relações de equilibrio e alterações geométricas anteriormente mencionadas. Tal tarefa é na grande parte dos casos fastidiosa, estando praticamente fora de questão ser possível obter uma solução sob a forma de uma expressão analítica mais ou menos simples, que caracterize o estado de tensão ou deformação em todos os pontos do corpo.

Com o crescente desenvolvimento dos sistemas computacionais, torna-se muito mais eficaz e atractivo lançar mão de aproximações numéricas que garantam convergência para a solução exacta. Tal objectivo é conseguido à custa do aumento das dimensões do problema, ou seja, numa perspectiva puramente matemática, do número de incógnitas. Contudo, a escolha judiciosa da discretização do problema pode significar uma boa solução , isto é, muito próxima do resultado exacto, a partir de um número relativamente baixo de incógnitas.

Na análise de deformações em sólidos, a energia de deformação envolvida no processo de carregamento obedece a um princípio variacional natural, em que a estrutura em causa se acomoda sempre a uma configuração que corresponde a um minímo para a sua energia de deformação. Tal facto é enunciável pelo teorema de Menabrea: *quando um corpo está em equilibrio elástico sob a acção de um certo sistema de forças exteriores, produz-se nele um estado de tensão que,*

entre todos os capazes de satisfazer as condições de equilibrio, é aquele que torna mínima a expressão do trabalho interno de deformação [1].

O Cálculo das Variações aplicado á Mecânica dos Sólidos permite que três métodos de grande difusão constituam eficientes ferramentas para a análise de tensões:

1. O Método das Diferenças Finitas (MDF).
2. Aproximação Semi-analítica (por séries de Fourier) (ASA).
3. Método dos Elementos Finitos (MEF).

Qualquer dos métodos acima referidos conduz a soluções aproximadas, contudo convergentes para o resultado exacto.

6.2.1 Método das diferenças finitas.

O método das diferenças finitas é uma técnica numérica de integração de sistemas de equações de derivadas parciais, como é o caso particular das equações da elasticidade. Este método é utilizado sempre que as condições de fronteira, quer pela sua geometria quer pelas situações de apoio do sólido, impossibilitam uma solução analitíca simples. Não há uma data precisa quanto à primeira utilização deste método, contudo deverá ter sido Runge [2] o primeiro investigador a utilizar esta técnica na solução de problemas de torção. Esta consistiu basicamente em reduzir um sistema de equações diferenciais a um sistema de equações algébricas, passando a considerar as derivadas como razões entre diferenças incrementais finitas.

O MDF tem grande difusão em problemas que envolvam o uso de uma função potencial, como é o caso do estudo da torção em barras, propagação do calor e Mecânica dos Fluídos. Na análise de fenómenos dinâmicos rápidos, como por exemplo a propagação de ondas de tensão, a adopção deste método conduz a uma solução extremamente simples e de resultados precisos, desde que sejam introduzidos parâmetros imprescindíveis à estabilidade e convergência do processo, que se revela crítico no estudo de fenómenos transitórios. Em problemas envolvendo aproximações de primeira ordem, a convergência do

MDF deve seguir o critério de Crank-Nicholson, em que um parâmetro $\theta = 1/2$, na expressão iterativa generalizada torna o processo incondicionalmente estável e convergente [3]:

$$[A]\{C\}_{n+1}=[A]\{C\}_n+\theta\Delta t_{n+1}\left(\{P\}_{n+1}-[B]\{C\}_{n+1}\right) \qquad (6.1)$$

A expressão (6.1) refere-se à equação diferencial :

$$[A]\left\{\dot{C}\right\}+[B]\{C\}=\{P\} \qquad (6.2)$$

onde {C} representa o vector das incógnitas do problema e as matrizes [A], [B] e o vector do segundo membro {P} são conhecidos *à priori*. A equação (6.2) traduz vários fenómenos transitórios de 1ª ordem, como por exemplo uma distribuição de temperaturas em regime transitório num meio contínuo.

Em problemas dinâmicos o equilibrio de um sólido discretizado em elementos de massa é traduzido pela equação diferencial de 2ª ordem [4] :

$$[K]\tilde{U}+[C]\dot{\tilde{U}}+[M]\ddot{\tilde{U}}=\tilde{F} \qquad (6.3)$$

onde $\tilde{U}$ é o vector deslocamento, [K] é a matriz de rigidez, [C] a matriz de amortecimento e [M] é a matriz de massa. Esta relação matricial permite caracterizar a forma de uma estrutura no tempo quando sujeita a perturbações dele dependentes. A análise de fenómenos transitórios rápidos, tal como é o caso da propagação de ondas de tensão, encontra no MDF uma técnica eficaz e de fácil estruturação em programas de cálculo automático. O procedimento iterativo em termos de diferenças finitas de 2ª ordem resume-se à utilização recursiva da seguinte equação [4], [5] e [6]:

$$\left\{\frac{1}{\Delta t^2}[M]+\frac{1}{2\Delta t}[C]\right\}U_{t+\Delta t}=F_t-\left\{[K]+\frac{2}{\Delta t^2}[M]\right\}U_t-\left\{\frac{1}{\Delta t^2}[M]-\frac{1}{2\Delta t}[C]\right\}U_{t-\Delta t} \qquad (6.4)$$

onde [M], [C], e [K] são, respectivamente, a matriz de massa do tipo concentrada nos nós (*lumped mass matrix*), a matriz de amortecimento e a matriz de rigidez da estrutura discretizada.

A determinação de $U_{t+\Delta t}$ em (6.4), quando não é considerada a existência de amortecimento, é extremamente simples, uma vez que não há lugar à resolução de um sistema de equações, pois a matriz [M] é diagonal.

Contudo, este método é extremamente crítico nestas aplicações, uma vez que os incrementos de tempo devem obedecer a valores muito próximos dos que são dados pela razão entre o passo da malha e a velocidade do som na estrutura em estudo [5], [6], [7] e [8]. Num exemplo muito simples, como é o caso da propagação de uma onda de tensão uniaxial numa barra de secção constante, Figura 6.1 , o intervalo Δt deve ser igual à seguinte razão $\Delta t = l_e/c$, onde $c=(E/\rho)^{1/2}$. Sendo E e ρ, respectivamente, o módulo de Young e a massa específica do material, Δt o passo temporal de integração, c a velocidade de propagação da onda de tensão ao longo da barra e l_e o comprimento do elemento e.

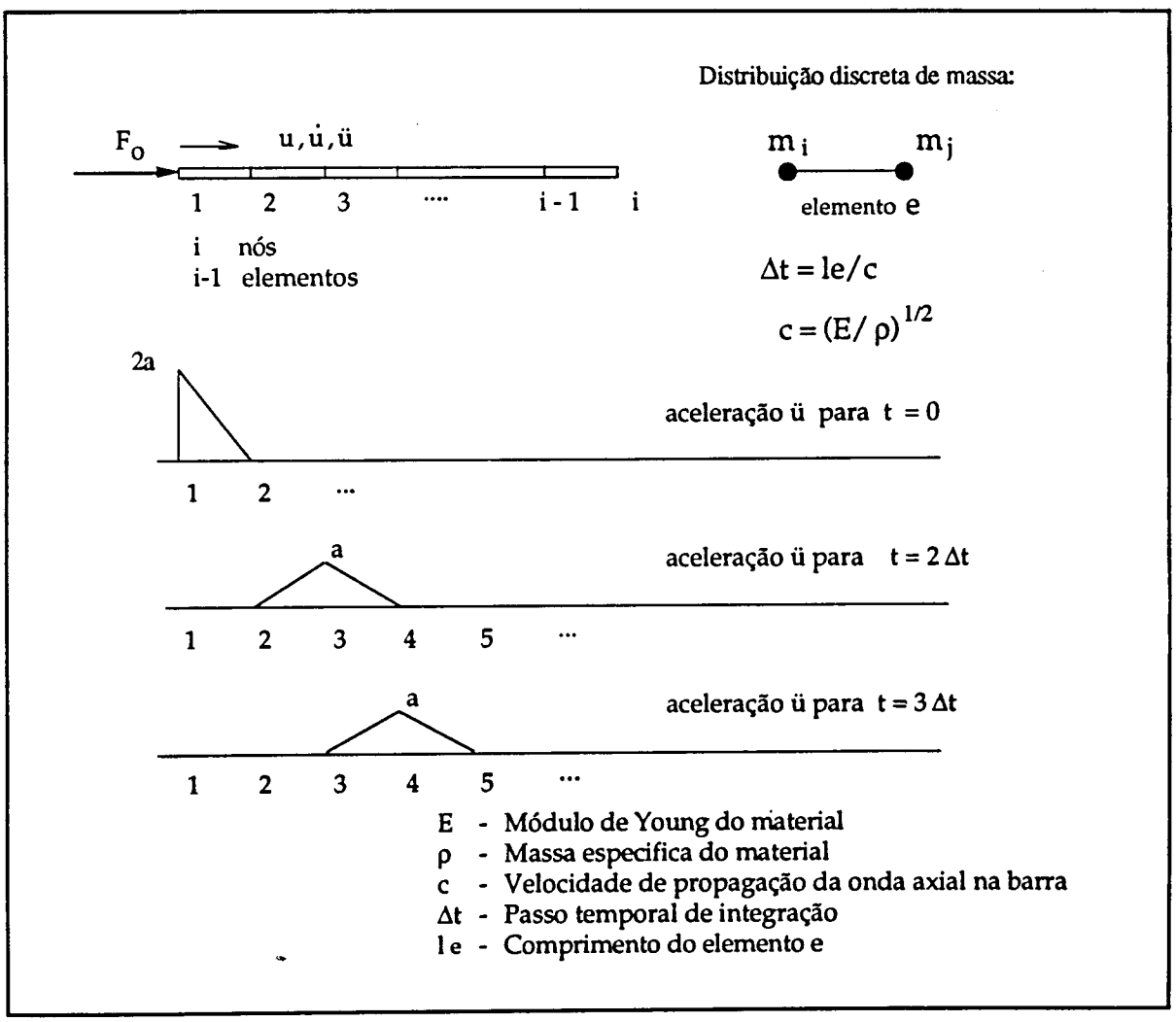


Figura 6.1 Discretização em elementos de uma viga sujeita a impacto axial.

Uma das principais limitações deste método prende-se com a grande dificuldade em moldar fronteiras de geometria complexa, tal como mostra a figura 6.2. Sendo as malhas obrigatóriamente rectangulares, a modulação de fronteiras complexas implica sempre um grande aumento do número de incógnitas.

Por último, a convergência para a solução exacta, embora bastante rápida, é fortemente condicionada, dependendo de parâmetros tais como o parâmetro de Crank-Nicholson, nos problemas de 1ª ordem, ou o intervalo de tempo, nas aplicações dinâmicas, determinado pelo conhecimento prévio da velocidade de propagação do som no sólido.

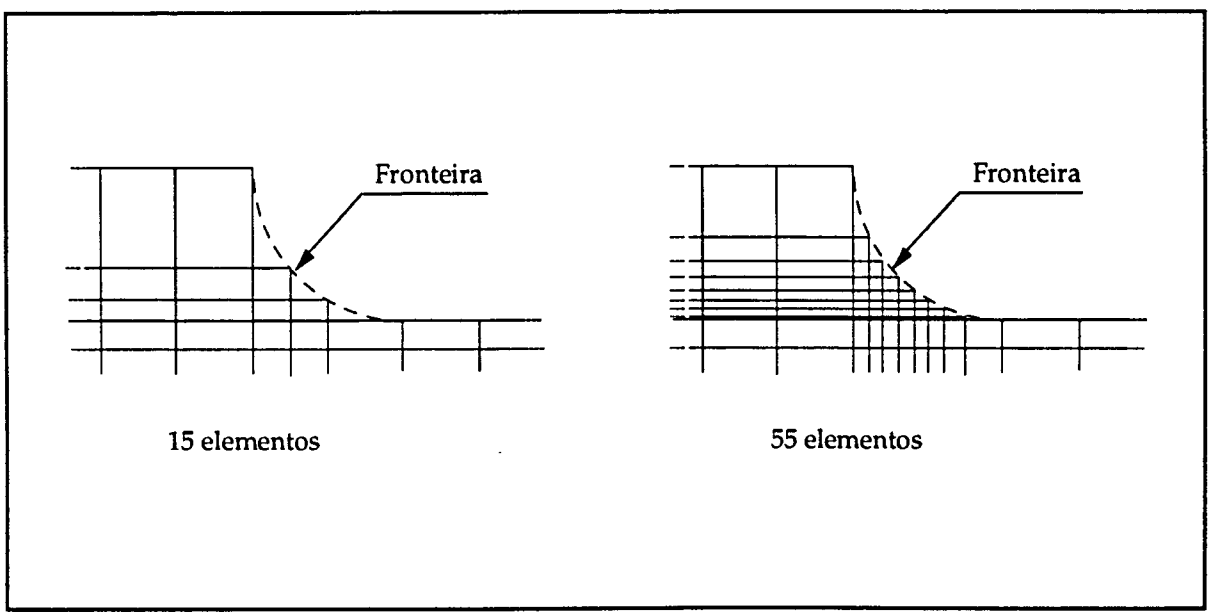


Figura 6.2 Discretização de um corpo com geometria complexa, para ser utilizada no MDF.

6.2.2 Métodos Semi-Analíticos.

Nestas técnicas, em oposição ao MDF, o sólido não é discretizado. Em vez disso, o campo dos deslocamentos é aproximado a partir de desenvolvimentos em séries trigonométricas, que devem necessáriamente satisfazer às condições de fronteira do problema. As incógnitas são agora os coeficientes dos termos associados às funções trigonométricas que integram os referidos desenvolvimentos. Estes coeficientes são obtidos por resolução do sistema de

equações que traduz a minimização da energia total envolvida no processo de deformação do sólido. O método é convergente para a solução exacta, desde que sejam observadas as condições de compatibilidade das funções trigonométricas com as fronteiras do sólido; por sua vez, a qualidade do resultado é melhorada aumentando o número de termos retidos nas séries.

Este método tem a vantagem de utilizar funções contínuas e infinitamente deriváveis, pelo que o campo de tensões no sólido dispensa tratamento de amaciamento (*smoothing*) [5], [9] e [10] . Estes métodos não são, contudo, muito utilizados quando o sólido está submetido a acentuados gradientes de carga em zonas localizadas, pois exigiria a consideração de um excessivo número de termos nas séries, a fim de proporcionar um resultado estável e convergente. O processo de convergência é, por sua vez, bastante lento nestes casos, com implicações desfavoráveis no custo informático, quer no tempo de cálculo, quer no tipo de equipamento usado, capaz de suportar a resolução de um elevado número de equações simultâneas.

Quando combinado com outros métodos, por exemplo, o dos Elementos Finitos, permite a definição de Elementos de Formulação Mista [11], em que se combinam funções de forma do tipo polinomial com séries trigonométricas. Este procedimento revela-se bastante eficaz na análise de estruturas de revolução, em que também não se considerem acentuados gradientes de carga; é possível a obtenção de soluções precisas com recurso a um número de termos trigonométricos relativamente baixo.

6.2.3 Método dos Elementos Finitos.

No Método dos Elementos Finitos (MEF), o domínio da funcional é discretizado em elementos que dispõem de nós. Por esses nós passam as funções interpoladoras, vulgarmente designadas por funções de forma, sendo o valor da incógnita no nó apenas um factor de escala que não altera as funções. O erro da solução final é minimizado apenas para os nós, não sendo garantida a minimização no interior dos elementos. As funções de forma desempenham também o papel de funções interpoladoras para os pontos não coincidentes com os nós, e são responsáveis pela caracterização do aspecto gráfico da solução.

No caso particular da Mecânica dos Sólidos, o estado de tensão em regime linear elástico é obtido por derivação do campo dos deslocamentos. Uma vez que este foi caracterizado a partir das funções de forma, a ordem das derivadas envolvidas obriga a uma selecção cuidada daquelas; por exemplo, se necessitassemos das segundas derivadas para caracterizar um estado de deformação, estaria fora de questão a utilização de polinómios do 1º grau.

A utilização de soluções discretas para problemas contínuos acarreta a obtenção de soluções aproximadas cujo rigor melhora com a diminuição do tamanho dos elementos utilizados. O refinamento da malha, embora aumente o rigor dos resultados, implica também um maior volume de cálculos a ser processado pelo computador.

A utilização de elementos especializados em problemas particulares permite melhorar as soluções sem a necessidade de malhas muito complexas combinando, por exemplo, funções de forma algébricas com desenvolvimento em série de Fourier. É o caso dos elementos de tubo curvo (toroidais) ou de anel cilíndrico, no tratamento de flexão generalizada de tubos curvos [12] ou solicitações localizadas em reservatórios cilíndricos [10],[13]. A expressão das tensões na direcção dos deslocamentos em séries trigonométricas dispensa técnicas de tratamento numérico de amaciamento (*smoothing*) [10], [9], [14] de tensões, pois as funções trigonométricas são infinitamente deriváveis.

As técnicas híbridas, assunto deste trabalho, são utilizáveis com qualquer dos métodos numéricos anteriormente definidos. Contudo, a sua utilização com o MEF, dada a forma como aqui é definido o campo de deslocamentos, revela-se mais atractiva e evidente. A discretização de um meio contínuo a partir de uma malha nodal sugere a selecção prévia de pontos onde a medição experimental dos deslocamentos é efectuada. Conhecendo *a priori*, em tais pontos, o valor dos deslocamentos obtidos por via experimental, torna-se expedito o cálculo do campo das deformações numa malha de elementos que passe pelos pontos seleccionados. Este procedimento permite não só verificar a aplicabilidade de determinada malha ao problema (numa resolução inteiramente numérica), mas também dispensar a resolução de um sistema de equações (normalmente de grandes dimensões).

6.2.4 Formulação Estática do Problema de Elementos Finitos.

Para ilustrar a técnica numérica utilizada com o MEF, tome-se como exemplo o problema da deformação linear elástica de um corpo sólido. Se for considerado apenas um elemento limitado por um conjunto nodal, o campo de deslocamentos no seu interior é interpolado a partir dos deslocamentos nodais, utilizando funções de forma. Em notação matricial o vector deslocamentos $\tilde{U}$ relaciona-se com os deslocamentos nodais $\tilde{U}_e$ através da seguinte equação matricial:

$$\tilde{U}=[N]\tilde{U}_e \tag{6.5}$$

onde os vectores dos deslocamentos num ponto qualquer do elemento e nos pontos nodais são, respectivamente:

$$\tilde{U}=\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad e \quad \tilde{U}_e=\begin{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{Bmatrix} \\ \cdots \\ \begin{Bmatrix} u_n \\ v_n \\ w_n \end{Bmatrix} \end{Bmatrix} \tag{6.6}$$

sendo n o número total de nós do elemento. Para este caso, podemos escrever a matriz das funções interpoladoras, também designadas por funções de forma, como se segue:

$$[N]=\begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \cdots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \cdots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \cdots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix} \tag{6.7}$$

De acordo com a teoria da Elasticidade, as equações diferenciais para um problema tridimensional, como é por exemplo o elemento representado na figura 2.3, são:

$$\varepsilon_{xx}=\frac{\partial u}{\partial x};\ \varepsilon_{yy}=\frac{\partial v}{\partial y}\ ;\ \varepsilon_{zz}=\frac{\partial w}{\partial z} \tag{6.8 a}$$

$$\gamma_{xy}=\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\ ;\ \gamma_{xz}=\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\ ;\ \gamma_{yz}=\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y} \qquad (6.8\,b)$$

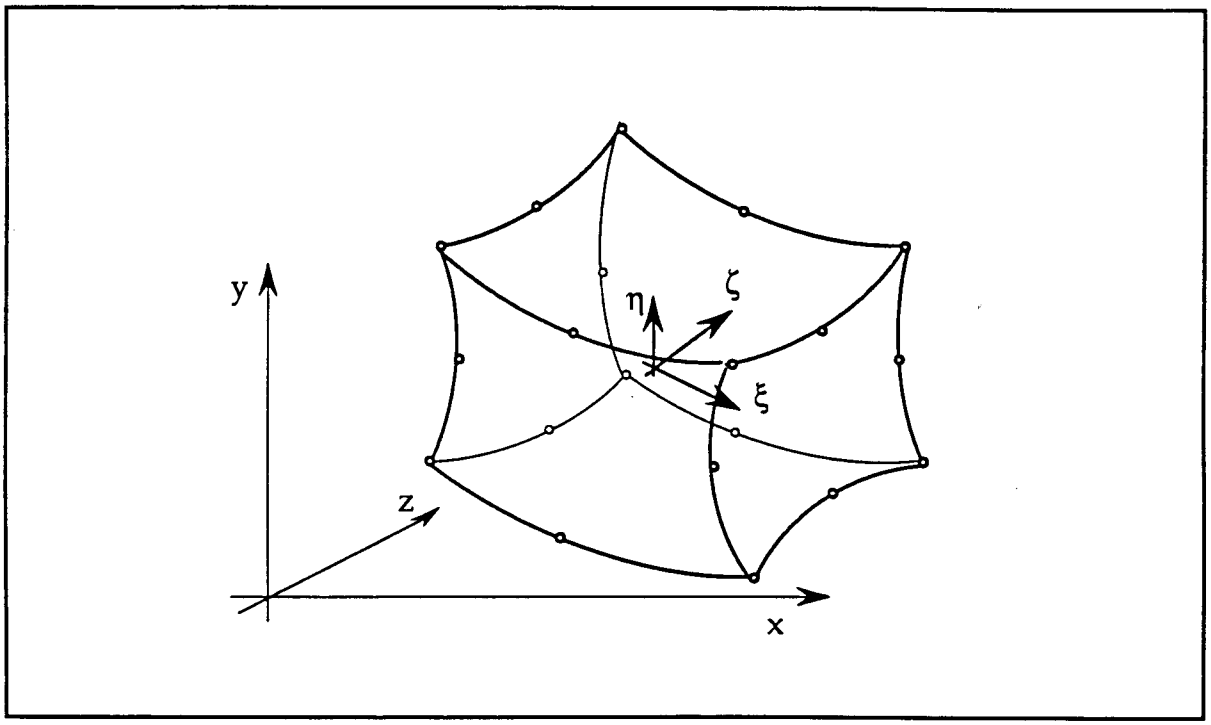


Figura 6.3 Elemento finito de volume para deslocamentos em R^3.

ou matricialmente,

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_{xx}\\ \varepsilon_{yy}\\ \varepsilon_{zz}\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{xz}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0\\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0\\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z}\\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0\\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y}\\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u\\ v\\ w\end{bmatrix} \qquad (6.9)$$

ou ainda, numa notação mais compacta

$$\tilde{\varepsilon}=[B]\,\tilde{U}=[L][N]\,\tilde{U}_e \qquad (6.10)$$

onde [L] é a matriz diferenciadora que aparece no segundo membro da equação (6.9). Por sua vez as tensões relacionam-se com as deformações através da relação linear seguinte, que constitui a lei de Hooke generalizada:

$$\tilde{\sigma}=[D]\,\tilde{\varepsilon} \qquad (6.11)$$

onde $\tilde{\sigma}$ é o vector das tensões, [D] é a matriz de elasticidade e $\tilde{\varepsilon}$ é o vector das deformações. Para as deformações em R^3 a equação (6.11) escreve-se por extenso do seguinte modo:

$$\begin{bmatrix}\sigma_{xx}\\ \sigma_{yy}\\ \sigma_{zz}\\ \tau_{xy}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{zx}\end{bmatrix}=\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix}1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0\\ & 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0\\ & & 1 & 0 & 0 & 0\\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0\\ & \text{(simétrico)} & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0\\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{xx}\\ \varepsilon_{yy}\\ \varepsilon_{zz}\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{xz}\end{bmatrix} \qquad (6.12)$$

A energia elástica envolvida no processo de deformação do sólido pode ser calculada pela seguinte expressão matricial:

$$U=\frac{1}{2}U_e^T\left([B]^T[D][B]\right)U_e+U_e^T F \qquad (6.13)$$

onde a expressão entre parêntesis pode ser substituida pela matriz

$$[K]=[B]^T[D][B] \qquad (6.14)$$

que é usualmente designada por matriz de rigidez do elemento. Para uma variação elementar do campo dos deslocamentos, obtém-se uma variação de energia determinada por:

$$\delta U = \frac{1}{2}\left[\delta U_e^T [K] U_e + U_e^T [K] \delta U_e\right] + \delta U_e^T F \qquad (6.15)$$

As duas parcelas dentro dos parêntesis rectos no segundo membro são grandezas escalares que representam a mesma quantidade, pelo que a expressão (6.15) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\delta U = \delta U_e^T [K] U_e + \delta U_e^T F \qquad (6.16)$$

Para uma variação arbitrária dos deslocamentos nodais há uma configuração para estes em que a energia de deformação atinje um minímo, o que constitui um principio variacional natural. A expressão (6.13) deve ser *estacionária* para a configuração da estrutura ser aquela que verdadeiramente representa a sua deformada. A equação anterior (6.16) deve, por isso, ser igualada a zero para uma variação arbitrária, mas pequena, do vector deslocamento, traduzindo-se assim a estacionaridade da funcional U em (6.13). Daqui se obtém a equação fundamental de equilibrio para o MEF.

$$\tilde{F}_e = [K]\,\tilde{U}_e \qquad (6.17)$$

Esta equação é válida tanto para um só elemento finito como para uma malha que discretize um sólido. Neste último caso, $\tilde{F}_e$ representa o vector global de forças aplicadas aos nós da estrutura discretizada em elementos, $\tilde{U}_e$ é o vector global dos deslocamentos nodais e [K] representa a matriz de rigidez da malha utilizada; designa-se [K], assim estruturada, por matriz de rigidez global e resulta de um processo de montagem ordenada das matrizes dos elementos integrando a malha [16], [17].

Na equação (6.17), a dimensão do problema depende das condições de fronteira do sólido. Os deslocamentos restringidos pela condição cinemática de apoios são conhecidos antecipadamente. Se forem nulos, devem ser suprimidas a linha e coluna da matriz global [K] que passam pelo grau de liberdade prescrito. Desta forma é reduzida a dimensão do problema.

O vector $\tilde{F}_e$ contém apenas forças aplicadas aos nós da malha. Isto significa que distribuições contínuas da força devem ser transformadas num sistema de

forças nodais equivalente. Para forças distribuidas sobre uma área Ω da superfície exterior do sólido, a componente nodal equivalente do vector $\tilde{F}_e$ é [16] e [4]:

$$F_{ij} = \int_{\Omega} q(x,y,z) N_{ij} \, d\Omega \tag{6.18}$$

Na expressão anterior i (i=1,..., n_e, número de nós) refere-se à numeração nodal, j (j=1,...,3) é a ordem do grau de liberdade em cada nó e q(x,y,z) é a função que representa a pressão de contacto nesse ponto. No caso de forças de volume, basta substituir a integração sobre uma superfície por um integral de volume.

Como alternativa a esta formulação generalizada, a deformação de algumas estruturas pode ser determinada utilizando uma parameterização auxiliar para os deslocamentos. É o caso das estruturas tipo placa ou casca, em que o deslocamento em R^3 de qualquer ponto na sua massa pode ser expresso a partir de movimentos de uma camada média, complementados por rotações de acordo com o referêncial que caracteriza a geometria da estrutura [15]. No caso de uma placa, o deslocamento relevante é normal ao seu plano, enquanto que numa casca os deslocamentos mais importantes se verificam no plano tangente (deslocamentos de membrana, segundo as direcções principais de curvatura) e na perpendicular áquele plano. Desta forma, em qualquer dos casos, o vector de deslocamentos de um ponto qualquer da estrutura é obtido da combinação do deslocamento do ponto correspondente da camada média complementado pelos efeitos das rotações principais da normal à superfície média que passa pelo ponto em questão (figura 6.4).

6.2.5 Formulação Dinâmica do Problema de Elementos Finitos.

No tratamento de fenómenos dinâmicos com recurso ao MEF, a equação (6.3):

$$[K]\tilde{U} + [C]\dot{\tilde{U}} + [M]\ddot{\tilde{U}} = \tilde{F} \tag{6.3}$$

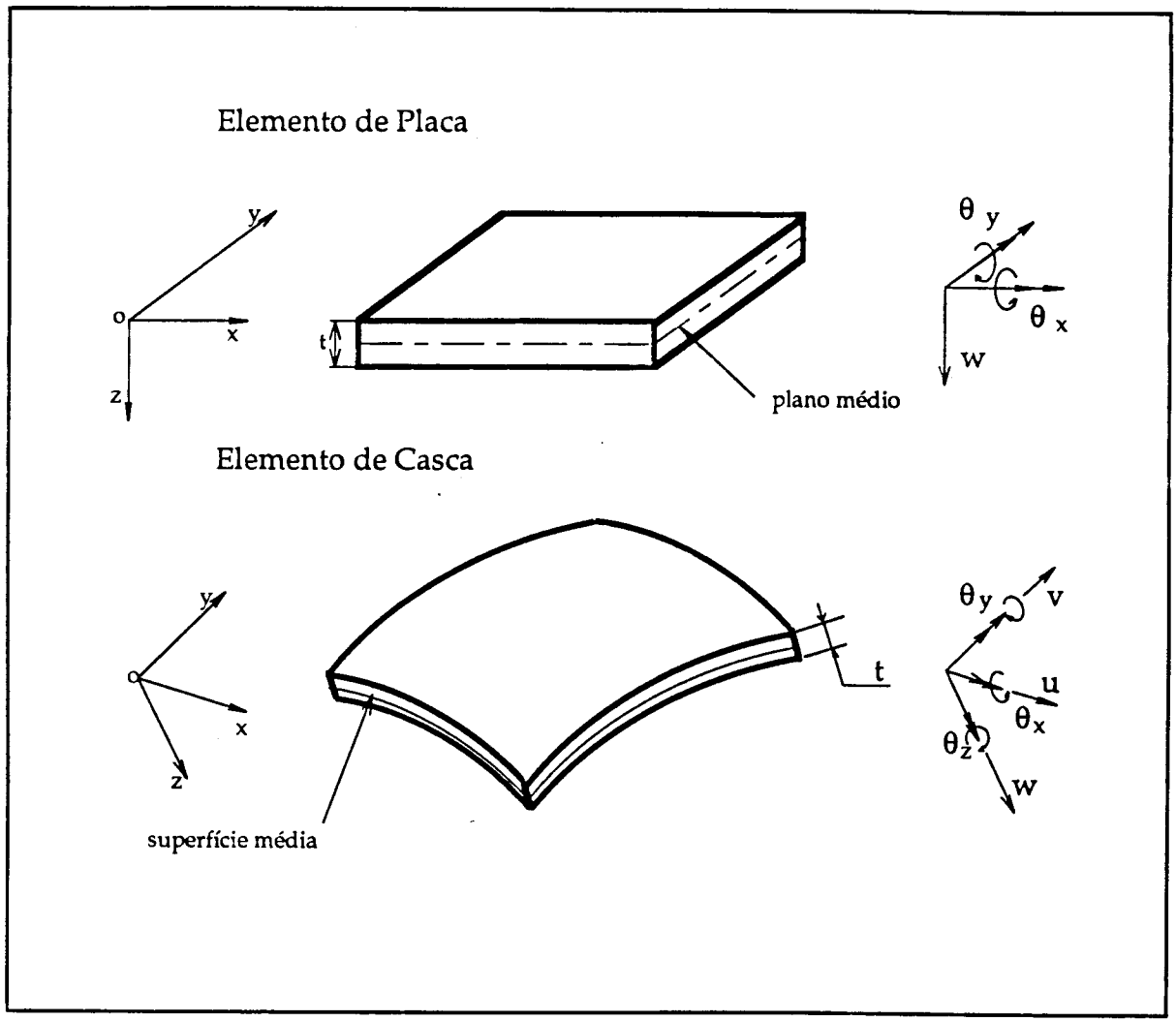


Figura 6.4 Deslocamentos generalizados num elemento de placa e num elemento de casca.

caracteriza a situação de equilibrio em regime dinâmico para uma estrutura discretizada em elementos finitos. Na equação anterior [K], à semelhança do problema estático, representa a matriz de rigidez global da estrutura; $\tilde{F}$ é o vector das forças nodais equivalentes, cuja história depende do tempo; por sua vez [M] e [C] representam, respectivamente as matrizes de massa e amortecimento. A sua definição depende do modelo dinâmico de distribuição de massa. Na sua versão mais simples, mas não menos eficaz, a matriz de massa pode ser diagonal, o que corresponde a repartir a massa total de cada elemento pelos nós, concentrando cada fracção num núcleo sem dimensões. Este modo de aproximação é conhecido pela sua designação anglo-saxónica de *lumped mode*. Evidentemente que a soma

de todas as massas nodais assim concentradas corresponde à massa total do elemento. Um procedimento idêntico é adoptado para o amortecimento. Desta forma não são consideradas as acções recíprocas entre os nós. As vantagens numéricas deste modelo reflectem-se numa importante economia nos tempos de computação, uma vez que matrizes diagonais permitem algoritmos de multiplicação matricial extremamente simples. Este modelo tem, porém, a limitação de necessitar de um grande número de elementos, a fim de caracterizar com precisão fenómenos envolvendo frequências elevadas, o que o torna anti-económico.

Uma distribuição contínua, quer da massa quer do amortecimento, leva à definição de matrizes consistentes. Para a matriz de massa, uma aproximação dita de primeira ordem tem como elemento genérico :

$$m_{ij} = \int_{Vol.} \rho(x,y,z) N_i N_j \, dv \qquad (6.19)$$

j=1,2,...,n i=1,2,...,n sendo n o número de nós do elemento

onde ρ é a massa especifica do material, que no caso geral pode variar de ponto para ponto, N_i e N_j são as funções de forma do nó i e j, respectivamente. A integração no volume do elemento é efectuada numericamente. Da mesma forma se definem para a matriz [C] fórmulas idênticas a (6.19), isto é:

$$c_{ij} = \int_{Vol.} f(x,y,z) N_i N_j \, dv \qquad (6.20)$$

J=1,2,...,n i=1,2,...,n sendo n o número de nós do elemento

o factor de amortecimento f é normalmente independente da posição do ponto na estrutura, pelo que pode colocar-se fora do integral.

Para a determinação dos modos próprios de uma estrutura, o problema resume-se em, na equação (6.3), fazer o vector $\tilde{F}$ =0 e desprezar a contribuição do amortecimento, pois este apenas influencia a amplitude do movimento. A equação de valores próprios escreve-se da seguinte forma [4]:

$$[K]\tilde{U} - \omega^2 [M]\tilde{U} = 0 \qquad (6.21)$$

A solução não trivial do anterior sistema de equações algébricas em $\tilde{U}$ é obtida anulando o determinante associado:

$$\text{Det}\left\{[K] - \omega^2 [M]\right\} = 0 \tag{6.22}$$

As raizes em ω desta equação polinomial correspondem às frequências angulares próprias da estrutura. Dada a dimensão do polinómio, está fora de questão qualquer tentativa de resolução analítica. A determinação numérica dos valores próprios conta com métodos consagrados, tais como Gauss-Jacobi, o qual permite determinar todas as frequências associadas à dimensão do problema, ou o da iteração por subespaços, que permite obter somente as frequências em determinado intervalo previamente definido [4]. É importante destacar que as frequências e os respectivos modos próprios assim obtidos dependem das condições de fronteira da estrutura a ponto de, estando esta completamente livre, existirem movimentos de corpo rígido (sem qualquer deformação) associados a frequências nulas.

Numa situação em que existe vibração forçada ($\tilde{F} \neq 0$ na equação (6.3)), a forma da estrutura é caracterizada em qualquer instante t pelo vector $\tilde{U}$ (t). A solução da referida equação é obtida com recurso a técnicas numéricas, no tempo, tais como o Método das Diferenças Centrais referido na secção 6.2.1 (que não é mais do que o MDF, em que o valor actual para $\tilde{U}$ (t) é centrado), os método de Newmark e Wilson-θ, [4] [5] ambos não explicitos, o que significa que o resultado para $\tilde{U}$(t) depende da resolução de um sistema de equações. Estes métodos permitem que fenómenos transitórios de alta velocidade, como por é exemplo o caso da propagação de ondas de tensão em sólidos, sejam estudados com eficácia, desde que o intervalo de tempo Δt obedeça às condições referidas em 6.2.1. Importa mencionar ainda que, para além do intervalo de tempo crítico, a matriz de massa para os métodos de Newmark e Wilson-θ, deve seguir necessariamente o modelo consistente [5]. A obtenção da solução não depende da existência de ligações da estrutura a um referencial fixo; isto é, dada a existência de massa, a força de inércia promove as necessárias condições de equilibrio, mesmo que o corpo esteja totalmente livre.

6.3 Técnicas Híbridas em Mecânica dos Sólidos.

Como técnicas híbridas de Análise Experimental de Tensões entende-se a utilização combinada de dois procedimentos hierarquizados [23]. Numa primeira fase, são utilizadas técnicas experimentais na avaliação quantitativa do campo de deslocamentos de uma estrutura. Seguidamente, técnicas de derivação numérica e consideração de relações constitutivas permitem caracterizar o campo de deformações e de tensões em qualquer ponto da superfície em análise. Dadas as dificuldades mencionadas anteriormente, e que se prendem com a modelação da geometria e das condições de fronteira de alguns problemas, como é o caso de encastramento em cascas ou vigas espessas, este método encontra particular justificação.

As técnicas ópticas, dadas as suas características de análise sem contacto, não destrutivas e com capacidade de avaliação extensiva a uma área pré-definida, ajustam-se bastante bem à utilização em procedimentos híbridos. A avaliação quantitativa do campo de deslocamentos é bastante facilitada por recurso a sistemas de processamento digital de imagem que, combinados com técnicas de modulação de fase, permitem a obtenção directa de ficheiros numéricos que traduzem o campo de deslocamentos. Na figura 6.5 está representado o padrão de franjas obtido por deformação de uma barra rectangular encastrada numa das suas extremidades e sujeita a uma carga concentrada na extremidade oposta.

6.3.1 Modelação das Condições de Fronteira e do carregamento.

Como já foi referido, existem dificuldades em modelar apoios e ligações complexas de uma estrutura a um referencial de suporte. Estados de tensão não planos, deformações elásticas nos suportes e empenamentos das secções muito próximas de encastramentos levantam dificuldades em aproximar estes casos por uma malha de Elementos Finitos. Neste tipo de situações serão esperados acentuados gradientes de deformações. Uma aproximação aceitável a estas singularidades estruturais só será possível utilizando importantes refinamentos de malha, com reflexos inevitáveis no tempo de computação.

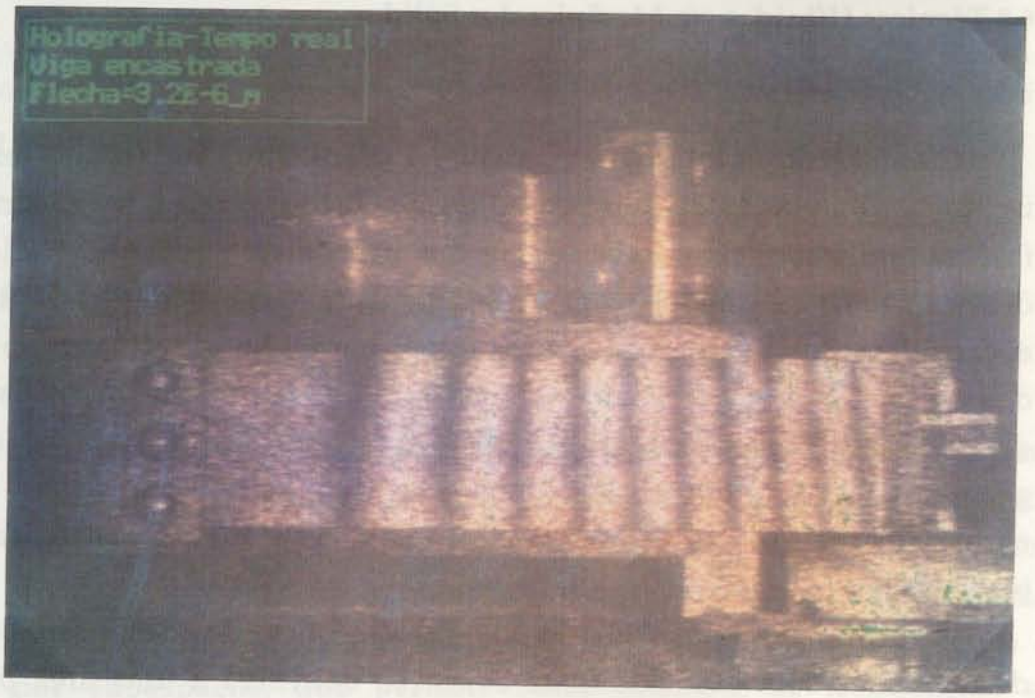
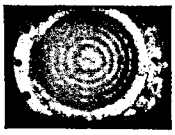
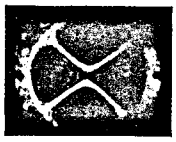
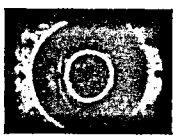
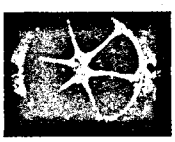
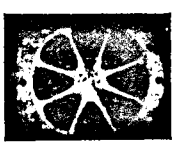
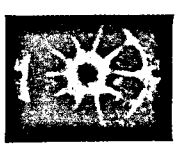
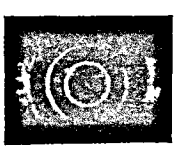


Figura 6.5 Padrão de franjas obtido por deformação de uma barra rectangular encastrada na extremidade esquerda e submetida a uma carga concentrada.

O conhecimento com rigor das situações reais, obtido por recurso a técnicas experimentais, permite melhorar a precisão do procedimento numérico, denunciando comportamentos na estrutura não previsíveis numa análise exclusivamente numérica. Como exemplo, considere-se a situação em que apoios assumidos como indeformáveis na análise numérica, na realidade deveriam ser substituídos por elementos de rigidez a definir à custa de uma investigação experimental [18] [19]. Com este procedimento, pode ser afinada devidamente a deformabilidade dos suportes e optimizados os modelos numéricos afins. Este procedimento encontra perfeita justificação em análise dinâmica de estruturas, onde as frequências próprias são consideravelmente afectadas pelas condições de ligação.

Quando, no intuito de simplificar a resolução de um problema envolvendo condições de simetria, se utilizam malhas parciais em análise modal, são eliminados modos antissimétricos, de ordem intermédia à de dois modos simétricos consecutivos. Estes modos de vibração, que podem ser esquecidos numa análise numérica menos avisada, são completamente revelados na análise experimental.Na tabela 6.1 estão representados os vários modo de vibração de uma placa circular encastrada em todo o seu bordo exterior, bem como os modos obtidos numéricamente com diferentes malhas impondo condições de simetria.

ESPI	ADINA (1/4)*	ADINA (1/2)**	AXIPLATE Ref. [58]	Ref. [59]
	Todas as frequências em Hz			
	285	248.2	278.6	252.8	248.7
	483	*****	579.5	*****	517
	770	847.2	950	*****	848.9
	921	966.5	1083	1015	967.3
	1151	*****	1390	*****	
	1431	*****	1483	*****	
	1600	1691	1708	*****	
	1993	2053	2072	*****	
	2107	2165	2187	*****	
	2864			2043.2	

* -A malha correspondia a 1/4 da placa.
** -A malha correspondia a 1/2 da placa.
***** -Modos não detectados

Tabela 6.1 Modos de vibração de uma placa circular encastrada ao longo do bordo exterior.

Igualmente importante é a modulação das condições de carregamento a impôr ao modelo numérico, por forma a reproduzir com suficiente rigor a solicitação existente na situação real. As funções matemáticas a seleccionar deverão simular as cargas, sem contudo aumentar exageradamente a complexidade do modelo matemático. Nas figuras 6.6 e 6.7 representa-se um exemplo em que as técnicas de interferometria holográfica foram utilizadas para validar uma simplificação utilizada para modular um carregamento aplicado sobre um tubo cilíndrico de parede fina [61]. Neste caso, um momento longitudinal é aplicado localmente por rotação de um corpo cilíndrico rígido colado sobre a superfície do tubo. Esta situação é reproduzida no modelo numérico por uma carga distribuida ao longo da área de contacto com igual momento resultante. A equivalência em termos de distribuição do campo de deslocamentos induzidos pode ser avaliada pela análise das figuras 6.6 e 6.7, que representam os resultados obtidos experimentalmente e o padrão de isocurvas de deslocamento calculadas por via numérica.

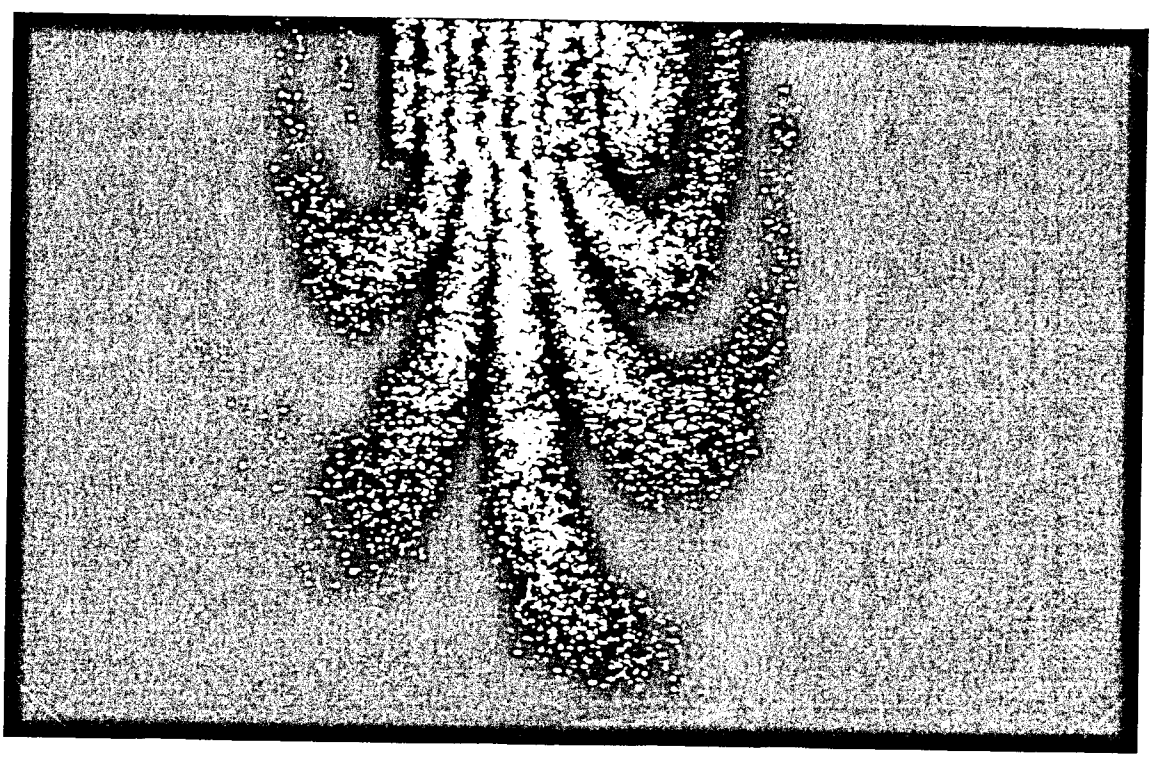


Figura 6.6 Padrão de interferência correspondende ao campo de deslocamentos induzido num tubo de 200 mm de diâmetro por aplicação de um momento longitudinal.

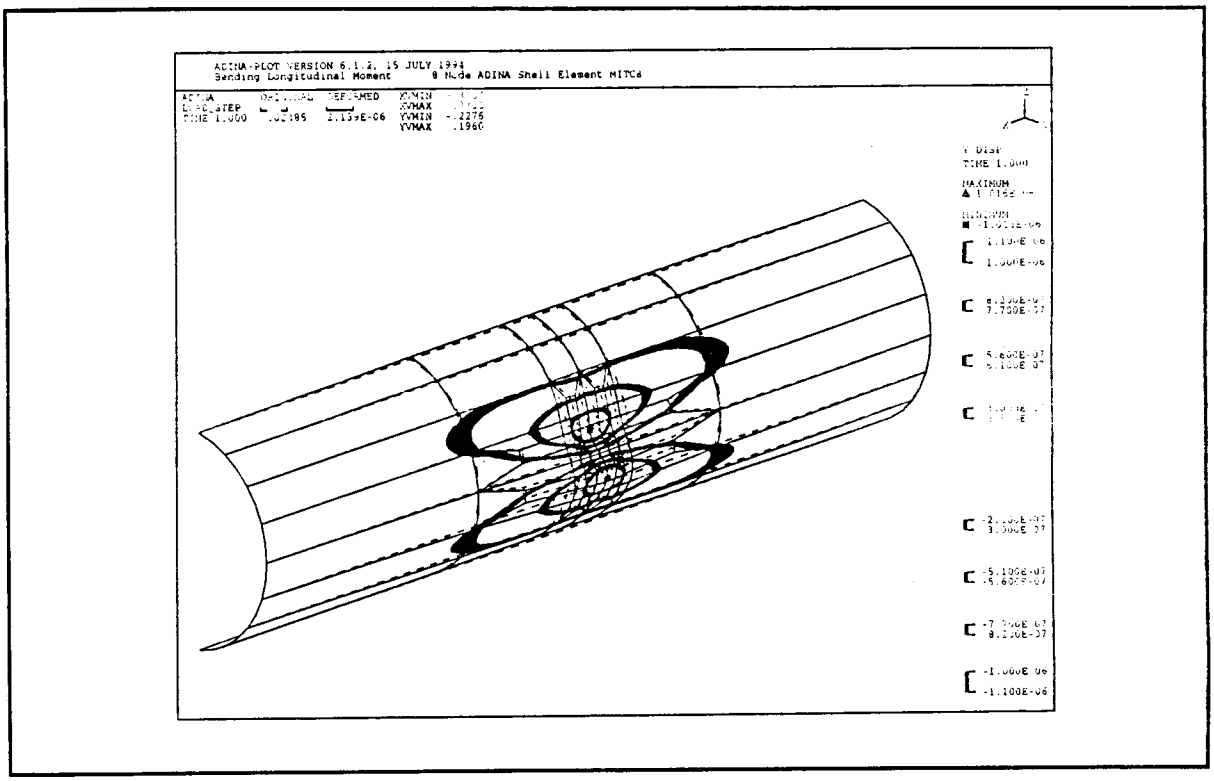


Figura 6.7 Isocurvas de deslocamento obtidas numèricamente para a situação analisada experimentalmente na figura 6.6.

6.3.2 Técnicas de subestruturação.

Em situações envolvendo gradientes de deformação localizados, estão criadas as condições para serem utilizadas, com vantagem, técnicas de subestruturação. Este procedimento permite isolar a análise de partes da estrutura à custa do conhecimento das incógnitas do problema ao longo de um contorno. Estas, obtidas experimentalmente, possibilitam a definição de uma malha refinada contendo apenas a zona em análise, não necessitando do elevado número de elementos da malha total. Acidentes geométricos na estrutura, tais como furos, entalhes ou fendas justificam este procedimento. Na figura 6.8 representa-se uma situação analisada pela forma anteriormente descrita [60]. Neste trabalho é utilizada uma técnica experimental para determinar os deslocamentos no plano ao longo de uma fronteira definida em torno de um pormenor geométrico introduzindo concentração de tensões. Os valores obtidos

são utilizados como prescrições numa malha de elementos finitos que discretiza apenas a área em análise.

Obtidos experimentalmente os deslocamentos ao longo do contorno previamente definido na estrutura completa, estes passam a ser utilizados como condições de fronteira da malha reduzida utilizada na subestruturação. Com esta técnica são prescritas condições de contorno num novo problema, reduzindo assim o número global de incógnitas da subestrutura [20],[21].

As técnicas híbridas podem também ser utilizadas na selecção da melhor malha a aplicar na solução numérica de um dado problema. Desta forma poderá ser utilizada aquela que, conduzindo a resultados satisfatórios, não aumente exageradamente o número de graus de liberdade do problema [22]. O número de elementos e os refinamentos da malha podem ser ajustados de acordo com a distribuição de deslocamentos esperada.

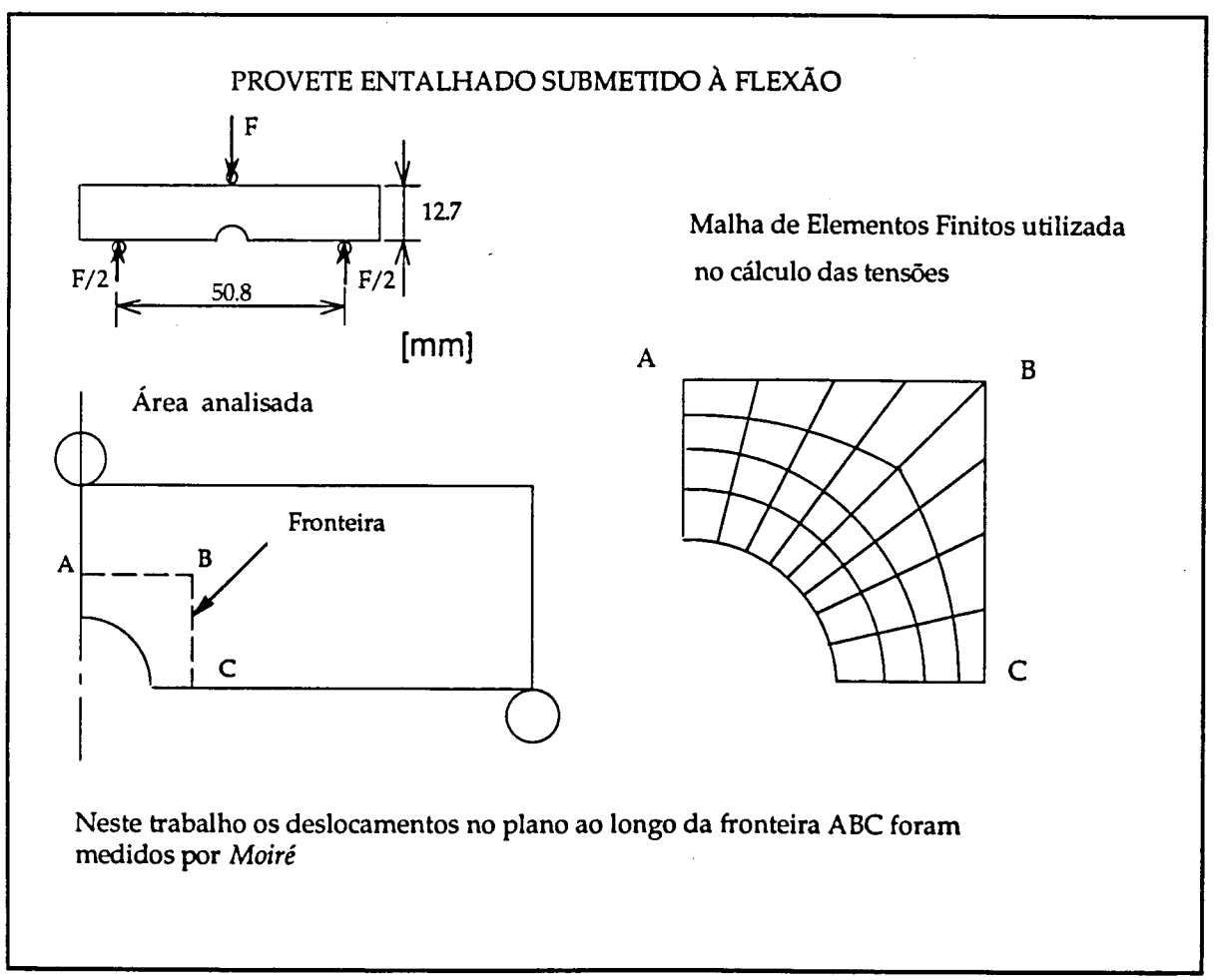


Figura 6.8 Subestruturação de uma malha a partir da determinação das incógnitas no contorno [60].

6.3.3 Obtenção directa do campo de deslocamentos.

A utilização das técnicas interferométricas em aplicações metrológicas começou por ser apenas qualitativa. A possibilidade de, com estas técnicas, obter informação sobre os deslocamentos de uma área previamente definida permite detectar com elevada resolução gradientes de deformação e/ou movimentos de corpo rigído. As primeiras medições quantitativas sobre registos de interferometria holográfica começaram por ser pontuais, e efectuadas directamente sobre os registos recorrendo a sistemas ópticos previamente calibrados. A divulgação dos sistemas de processamento de imagem permitiu desenvolver sistemas de análise de padrões conduzindo a medições discretas de deslocamentos ou, quando combinados com técnicas de fase, medições globais do campo de deslocamentos segundo a direcção do vector sensibilidade.

Recorrendo a técnicas experimentais de interferometria, já referidas anteriormente, é possível obter directamente o campo de deslocamentos numa zona previamente definida de uma estrutura sujeita a deformação. A medição experimental da deformada permite determinar o conjunto de variáveis nodais necessário à resolução do problema (vector $\tilde{U}_e$ na expressão (6.10)), evitando assim a determinação numérica dos deslocamentos que, no Método dos Elementos Finitos, normalmente implica a resolução de um complexo sistema de equações. Tendo sido prèviamente definida um malha de Elementos Finitos e, para essa malha, as matrizes [L], [N] e [D], a obtenção do campo de tensões depende da utilização de um programa de cálculo relativamente simples, em que as operações matriciais referidas em (6.10) a (6.12) devem ser efectuadas.

Dependendo da tipologia do elemento finito utilizado na discretização da estrutura, as variáveis nodais podem conter exclusivamente deslocamentos (como por exemplo os problemas tridimensionais e bidimensionais) ou deslocamentos e rotações, como é o caso dos elementos de placa ou casca [6]. Neste último caso, as rotações podem ser obtidas por derivação numérica da função deslocamento segundo uma direcção ou por medição experimental, assuntos que serão abordados mais adiante. A determinação por interferometria do deslocamento real em cada ponto implica a resolução de um sistema de equações, como foi referido no 3º capítulo deste trabalho.

Em problemas dinâmicos, é possível obter experimentalmente a forma de cada um dos modos próprios excitados. Neste caso, o campo de deslocamentos

que corresponde às situações extremas da vibração da estrutura pode ser utilizado para, recorrendo ao cálculo estático, obter a distribuição de tensões associada àquela configuração dinâmica. Este procedimento pode ser estendido ao estudo de fenómenos transitórios desde que, não sendo destrutivos, possam ser repetidos. Usando *lasers* pulsados e registos em dupla exposição, é possível gravar, em intervalos de tempo extremamente curtos, a configuração dinâmica de uma estrutura devida à propagação de um fenómeno transitório. A sincronização do disparo da fonte de iluminação com o fenómeno em estudo permite que, variando a duração do intervalo entre exposições, o desenrolar do fenómeno possa ser acompanhado no tempo.

Os valores obtidos experimentalmente não podem ser transferidos para os programa numéricos de cálculo de tensões sem que alguns cuidados devam ser tomados. Quer os erros cometidos nas medições, quer a colocação espacial das variáveis nodais, podem alterar significativamente a distribuição final de tensões, o que implica a utilização de programas numéricos de tratamento dos valores experimentais. Estes programas deverão preparar os valores obtidos pelas medições efectuadas sobre os registos interferométricos, por forma a poderem ser utilizados como ficheiros de entrada em programas de cálculo de tensões.

Os resultados experimentais são normalmente obtidos sob a forma de imagens de padrões de franjas de interferência cuja distribuição espacial e ordenamento permite inferir a deformada da estrutura. O levantamento dos deslocamentos pode ser efectuado de forma discreta a partir de medições pontuais ou de forma contínua, recorrendo a técnicas de modulação de fase. Quando da medição resulta um conjunto descontínuo de pontos sobre a imagem, o recurso a funções interpoladoras permite obter os valores do deslocamento e rotação nos pontos onde essa informação não é conhecida. No caso dos valores medidos incluirem erros resultantes do processo de medição, a opção por funções de ajuste permite, com introdução de amaciamento, eliminar as oscilações nas derivadas que resultam das restrições impostas quando a função passa necessariamente pelos pontos.

Os sistemas de processamento de imagem são uma ferramenta essencial na análise dos padrões de interferência. Quando associados às técnicas de modulação de fase, permitem obter as ditribuições espaciais de fase provocadas pela deformação da estrutura. A conversão da distribuição de fase no campo de deslocamentos é expedita, dependendo da geometria da montagem óptica e do comprimento de onda da radiação utilizada, sendo o resultado final obtido sob a forma de ficheiros numéricos correspondente ao vector $\tilde{U}_e$. Desta forma obtém-

se uma medição contínua do campos de deslocamentos, segundo uma direcção bem definida e ao longo de uma superfície préviamente seleccionada.

Nas situações em que não é possível o recurso às técnicas de modulação de fase, os sistemas de processamento de imagem podem ser utilizados para determinar o posicionamento de pontos particulares dos padrões de franjas. Rotinas de erosão ou rotinas de seguimento identificam os valores máximos ou mínimos da intensidade de cada franja definindo linhas de isodeslocamento. Neste caso, a obtenção dos deslocamentos em qualquer ponto deverá ser procurada fazendo uso de programas numéricos que permitam ajustar funções ao conjunto de valores obtidos na medição.

6.3.3.1 Obtenção dos deslocamentos a partir de medições discretas sobre registos interferométricos.

Nem sempre a grande quantidade de informação presente num registo interferométrico pode ser tratada recorrendo a técnicas de modulação de fase. Nestas situações, de que são exemplo os registos de dupla exposição obtidos com referência única, as medições de deslocamentos são normalmente efectuadas de forma discreta e em pontos a que correspondem valores bem definidos da intensidade luminosa, como são os pontos de intensidade máxima e mínima de cada uma das franjas.

O processamento digital das imagens dos padrões envolve a sua segmentação em dois níveis de intensidade por ajuste conveniente de um limiar de separação (*threshold*). Rotinas de erosão [24] (*thinning*), aplicadas sobre as imagens bi-cromáticas resultantes, permitem obter um conjunto de linhas que correspondem aos lugares geométricos dos valores limites da intensidade de cada uma das franjas [25] [26]. Igual resultado pode ser obtido recorrendo a rotinas de seguimento (*tracking*) que, por um processo de escolha selectiva da direcção em cada ponto, conseguem seguir a crista ou vale de uma franja de um padrão de interferência ao longo do seu comprimento [27]. Estas técnicas são normalmente interactivas, competindo ao utilizador a selecção de cada uma das franjas e a sua numeração. O conjunto de linhas obtido corresponde ao "esqueleto" do padrão de interferência, sendo os valores intermédios normalmente obtidos por interpolação.

Das medições discretas, resultantes da aplicação de qualquer dos processos anteriormente referidos ou por medição directa sobre as imagens, resultam conjuntos de pontos cuja completa definição implica o conhecimento de três coordenadas. Duas delas definem a sua posição no plano da imagem e a terceira corresponde ao valor do deslocamento nesse ponto. Esta última depende da geometria da montagem óptica (vector sensibilidade), do comprimento de onda da radiação coerente utilizada e da ordenação das franjas.

As franjas resultam de fenómenos de interferência entre frentes de onda provenientes da superfície da estrutura em duas situações de carregamento distintas e apresentam uma distribuição sinusoidal de intensidade que atinge um mínimo sempre que o deslocamento seja múltiplo inteiro de meio comprimento de onda da radiação *laser*. Como o comprimento de onda da radiação é perfeitamente conhecido, possíveis erros na medição dos deslocamentos resultam essencialmente de imprecisões na determinação do posicionamento das linhas de iso-deslocamento relativamente à superfície do objecto.

Como os valores obtidos geralmente não correspondem aos nós da malha de elementos finitos previamente definida, e alguns elementos finitos especializados (como por exemplo os elementos de placa e os elementos de casca) têm rotações como variáveis nodais, a transferência dos valores experimentais para os programas numéricos implica o recurso a funções interpoladoras. As deformações e rotações relacionam-se com a primeira e segunda derivadas da função deslocamento, pelo que as funções a utilizar, além de passarem pelos vários pontos obtidos experimentalmente, deverão ser contínuas e manter a sua contínuidade até à segunda derivada.

As deformadas obtidas, obedecendo obrigatoriamente ao princípio da energia mínima, deverão apresentar derivadas com variações suaves. A função *spline* cúbica permite interpolar os dados experimentais respeitando as restrições referidas [28]. A escolha desta função resulta óbvia se recordarmos que ela corresponde à função matemática que descreve a deformada de um instrumento flexível utilizado no traçado de curvas passando por conjuntos de pontos previamente fixados [29]. A interpolação é feita seccionalmente, garantindo que em cada um dos pontos que limitam uma secção existe continuidade na função deslocamento e nas duas primeiras derivadas. As condições nas fronteiras podem ser fornecidas, ou, no caso de não o serem, a resolução do sistema de equações associado ao cálculo da função interpoladora é feito assumindo que $f''(x_0)=f''(x_n)=0$ (condições de fronteira naturais). Estas funções podem ser

aplicadas segundo direcções definidas na superfície, ou definindo uma malha rectangular, no caso da análise bi-dimensional.

6.3.3.2 Interpolação de medições discretas apresentando ruído.

As medições efectuadas com as técnicas interferométricas, à semelhança do que acontece com qualquer outra técnica experimental, contêm erros que, embora possam ser minimizados aumentando o cuidado posto na medição, não podem ser completamente eliminados. Desta forma, os desvios presentes nos valores medidos alteram a função interpoladora que, ao passar pelos pontos, deixa de representar com rigor a função deformada. O efeito amplificador da diferenciação faz com que os erros de medição se manifestem nas funções primeira e segunda derivadas sob a forma de oscilações [30]. Em conclusão, sempre que as medições apresentem ruído, deverá ser escolhida uma função que permita ajustar os pontos medidos e, por introdução de amaciamento, eliminar as oscilações espúrias nas suas derivadas .

As leis físicas que regem a deformação de sólidos elásticos impõem variações suaves na distribuição das tensões, pelo que deverão ser excluídas as funções interpoladoras que, ao ajustarem os valores medidos, não possuam funções primeira e segunda derivadas suaves. Como se pode ver na figura 6.9 a *spline* cúbica é uma das funções em que esse comportamento se manifesta dado que, ao passar por todos os pontos, introduz elevadas oscilações nas suas derivadas. Deve referir-se que zonas com gradientes de deformação também implicam variações na função derivada, mas são facilmente detectadas pela presença, nessa zona, de uma maior densidade de franjas.

Se, *a priori*, for conhecido o andamento da função deformada, podem obter-se funções de ajuste utilizando o método dos mínimos quadrados para, a partir do conjunto de valores, obter um polinómio com o grau pretendido [43]. Desta forma, é garantido um ajuste suave com funções primeira e segunda derivada continuas, sem oscilações, e uma função deformada com o andamento pretendido, ao mesmo tempo que é minimizado o erro cometido nas medições [31]. Em certas situações, coeficientes demasiado elevados em termos não previstos, permitem detectar movimentos de corpo rígido como rotações,

(coeficiente da variável independente), ou translações, (termo independente do polinómio interpolador).

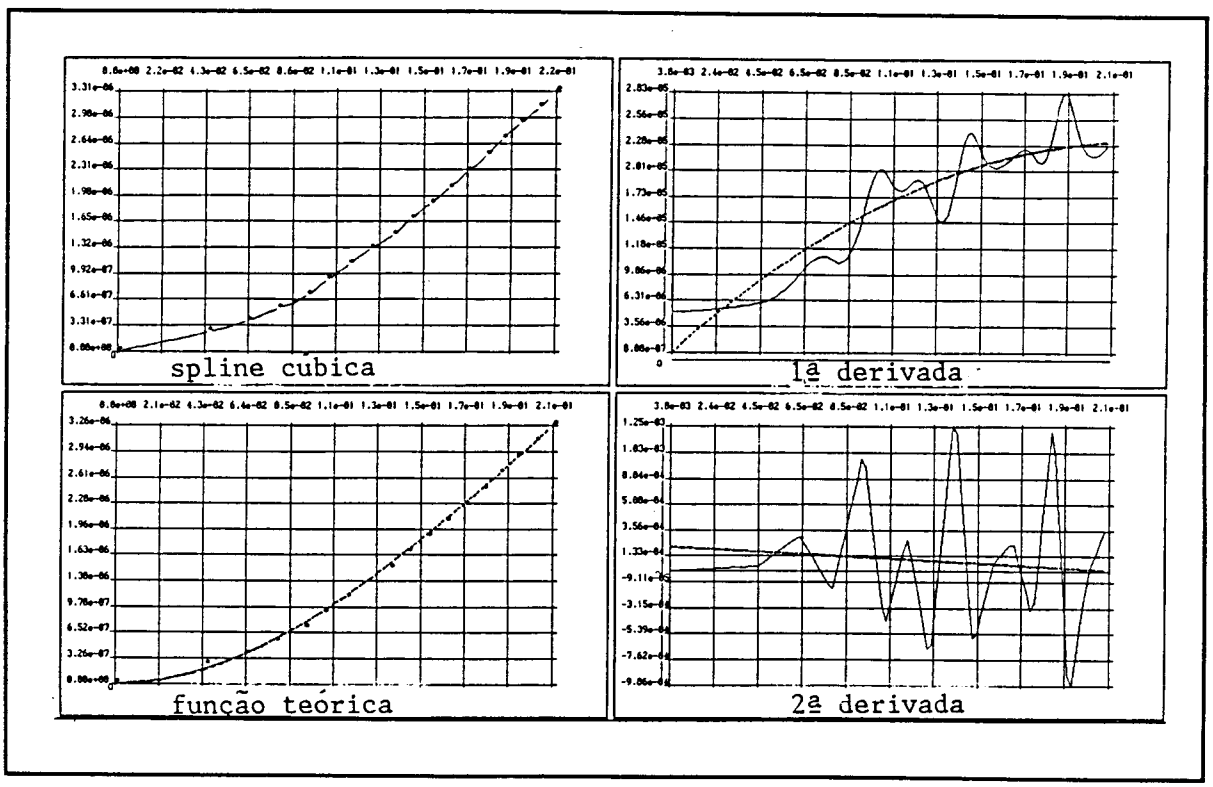


Figura 6.9 Oscilações nas funções primeira e segunda derivadas da função deformada de uma viga em consola, obtida por interpolação com uma spline cubica sobre um conjunto de medições contendo ruído.

Quando a função deformada não é previamente conhecida, deverão ser utilizadas funções que, ajustando os valores medidos, permitam controlar o amaciamento da função. Para esta aplicação, foram sugeridas funções como a polinomial de Bézier [32] ou a β-*Spline* [33] que, não passando necessariamente pelos pontos, permitem ajustar-lhe uma curva de variação suave, respeitando os requisitos necessários, quer em termos de andamento das derivadas, quer no controlo do erro.

As curvas ou superfícies de Bernestein-Bézier, normalmente designadas por curvas e superfícies de Bézier, têm uma definição semelhante à *b-spline* [34]. A função interpoladora é obtida por um somatório de várias funções elementares de configuração conhecida, (polinómios de Bernestein), multiplicadas por coeficientes que dependem da aplicação em causa. O grau da função interpoladora depende do número de funções elementares utilizadas, aumentando a

flexibilidade da função com o aumento do seu grau. A sua utilização nesta aplicação não é muito vulgar, dado envolver um cálculo pesado onde o erro cometido numa medição tem influência em toda a configuração da curva.

Entre as múltiplas configurações possíveis das funções de *spline* [35], encontra-se a função β-*spline* cujas características a tornam bem adaptada a esta aplicação. O algoritmo proposto por Reinsch [36] e [37] permite ajustar uma função contínua a um conjunto de pontos contendo desvios. Neste algoritmo é minimizada a funcional [36]:

$$\int_{x_o}^{x_n} g''(x)^2 dx + p\left\{\sum_{i=0}^{n}\left(\frac{g(x_i)-y_i}{\delta y_i}\right)^2 + z^2 - S\right\} \qquad (6.23)$$

onde $\delta y_i > 0$, $i = 0,\ldots, n$, x_i e $S \geq 0$ são valores conhecidos. Desta forma a função $g \in C^2[x_o, x_n]$ ajusta o conjunto de pontos x_i a partir de um conjunto de valores δy_i fornecidos, que correspondem a estimativas do desvio padrão da ordenada y_i. A constante S é redundante e controla o grau de amaciamento a partir da alteração das quantidades δy_i. Para S=0, obtém-se uma função *spline* interpoladora, enquanto a valores positivos crescentes correspondem graus de amaciamento crescente e a função ajustada tende para uma recta. Esta constante toma normalmente valores no intervalo de confiança definido por:

$$N-(2N)^{\frac{1}{2}} \leq S \leq N+(2N)^{\frac{1}{2}} \qquad N = n+1 \qquad (6.24)$$

em que n é o número de pontos. Na funcional (6.23), onde p representa o parâmetro de Lagrange e z é uma variável auxiliar, é possível controlar a influência de cada um dos pontos na função g alterando os valores δy_i. Embora na situação apresentada na figura 6.10 os valores utilizados para δy_i tenham sido determinados por forma a garantirem que a função ajustada tem um andamento próximo do esperado de acordo com as equações de Elasticidade, em situações mais complexas, envolvendo pontos com grande dispersão, é possível determinar estes valores e, consequentemente, o melhor grau de amaciamento recorrendo a métodos matemáticos conhecidos [38].

Contudo, este algoritmo apresenta uma limitação importante que, em determinadas situações, pode inviabilizar a sua aplicação. Ao impôr que a segunda derivada seja nula em ambas as extremidades, condições de fronteira naturais, Reinsch excluiu todas as situações em que esta condição não seja

verificada. Contudo, os bons resultados que este método permite alcançar tem contribuido para que vários autores o tenham utilizado para este efeito [39] e [40], tendo Berghaus [41] desenvolvido um artificio que permite contornar esta limitação. Este autor propôs que nas extremidades em que a segunda derivada não é nula, a função ajustada pelo algoritmo de Reinsch seja substituida por um polinómio com o grau pretendido, que pode ser obtido por extrapolação a partir de pontos centrais da função. Em extremidades que permitam fazer apelo a condições de simetria, é possível acrescentar pontos com coordenadas bem definidas fora do domínio da função, para garantir que esta ajusta devidamente o conjunto de pontos pretendido, como se pode ver na figura 6.10.

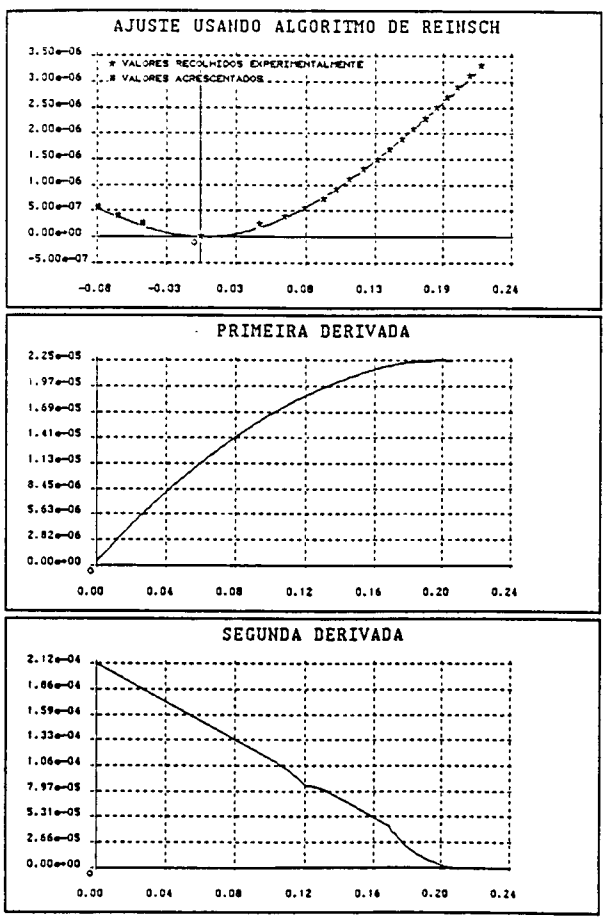


Figura 6.10 Ajuste da função deformada de uma viga em consola utilizando o algoritmo de Reinsch, com introdução de três pontos fictícios que respeitam a simetria da função deformada.

O principal problema da aplicação destas técnicas na obtenção dos deslocamentos reside no seu grau de precisão. É normalmente aceite que o erro cometido na fixação do centro da franja é da ordem de 1/10 de franja [42] e, embora o processo de detecção possa ser melhorado recorrendo ao cálculo numérico efectuado sobre imagens digitais, a precisão obtida é sempre desta ordem de grandeza. A necessidade de recorrer a funções matemáticas interpoladoras para determinar os deslocamentos em pontos intermédios contribui também para diminuir a precisão da medida.

6.3.3.3 Obtenção do campo de deslocamentos a partir de medições contínuas.

A obtenção directa do campo de deslocamentos numa determinada área pode ser efectuada recorrendo às técnicas de modulação de fase. Com estas técnicas obtém-se a distribuição espacial da fase ao longo de uma área do padrão de interferência previamente seleccionada. A conversão dos mapas de fase obtidos na distribuição dos deslocamentos é imediata, dependendo da geometria da montagem e do comprimento de onda da radiação coerente utilizada. Desta forma é possível efectuar medições quantitativas dos deslocamentos com uma precisão que pode ser de uma a duas ordens de grandeza superior à alcançada pelas técnicas de medição discreta referidas anteriormente [42].

A informação obtida é também referida à direcção do vector sensibilidade em cada ponto, devendo a montagem ser orientada por forma a medir os deslocamentos pretendidos. A utilização de feixes colimados em superfícies aproximadamente planas permitirá obter registos interferométricos a que corresponde um vector sensibilidade de direcção constante ao longo de toda a superfície em estudo.

As técnicas de determinação de fase podem ser divididas em espaciais e temporais. Nas primeiras, a distribuição de fase é obtida através de operações efectuadas no espectro das frequências espaciais do padrão de interferência, enquanto nas segundas a determinação de fase é calculada a partir de vários registos contendo o mesmo padrão de interferência, mas desfasados entre si.

Nas técnicas espaciais, o padrão de interferência é codificado numa portadora espacial. A adição de uma frequência espacial ao padrão de franjas

permite isolar espacialmente, no campo das frequências, o espectro que contém a informação. O padrão de interferência é assim convertido numa modulação de fase da portadora, introduzida por rotação da superfície do objecto ou de um dos espelhos utilizados na condução dos feixes. Esta frequência deverá ser superior à do padrão de interferência e ajustada por forma a garantir a completa separação espacial do espectro do sinal.

A distribuição de intensidade do padrão de franjas pode ser descrita pela expressão:

$$I(x,y) = I_o(x,y)\left\{1+\gamma\ (x,y)\cos\left[\Delta\phi(x,y)\right]\right\} \qquad (6.25)$$

onde $I_0(x,y)$ representa o termo contínuo, $\gamma(x,y)$ representa a visibilidade das franjas e $\Delta\phi(x,y)$ a distribuição da diferença de fase caracterizada no padrão de interferência. A expressão (6.25) pode ser substituida por uma equivalente a qual, após a adição da portadora, será representada por:

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos\left[2\pi u_o x + \Delta\phi(x,y)\right] \qquad (6.26)$$

Nesta expressão a(x,y) é o termo médio, b(x,y) é o termo que contém a modulação e u_o representa a frequência espacial da portadora, para um padrão de franjas perpendiculares à direcção x. Esta expressão pode ser reescrita conduzindo a [44]:

$$I(x,y) = a(x,y) + c(x,y)\exp(2\pi j u_o x) + c^*(x,y)\exp(-2\pi j u_o x) \qquad (6.27)$$

onde

$$c(x,y) = \frac{1}{2} b(x,y)\ \exp\left[j\Delta\phi(x,y)\right]$$

e o asterisco (*) indica o complexo conjugado. A transformada de Fourier $\mathcal{I}(x,y)$ da função intensidade I(x,y) será obtida a partir de;

$$\mathcal{I}(x,y) = \mathcal{A}(x,y) + \mathcal{C}(u-u_o,y) + \mathcal{C}^*(u+u_o,y) \qquad (6.28)$$

Se as variações de a(x,y), b(x,y) e $\Delta\phi(x,y)$ forem pequenas quando comparadas com a frequência da portadora, os espectros representados em (6.28), correspondentes às bandas laterais e ao termo contínuo, estarão perfeitamente separados. Na potência espectral (*power spectrum*) da transformada de Fourier bidimensional

do padrão de interferência é seleccionada uma das bandas laterias por ajuste de uma janela com dimensão conveniente. Se o espectro obtido, após a remoção de toda a informação remanescente, for transladado para a origem, eliminando a portadora, e for calculada a transformada inversa $\mathfrak{T}^{-1}(x,y)$, obtém-se a fase pretendida através da expressão:

$$\Delta\phi(x,y) = \operatorname{arctg}\left\{\frac{I[c(x,y)]}{R[c(x,y)]}\right\} \tag{6.29}$$

onde I[c(x,y)] e R[c(x,y)] são, respectivamente, a parte imaginária e real da função c(x,y). A cuidadosa selecção das dimensões da janela a utilizar na filtragem permite também remover ruído presente no padrão de interferência inicial, desde que este possua frequências fora da banda espacial do sinal.

Dadas as caracteristícas da função tangente, a distribuição de fase obtida variará no intervalo $-\pi$ a $+\pi$, pelo que para variações de fase superiores a 2π as descontinuidades deverão ser eliminadas recorrendo a uma rotina de *unwrapping* [45], [46] e [47], que permita desembrulhar a fase. O padrão de interferência representado na figura 6.11 pode ser alterado por adição de uma portadora espacial, figura 6.12. A distribuição de fase do padrão inicial, representada na figura 6.13, pode ser obtida com o método descrito.

Estas técnicas, embora menos precisas que as técnicas temporais, são contudo menos sensíveis a instabilidades na montagem. Utilizando um só registo de intensidade, necessitam de um sistema que permita introduzir uma portadora conhecida para poder levantar a indeterminação de π presente no registo interferométrico

Nas técnicas temporais, a informação de fase pode ser processada electronicamente de forma discreta, técnicas heterodinas descritas no 3º capítulo desta tese, ou analiticamente de forma global nas técnicas quasi-heterodinas [48], vulgarmente designadas por técnicas de modulação de fase. Nestas últimas, são efectuados vários registos do padrão de interferência desfasados entre si, sendo o cálculo da fase em cada ponto efectuado analiticamente a partir dos vários valores da intensidade. Neste caso, a expressão (6.25) é alterada para incluir a diferença de fase introduzida pelo processo de modulação , isto é,

$$I(x,y) = I_o(x,y)\left\{1+\gamma(x,y)\cos\left[\Delta\phi(x,y)+\alpha\right]\right\} \tag{6.30}$$

Esta expressão inclui três incógnitas, a saber, o termo contínuo da intensidade $I_0(x,y)$, a visibilidade das franjas $\gamma(x,y)$ e a distribuição de fase $\Delta\phi(x,y)$. Os valores assumidos pela diferença de fase introduzida pela modulação, representados genéricamente pela constante α, dependem do algoritmo de cálculo utilizado. Dado que o número de incógnitas é três, serão necessários no mínimo três registos para poder determinar $\Delta\phi(x,y)$.

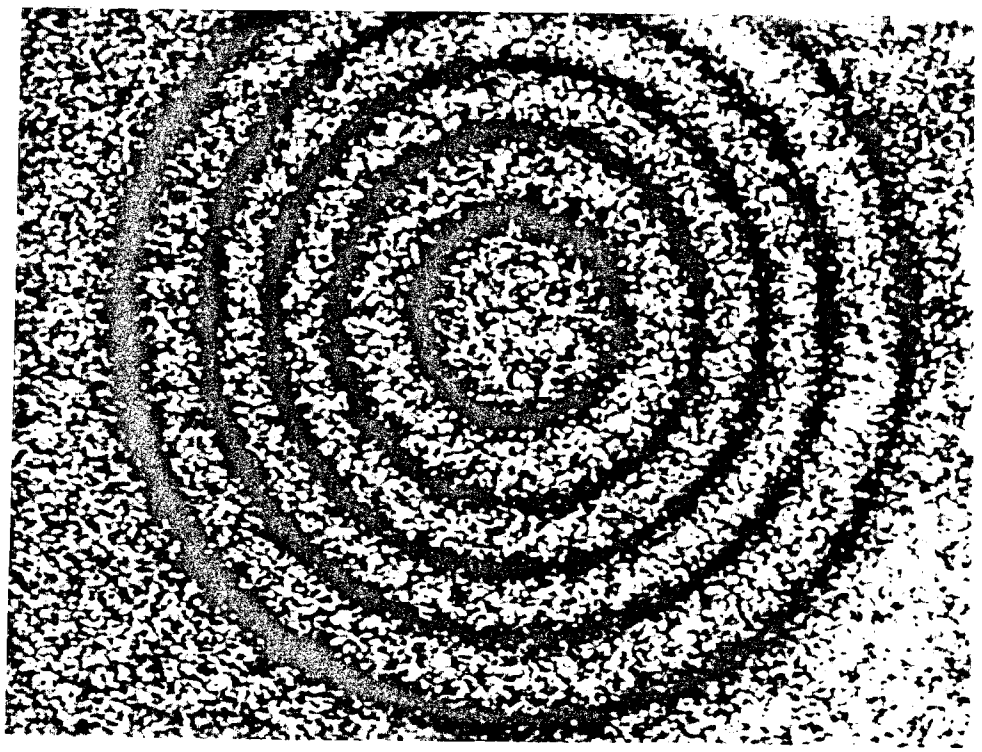


Figura 6.11 Padrão de interferência.

As técnicas temporais, embora conduzam a resultados mais precisos que as técnicas espaciais, são mais sensíveis a instabilidades na montagem. A necessidade de efectuar pelo menos três registos do padrão de interferência pode implicar o recurso a sistemas de estabilização do padrão de franjas em situações com alguma instabilidade [49], ou a inviabilizar de todo a sua utilização quando a estabilidade da montagem não permite manter o padrão de interferência durante o tempo necessário a gravação dos registos.

Na figura 6.14 representa-se uma montagem óptica que permite utilizar técnicas de modulação de fase na determinação quantitativa da fase de um padrão de interferência. A montagem representada possui um sistema de estabilização e

pode ser utilizada com registos interferométricos obtidos por Holografia e por ESPI, sendo a comutação entre as duas montagens efectuada pelo espelho amovível E_1.

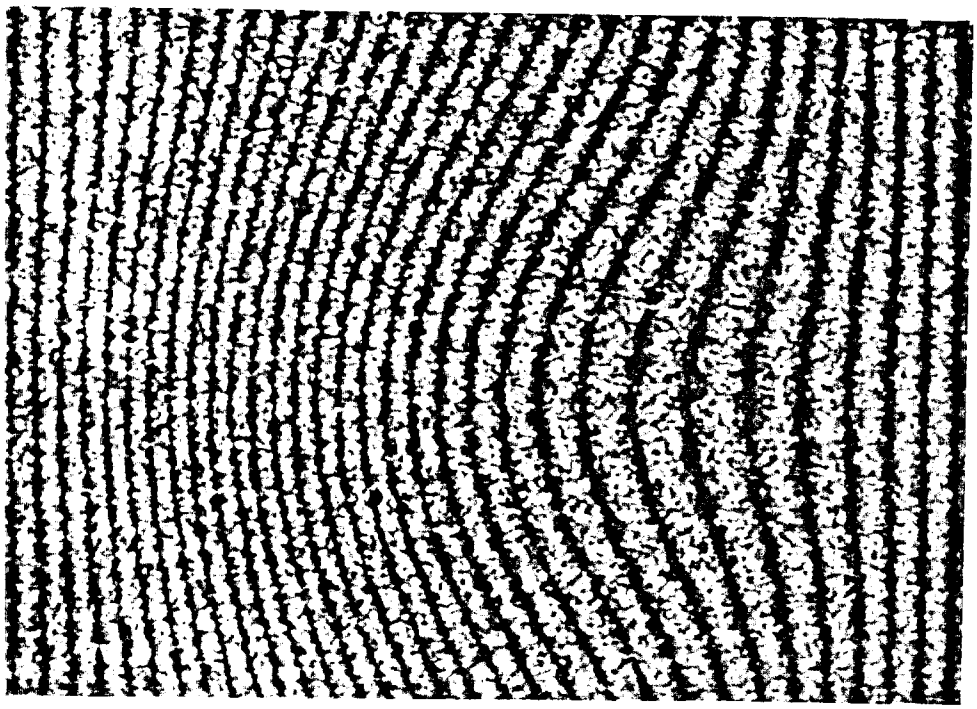


Figura 6.12 Padrão de interferência após a adição de uma portadora espacial.

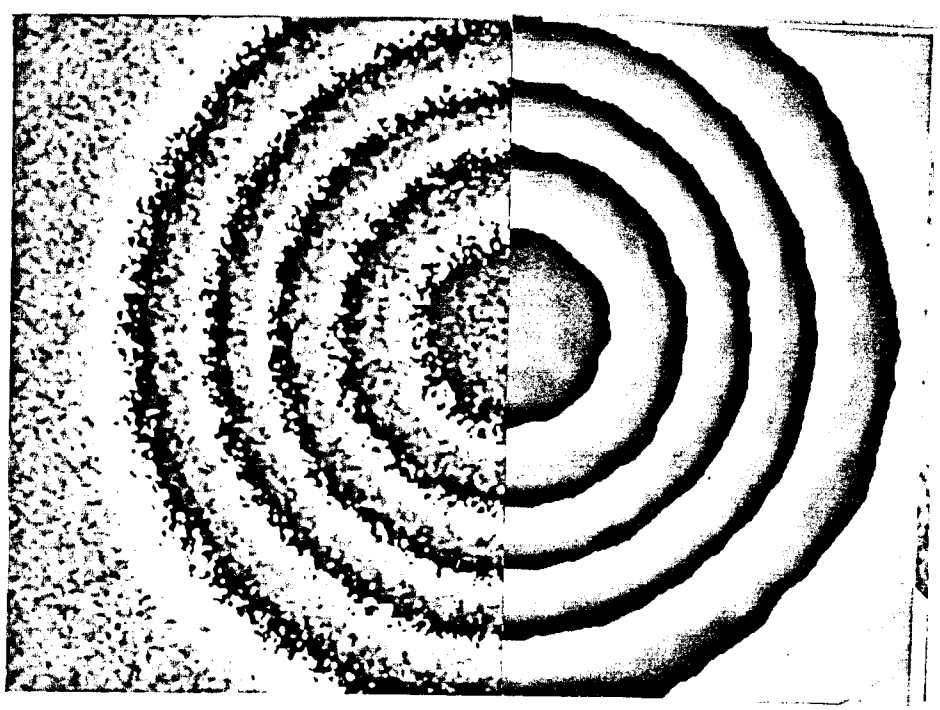


Figura 6.13 Mapa de fase obtido, antes e após filtragem passa-baixo.

A modulação de fase pode ser conseguida de várias formas [42]. No entanto, a mais vulgar consiste na montagem de um dos espelhos utilizados na condução dos feixes sobre um cristal piezoeléctrico. A variação da fase entre registos pode ser realizada em degraus, efectuando o registo após cada desfasamento, ou registando o resultado da integração da intensidade durante os desfasamentos. A integração de intensidade, embora conduza a uma diminuição da visibilidade dos padrões gravados, permite diminuir o tempo de aquisição evitando a necessidade de esperar a imobilização do espelho, quando a comutação é feita em degrau [50].

O espelho utilizado na modulação deverá ser colocado na montagem por forma a garantir que a sua translação não é acompanhada por uma rotação, garantindo que todos os pontos observados sofrem a mesma variação de fase.

Foram desenvolvidos vários algoritmos de determinação de fase utilizando números diferentes de imagens e desfasamentos diferentes entre registos. Estes algoritmos têm também diferente sensibilidade às instabilidades da montagem e aos erros introduzidos na fixação dos desfasamentos por deficiente calibração do sistema de modulação [42].

Um dos algoritmos utiliza o número mínimo de registos necessários, atribuindo a α os valores de $\pi/4$, $3\pi/4$ e $5\pi/4$. Neste caso, substituindo os três valores de α na expressão (6.30), e efectuando algumas simplificações, obtém-se a seguinte expressão para a distribuição da fase [42]:

$$\Delta\phi(x,y) = \operatorname{arctg}\left[\frac{I_3(x,y)-I_2(x,y)}{I_1(x,y)-I_2(x,y)}\right] \qquad (6.31)$$

onde I_i, com i=1,2 e 3, representa a intensidade de cada um dos registos. No caso da variação de fase ser de $2\pi/3$, α toma os valores $-2\pi/3$, 0 e $2\pi/3$, e a expressão anterior é substituida por:

$$\Delta\phi(x,y) = \operatorname{arctg}\left[\sqrt{3}\,\frac{I_3(x,y)-I_2(x,y)}{2I_1(x,y)-I_2(x,y)-I_3(x,y)}\right] \qquad (6.32)$$

Este algoritmo, embora utilize o menor número de registos, implica uma calibração prévia do sistema de modulação de fase.

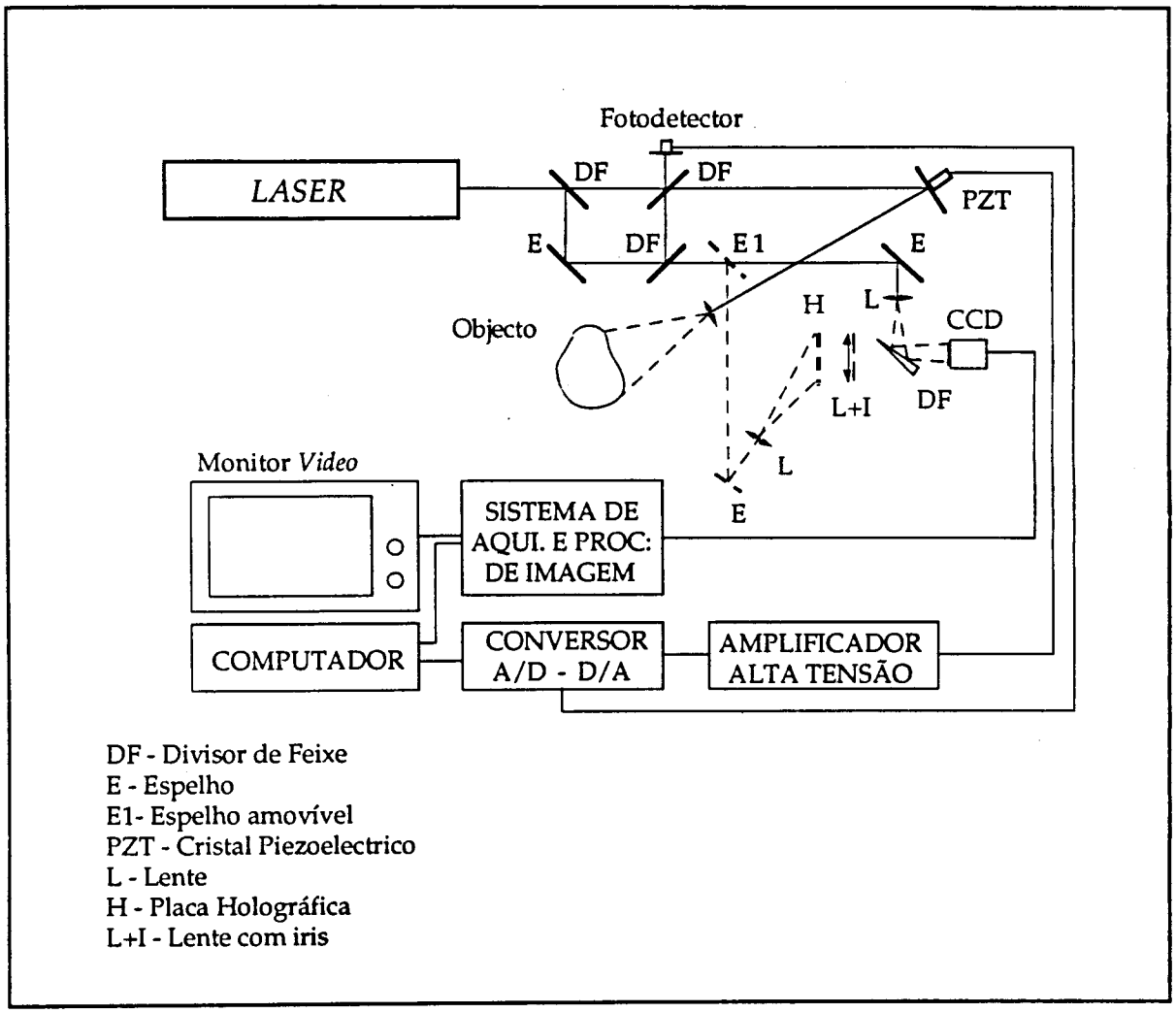


Figura 6.14 Montagem óptica com sistema de modulação de fase que permite a sua estabilização e pode ser utilizado na determinação quantitativa de fase quer com ESPI quer com Holografia.

Quando a montagem não é estável, é importante que os registos envolvidos no cálculo da ditribuição de fase sejam recolhidos o mais rapidamente possível. Wizinowich [56] apresentou um algoritmo envolvendo três registos, em que dois deles estão desfasados de $\pi/2$ e o terceiro é o termo médio da distribuição de intensidade. Neste caso, só os dois primeiros registos são de gravação crítica, podendo o terceiro ser obtido da média entre duas imagens desfasadas de π. Utilizando os dois quadros de uma imagem *video* para gravar os dois registos, é

possível obter imagens com tempos de exposição de 1ms separadas por 1 μs. Este algoritmo é normalmente designado por 2+1 e obtém a distribuição de fase a partir da expressão:

$$\Delta\phi(x,y) = \text{arctg}\left[\frac{I_2(x,y)-I_3(x,y)}{I_1(x,y)-I_3(x,y)}\right] \tag{6.33}$$

Uma engenhosa montagem óptica de ESPI proposta por Pedrini [54], em que o feixe de referência incide no detector CCD da câmera *video* segundo um determinado ângulo, permite obter os três registos com uma só exposição do fotodetector. A leitura alternada das colunas da matriz fotossensível do detector de imagem permite separar os três padrões de interferência que terão diferenças de fase α dependentes do ângulo entre os feixes. Neste caso, a fase pode ser determinada por:

$$\Delta\phi(x,y) = \text{arctg}\left[\frac{I_3(x,y)-I_1(x,y)}{I_3(x,y)+I_1(x,y)-2I_2(x,y)}\right]\tan\frac{\alpha}{2} \tag{6.34}$$

O rigor na fixação da diferença de fase entre registos não infuencia os resultados obtidos se for utilizado o algoritmo proposto por Carré [51], que envolve quatro registos e não necessita que o valor de α seja fixado com rigor. A expressão obtida para este caso é [42]:

$$\Delta\phi(x,y) = \text{arctg}\left[\frac{\sqrt{[3(I_2-I_3)-(I_1-I_4)][(I_2-I_3)+(I_1-I_4)]}}{(I_2+I_3)-(I_1+I_4)}\right] \tag{6.35}$$

Nesta expressão, as intensidade I_i são também funções de (x,y). No entanto, essa indicação foi omitida para não tornar a expressão demasiado extensa. Evitando os erros resultantes da calibração do sistema de modulação, este algoritmo é no entanto mais sensível à instabilidade da montagem.

Se os valores de α forem fixados em 0, $\pi/2$, π e $3\pi/2$, como sugerido por Wyant [52], obtém-se uma expressão bastante mais simples para o cálculo da fase,

$$\Delta\phi(x,y) = \text{arctg}\left[\frac{I_4(x,y)-I_2(x,y)}{I_1(x,y)-I_3(x,y)}\right] \tag{6.36}$$

Ao utilizar diferenças de fase múltiplas de $\pi/2$, facilmente conseguidas com a introdução de elementos polarizadores, este algoritmo permitiu a Kwon [53] a construção de uma montagem óptica com quatro câmeras *video* que efectua os quatro registos em simultâneo, eliminando os erros introduzidos por instabilidades.

Quando a montagem óptica é suficientemente estável, e se pretende minimizar os erros introduzidos por uma deficiente resposta do sistema de modulação, pode recorrer-se ao algoritmo proposto por Hariharan [55]. Utilizando cinco registos desfasados de -2α, $-\alpha$, 0, α e 2α com α próximo de $\pi/2$, obtém-se a distribuição de fase a partir da expressão,

$$\Delta\phi(x,y) = \text{arctg}\left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1}\right] \qquad (6.37)$$

Esta expressão conduz a erros bastante reduzidos, mesmo quando o desfasamento imposto não é exactamente de $\pi/2$ (segundo os autores deste algoritmo, a um erro de 2° no desfasamento, corresponde um erro na determinação da diferença de fase de ±0.02°).

Em situações envolvendo montagens com pequenas instabilidades, estas podem ser utilizadas na modulação de fase [57]. Neste caso, o número de registos envolvidos é bastante maior (10 ou mais), sendo necessário que o desfasamento entre eles corresponda a um varrimento de 2π. Neste caso, a diferença de fase em cada ponto é obtido a partir da expressão:

$$\Delta\phi(x,y) = \arccos\left[\frac{I_i - I_o}{\gamma I_o}\right] \qquad (6.38)$$

onde o termo médio I_o e o termo contendo a modulação γI_o são obtidos analiticamente a partir dos registos efectuados durante o varrimento de fase (normalmente designado por varrimento de máximo/mínimo), e I_i representa a intensidade nesse ponto num registo previamente gravado. Este algoritmo revela-se bastante útil em situações envolvendo deslocamentos provocados por variação de temperatura, mas pode ser também utilizado noutras situações usando um sistema de modulação de fase para introduzir os desfasamentos entre os registos.

Referências.

[1] Araújo, F. C. ; "Elasticidade e Plasticidade", (edição do autor), Imprensa Portuguesa,1962

[2] Runge, C., Z. Math. Phys., Vol.56, p. 225, 1908 , (Citado por Timoshenko, S.P., Goodier, J.N. "Theory of Elasticity", McGraw-Hill, 3rd edition, 1982).

[3] Reedy, J.N.; "An Introduction to Finite Element Method", McGraw-Hill, International Edition, Singapore, 1984.

[4] Bathe, K. J. "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, 1982.

[5] Hughes, T. J. R., "The Finite Element Method", Prentice-Hall, 1987.

[6] ADINA Verification Manual ARD 90/9.

[7] Cirne, J.M , "Propagação de Ondas de Tensão em Barras de Secção Variável", Tese de Mestrado , SAEM, FCTUC, 1983.

[8] Gomes, J. F. S., "Elastic and Plastic Response of a Chain of Circular Rings to Impact Loading", Ph. D. Thesis, UMIST, Manchester, UK, 1977.

[9] Oñate, "Cálculo de Estructuras por el Método de los Elementos Finitos. Análise Estático Lineal", C. I. M. N. I., Universidade Técnica da Catalunha, Espanha, 1992.

[10] Rilo, N. F. ;"Solicitações Locais em Reservatórios e Tubagens", Tese de Doutoramento apresentada no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra Junho de 1993.

[11] de Melo, F. J. M. Q. , de Castro, P. M. S. T. "A Reduced Integration Mindlin Beam Element for Linear Elastic Stress Analysis of Curved Pipes Under Generalized In-Plane Loading", Computers & Structures, Vol. 43, nº 4, pp. 787-794, 1992.

[12] de Melo, F. J. M. Q. , de Castro, P. M. S. T. "The stress analysis of curved pipes under generalized loading with a reduced integration pipe beam element", (ed. ELSEVIER), 12th SMIRT Conferences on Structural Mechanics in Reactor Technology, MPA, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, 16-20 de Agosto de 1993, paper BO7/5.

[13] Stevens, Y. ; Dhont, W., "Development of A Ring Finite Element Method for Locally Loaded Pressure Vessels and Piping". Seminário de Projecto de Construções Mecânicas orientado por Prof. de Melo, F. J. M. Q. DEMEGI, FEUP Universidade do Porto/University of Ghent, Faculty of Applied Sciences, Programa ERASMUS, Porto, Julho de 1993.

[14] Kato, K.; Lee, N. S. ; Bathe, K. J.; "Adaptative Finite Element Analysis of Large Strain Elastic Response", Computers & Structures, Vol. 47, nº 4/5, pág. 829-855, 1993.

[15] Flügge, W., "Stresses in Shells", Springer-Verlag, 1973.

[16] Zienkiewicz, O. C.; "The Finite Element Method", McGraw-Hill,(3º edição), McGraw-Hill Book Co., England, 1977.

[17] Hinton, E.; Owen, D. R.; "Finite Element Programming", Academic Press, London, 1977.

[18] Chow, S. T.; Lam, K. Y.; "Use of Experimental Influence Coefficients and Numerical Techniques for Vibration of Plates and Beams",Proc. FEMCAD 88, Organizado por Institute for Industrial Technology Transfer, Paris 17 a 20 de Outubro de 1988.

[19] Lam, K. Y.; Chow, S. T.; " A Combined Holographic-Finite Element Analysis Package for Vibrating Studies", Proc. FEMCAD 88, Organizado por Institute for Industrial Technology Transfer, Paris 17 a 20 de Outubro de 1988.

[20] Gilbert, J. A.; Dudderar, T. D.; Matthys, D. R.; Johnson, H. S.; Franzel, R. A.; "Two-Dimensional Stress Analysis Combining High-Frequency Moiré Measurements with Finite-Element Modeling", Experimental Techniques, pág. 24- 28, Março 1987.

[21] Weathers, J. M.; Foster, W. A.; Swinson, W. F.; Turner, J.L.;"Integration of Laser-Speckle and Finite-Element Techniques of Stress Analysis", Experimental Mechanics, pág. 60-65, Março 1985.

[22] Engelstad, M. J.; Chambless, D. A.; Swinson, W. F.; Turner, J. L.; "Hybrid Stress Analysis of Vibrating Plates Using Holographic Interferometry and Finite Elements", Experimental Mechanics, pág. 23-30, março 1987.

[23] Kobayashi, A. S.;"Hybrid Experimental Numerical Stress Analysis", Experimental Mechanics, pág. 338-347, Setembro 1983.

[24] Chousal, J. A. G. ; "Processamento de Imagem na Intrepretação de Franjas Interferométricas em Análise Experimental de Tensões", Tese de Mestrado apresentada no Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1991.

[25] Pancewicz, T.; "Application of Computer-Aided Fringe Pattern Analysis in Investigations of Mechanical Phenomena by use of Optical Methods", Proc. da "9th International Conference on Experimental Mechanics", pág. 2019-2028, Copenhague, 20-24 de Agosto de 1990.

[26] Mnatsakanyan, E. A.; Nefyodov, S. V.; "Skeletonizing of Interferometric Images for Finding Maximun and Minimum Centers of Fringes", Proc. SPIE; Holographic Interferometry and Speckle Metrology"; 5-8 Nov.; Baltimore, pág. 351-355, 1990.

[27] Button, B. L.; Cutts, J.; Dobbins, B. N.; Moxon, C. J.; Wykes, C.; "The Identification of Fringe Positions in Speckle Patterns", Optics and Laser Technology, pág. 189-192, Ago. 1985.

[28] Taylor, L.H.; Brandt, G. B.; "An Error Analysis of Holographic Strains Determined by Cubic Splines", Experimental Mechanics, pág. 543-548, Dez. 1972.

[29] de Boor, C.;" A Practical Guide to Splines", *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 27, Springer-Verlag, New York, 1978.

[30] Brandt, G. B.; Taylor, L. H.; "Holographic Strain Analysis Using Spline Functions", Proc. *ARPA-TRW Sponsored Symp. Eng. Appl. Holography*, pág. 123-131, 1972.

[31] Gerald, C. F. ;"Applied Numerical Analysis", 2ª Edição, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Reading, Massachusetts, 1978.

[32] Sollid, J. E.; Stetson, K. A.; "Strains from Holographic Data", Experimental Mechanics, pág. 208-214, Jun. 1978.

[33] Rowlands, R.E.; Liber, T.; Daniel, I. M. ; Rose, P. G.; "Higher-order Numerical Differentiation of Experimental Information", Experimental Mechanics, pág. 105-112, Mar. 1973.

[34] Bartels, R. H.; Beatty, J. C.; Barsky, B. A.; "An Introduction to Splines for Use in Computer Graphics and Geometric Modeling", Morgan Kaufmann Publishers, Inc. , Los Altos, California 94022, 1987.

[35] Cadete, M. O. C. R., "Sobre Aplicações das Funções "Spline" Polinomiais", Tese de Doutoramento apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 1989.

[36] Reinsch, C. H.; "Smoothing by Spline Functions", Numerische Mathematik, nº 10, pág. 177-183, 1967.

[37] Reinsch, C. H.; "Smoothing by Spline Functions. II", Numerische Mathematik, nº 16, pág. 451-454, 1971.

[38] Craven, P.; Wahba, G.; "Smoothing Noisy Data with Spline Functions", Numerische Mathematik, nº 31, pág. 377-403, 1979.

[39] Segalman, D. J.; Woyak, D. B.; Rowlands; R. E.; "Smooth Spline-like Finite-element Differentiation of Full-field Experimental Data over Arbitrary Geometry", Experimental Mechanics, pág. 429-437, Dez. 1979 .

[40] Rowlands, R. E.; Liber, T.; Daniel, I. M.; Rose, P. G.; "Higher-order Numerical Differentiation of Experimental Information", Experimental Mechanics, pág. 105-112, Mar. 1973.

[41] Berghaus, D. G. ; Cannon, J. P.; "Obtaining Derivatives from Experimental Data Using Smoothed-Spline Functions", Experimental Mechanics, pág. 38-42, Jan 1973.

[42] Creath, K. ;"Phase-Measurement Interferometry Techniques", in *Progress in Optics* (Ed. E. Wolf), Vol. XXVI, Cap. V, pág. 351-391, 1988.

[43] Dhir, K. S. ; Sikora, J. P.; "An Improved Method for Obtaining the General-displacement Field from a Holographic Interferogram", Experimental Mecha nics, pág. 323-327, Jul. 1972.

[44] Judge, T. R.; Quan, C.; Bryanston-Cross, P. J.; "Holographic Deformation Measurements by Fourier Transform Technique with Automatic Phase Unwrapping", Optical Engineering, Vol. 31, nº 3, pág. 533-543, 1992.

[45] Takeda, M.; Ina, H.; Kobayashi, S.; "Fourier-trasform Method of Fringe-pattern Analysis for Computer-based Topography and Interferometry", Journal of Optical Society of America, 72, pág. 156-160, 1982.

[46] Vikhagen, E.; "Non Destructive Testing by Use of TV-holography and Deformation Gradient Calculation", Applied Optics, Vol. 29, nº 1, pág. 137-144, 1990.

[47] Owner-Petersen, M.; "Phase Map Unwrapping: A Comparison of Some Traditional Methods and a Presentation of a New Approach", Proc. SPIE, Vol. 1580, "*Industrial Applications of Holographic and Speckle Measuring Techniques*", pág. 73-82, 1991.

[48] Dändliker, R.; Thalmann, R.; "Heterodyne and Quasi-heterodyna holographic Interferometry", Optical Engineering, Vol. 24, nº 35, pág. 824-831, 1985.

[49] Neumann, D. B.; Rose, H. W. ;"Improvement of Recorded Holographic Fringes By Feedback Control", Applied Optics, Vol. 6, nº 6, pág. 1097-1104, 1967.

[50] Creath, K.; "Phase-Shifting Hologarphic Interferometry", in Holographic Interferometry (Ed. Rastogi, P. K.), Springer-Verlag, Vol. 68, pág. 109-150, 1994.

[51] Carré, P.; "Installation et Utilisation du Comparateur Photoelectrique et Interferentiel du Bureau International des Poids et Mesures", Metrologia, Vol. 2, nº 1, pág. 13-23, 1966.

[52] Wyant, J. C.; "Interferometric Optical Metrology: Basic System and Principles", Laser Focus, pág. 65-71, Maio 1982 .

[53] Kwon, O. Y.; "Multichannel Phase-Shifted Interferometer", Optic Letters, Vol. 9, nº 2, pág. 59-61, 1984.

[54] Pedrini, G.; Pfister, B.; Tiziani, H.; "Double Pulse-Electronic Speckle Interferometry", Journal of Modern Optics, Vol. 40, nº 1, pág. 89-96, 1993 .

[55] Hariharan, P.; Oreb, B. F.; Eiju, T.; "Digital Phase-Shifting Interferometry: a Simple Error-Compensating Phase Calculation Algorithm", Applied Optics, Vol. 26, nº 13, pág. 2504-2505, 1987.

[56] Wizinowich, P. L.;"Phase Shifting Interferometry in the Presence of Vibration: a new Algorithm and System", Applied Optics, Vol. 29, nº 22, pág. 3271-3279, 1990.

[57] Vikhagen, E.; "Nondestructive Testing by Use of TV Holography and Deformation Phase Gradient Calculation", Applied Optics, Vol. 29, nº 1, pág. 137-144, 1990.

[58] Zienkiewicz, O.C.; Bauer, J.; Morgan, K.; Oñate, E.; "A Simple and Efficient Finite Element for Axissymetric Shells"; Int. Journal of Num. Meth. Eng.; Vol. 11, pág. 1545-1558; 1977.

[59] Harris, C. M.; Crede, C. E.(Ed.); "Shock and Vibration Handbook", Vol. 1; McGraw-Hill, Inc.; Estados Unidos da América, 1961.

[60] Gilbert, J. A.; Dudderar, T.D.; Matthys, D. R.; Johnson, H. S.; Franzel, R. A.; "Two-Dimensional Stress Analysis Combining High-Frequency Moiré Measurements with Finite- Element Modeling", Experimental Techniques, pág. 24 -28, Março 1987.

[61] Rilo, N. F.; Vaz, M.A.P.; de Melo, F. J. M. Q.; Gomes, J. F.; " An Assessment of the Stress and Deformation Distribution in Thin-walled Cylindrical Shells Under the influence of local Attachments", Prôc. da 10th International Conference on Experimental Mechanics , Lisboa 18-22 de Julho de 1994, "Recent Advances on Experimental Mechanics", pág. 389-394, 1994.

CAPÍTULO 7

7. APLICAÇÕES

7.1 Introdução

7.2 Análise estática de estruturas

7.2.1 Determinação da deformada de uma placa em consola
7.2.2 Determinação da deformada de uma placa circular
7.2.3 Determinação da deformada de uma tampa de cárter durante a montagem de um vedante
7.2.4 Estudo da deformação de uma guilhotina hidráulica durante o corte

7.3 Análise dinâmica de estruturas com técnicas interferométricas

7.3.1 Análise modal de uma placa rectangular
7.3.2 Análise modal de uma placa circular
7.3.3 Análise modal de um acessório de um motor automóvel
7.3.4. Medição da amplitude dos deslocamentos efectuada sobre uma peça em vibração sinusoidal com recurso a técnicas de modulação de amplitude

7.4 Ensaios não destrutivos de materiais compósitos com *Shearography*

Referências

CAPÍTULO 7

7. APLICAÇÕES.

7.1 Introdução.

Neste capítulo descrevem-se algumas aplicações das técnicas de interferometria holográfica em problemas da Mecânica Estrutural e controlo não destrutivo de materiais. São apresentadas análises estáticas da deformação de estruturas simples, cujas soluções analíticas são bem conhecidas, no sentido de provar o rigor das medições efectuadas com estas técnicas. Como a elevada resolução das medidas efectuadas implica grandes cuidados na estabilização das montagens ópticas, a utilização destas técnicas fora do ambiente laboratorial pode revelar-se problemática. Contudo, sendo tomados os indispensáveis cuidados no controlo do ambiente da montagem utilizada, é possível efectuar medições em estaleiro, como se comprova com um dos trabalhos apresentados neste capítulo.

Sendo estas técnicas utilizadas sem contacto com os objectos a medir, revelam-se bastante bem adaptadas ao estudo de fenómenos dinâmicos em estruturas onde a introdução da massa adicional de um transdutor pode afectar o seu comportamento. Algumas aplicações ao estudo de fenómenos dinâmicos são também apresentadas, começando por problemas de solução bem conhecida e terminando com a análise modal de uma tampa de um motor automóvel.

Os resultados apresentados revelam grandes potencialidades destas técnicas para, isoladamente ou em ligação com os métodos numéricos nas denominadas técnicas híbridas, poderem desempenhar um papel importante na análise do comportamento de estruturas.

7.2 Análise estática de estruturas.

7.2.1 Determinação da deformada de uma placa em consola.

Como primeiro exemplo de aplicação, para demonstrar o rigor das medições experimentais e a sua compatibilidade com os métodos numéricos, foi analisada a deformação de uma placa em consola submetida a um deslocamento conhecido da sua extremidade livre. Para este efeito foi utilizada a holografia interferométrica em tempo real, cuja montagem óptica se representa na figura 7.1.

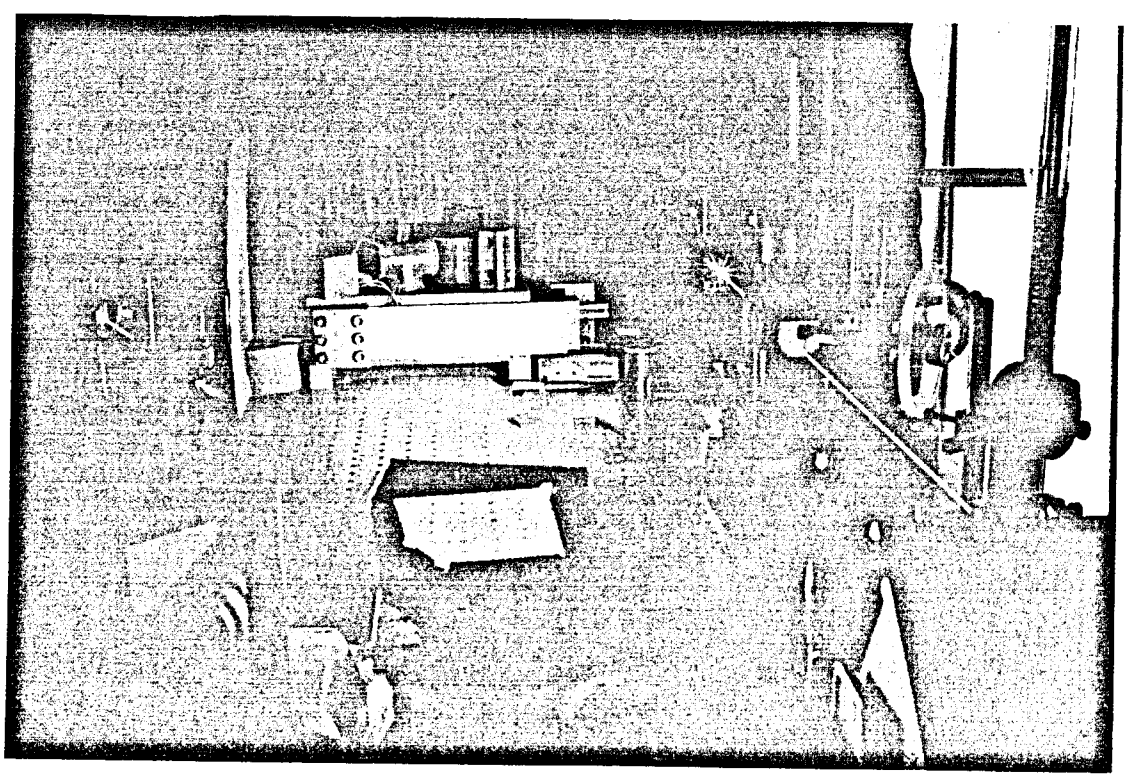


Figura 7.1 Montagem de interferometria holografica para medição da deformada de uma placa em consola.

Os braços do interferómetro foram orientados por forma a que os registos interferométricos obtidos tivessem a direcção do vector sensibilidade coincidente com a direcção do deslocamento, isto é, perpendicular à superfície da placa. Como fonte de iluminação, foi utilizado um *laser* de Árgon COHERENT-INNOVA 90, equipado com um prisma selector de frequência e *etalon* estabilizado em temperatura, dispondo de uma potência máxima em TEM_{oo} de 1.3 Watt, para uma radiação com comprimento de onda λ=514 nm (verde garrafa). Os registos holográficos de fase foram gravados em placas HOLOTEST 8E56 4"x5" da Agfa-Gevaert. A emulsão destas placas é sensível na banda azul-verde, tem uma resolução limite da ordem das 3000 linhas/mm e uma exposição de 0,25 J/m^2, para uma transmitância de 0,5. Os tempos de exposição foram de 6 a 7 segundos e a revelação e branqueamento efectuados de acordo com os processos GP62 e GP432 [1], respectivamente.

Uma das operações mais delicadas na utilização desta técnica é o reposicionamento do holograma que, quando mal executado, conduz a padrões de interferência que nada têm a ver com a informação pretendida. Na figura 7.2 mostra-se um padrão de interferência obtido em tempo real, devido a uma deficiente recolocação do holograma. Para garantir o correcto reposicionamento, foi construído um suporte com 3 superfícies esféricas e 3 superfícies cilindricas de pequeno diâmetro que permite, por acção da gravidade, definir univocamente a posição da placa holográfica [2].

Neste ensaio foi utilizada uma placa de aço de construção St 37 (DIN 17 100) com 0,219x0,058x0,005 m e seis furos numa das extremidades, os quais permitem a sua fixação numa base especialmente construida para esta aplicação. O encastramento é simulado utilizando seis parafusos M6 para apertar a placa entre um bloco de 0,03 m de espessura e o suporte maciço, ambos construídos em aço CK45 (DIN 17 200).

O carregamento aplicado consistiu na imposição de um deslocamento conhecido à extremidade livre da placa. Dada a elevada resolução necessária no controlo do deslocamento, foi utilizado um microposicionador MICRO-CONTROLE UT100.25.PP (resolução de 0,1 μm numa variação máxima de 0,025m e uma capacidade de carga de 50N na direcção e sentido do deslocamento) para deslocar uma base magnética onde se fixou um veio metálico cuja extremidade encostava na superfície da placa. O movimento do posicionador era perpendicular à superfície da placa, no sentido de a aproximar do holograma.

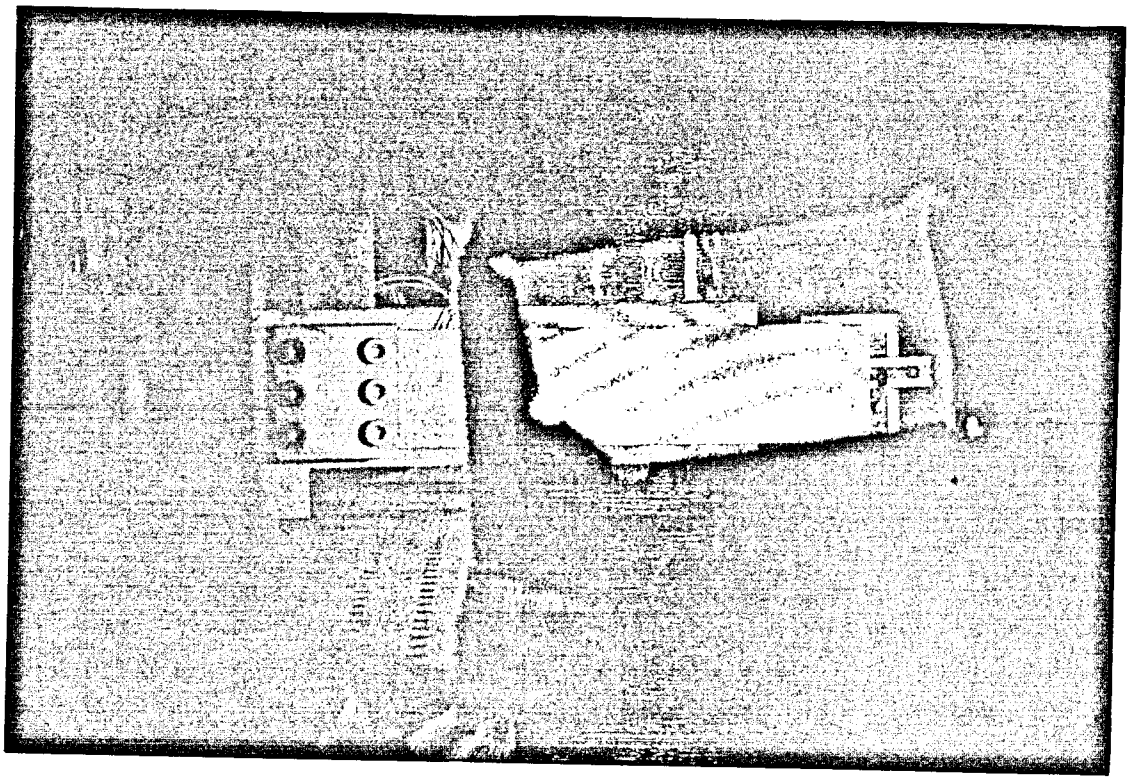


Figura 7.2 Padrão de interferência obtido em tempo real, devido a um reposicionamento deficiente do holograma.

Quer na observação do padrão de franjas, quer no seu registo e análise, foi utilizado um sistema de processamento de imagem apropriado, pelo que a montagem era completada por um microcomputador onde estava instalada uma placa de processamento de imagem ligada a uma câmera e um monitor *video*. Para a análise dos padrões de interferência obtidos, recorreu-se a um conjunto de rotinas de processamento de imagem desenvolvidas especialmente para este efeito no Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) do Departamento de Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia do Porto.

As dimensões da placa permitem a aplicação da teoria de Kirchhoff no estudo da sua deformada. A simetria de carregamento e a sua amplitude permitem que a distribuição das tensões possa ser obtida a partir do conhecimento da deformada da camada média. Por isso, optou-se por utilizar as técnicas experimentais na determinação da geometria da deformada ao longo do eixo de simetria, comum à placa e ao carregamento, e inferir todas as outras

grandezas necessárias à definição do estado de tensão a partir da função obtida para a deformada.

Dada a elevada resolução da interferometria holográfica, toda a montagem experimental foi instalada numa mesa óptica dotada de uma suspensão pneumática, que evita que possíveis vibrações existentes na estrutura do edifício sejam transmitidas aos componentes da montagem. Durante a exposição da placa holográfica, foram controladas possíveis fontes de perturbação susceptíveis de produzir ruído ou criar correntes de convecção no espaço percorrido por ambos os feixes. A título de curiosidade, refira-se que o ruído hidráulico produzido por uma central de bombagem existente no edifício se propagava através do sistema de arrefecimento do *laser*, perturbando a estabilidade da montagem, pelo teve de ser construido um sistema de arrefecimento operando em circuito fechado.

Na figura 7.3 representa-se um dos padrões de interferência obtidos. Neste caso o deslocamento imposto à extremidade livre da placa é de aproximadamente $4{,}6.10^{-6}$ m no sentido do holograma. Os padrões de interferência foram processados recorrendo a rotinas de erosão, para obter o valor mínimo de cada franja ao longo da área em estudo. É assim obtido um conjunto de linhas, representado na figura 7.4, que correspondem ao lugar geométrico dos pontos cujo deslocamento é múltiplo inteiro de $0{,}25 \cdot 10^{-6}$ m.

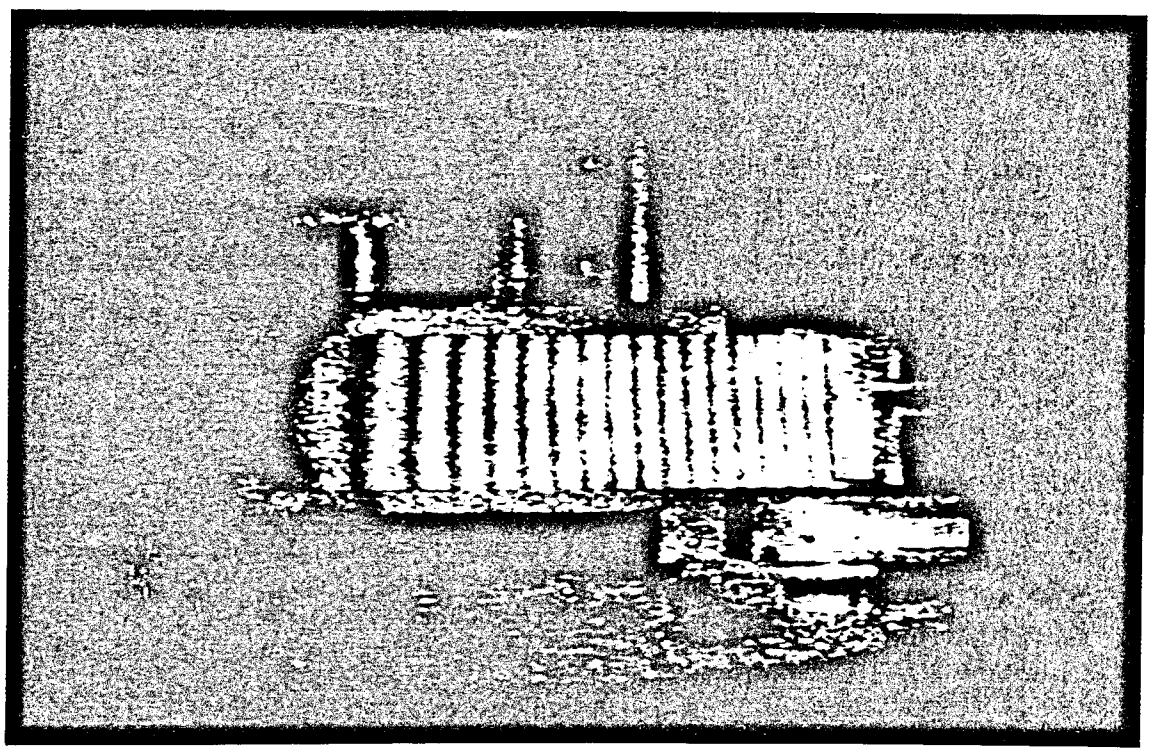


Figura 7.3 Padrão de interferência obtido para um deslocamento da extremidade livre de $\approx 4.6e^{-6}$ m.

O cálculo analítico aproximado da deformada foi obtido recorrendo a integração da equação diferencial da linha elástica que, dada a reduzida dimensão dos deslocamentos, pode, com boa aproximação, ser utilizada na sua versão reduzida, isto é [4];

$$\frac{M}{EI}=\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \qquad (7.1)$$

sendo M o momento flector na direcção perpendicular ao plano da deformada, E o módulo de Young e I o momento de inércia axial da secção recta relativamente ao eixo do momento. Esta equação é válida para uma placa cuja deformada se situa no plano x0y, com deslocamentos segundo a direcção y.

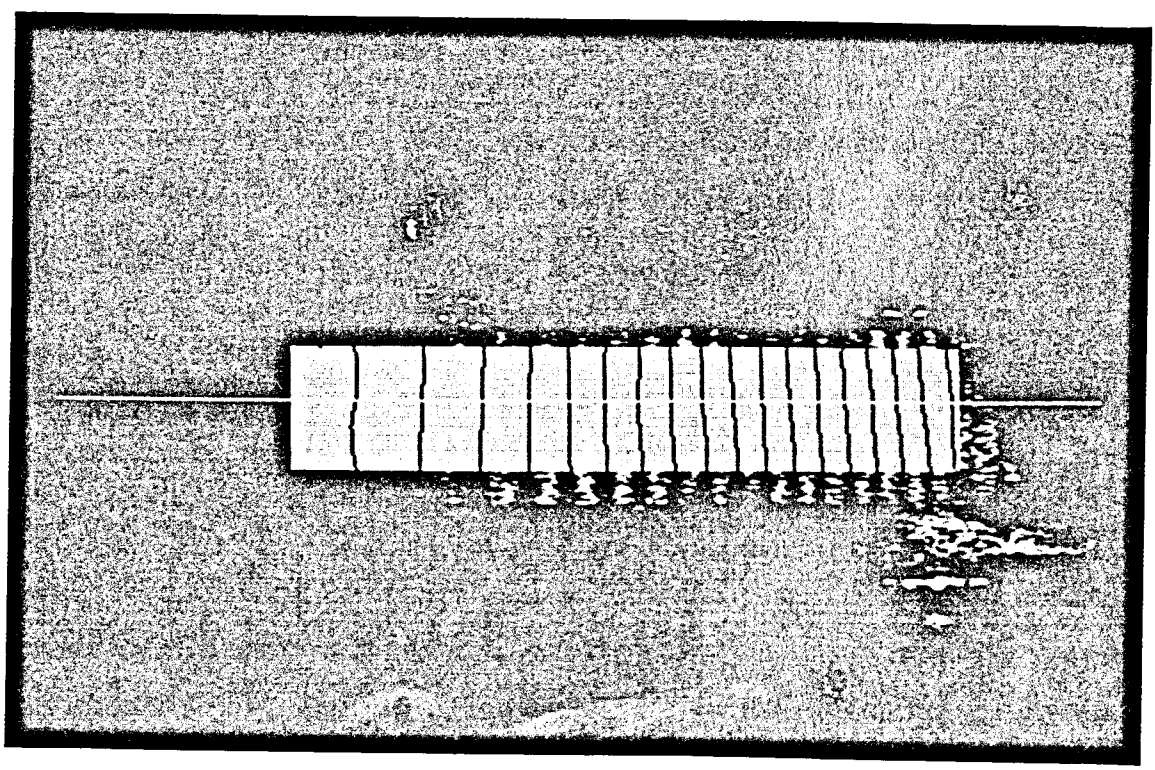


Figura 7.4 Detecção dos valores mínimos de cada franja por aplicação de uma rotina de erosão [3].

Situando a origem do referencial na extremidade fixa da placa e integrando a equação (7.1) obtém-se uma curva cuja equação é um polinómio de grau 3 incompleto que, dadas as condições de fronteira impostas à estrutura, é o seguinte:

$$y = 1{,}4833 .10^{-4}\, x^2 - 2{,}257 .10^{-4}\, x^3 \qquad (7.2)$$

tendo sido utilizado um módulo de Young igual a 210 GPa.

Da figura 7.4 foram recolhidos os deslocamentos segundo o maior eixo de simetria da superfície em estudo, estando os valores obtidos representados graficamente na figura 7.5.

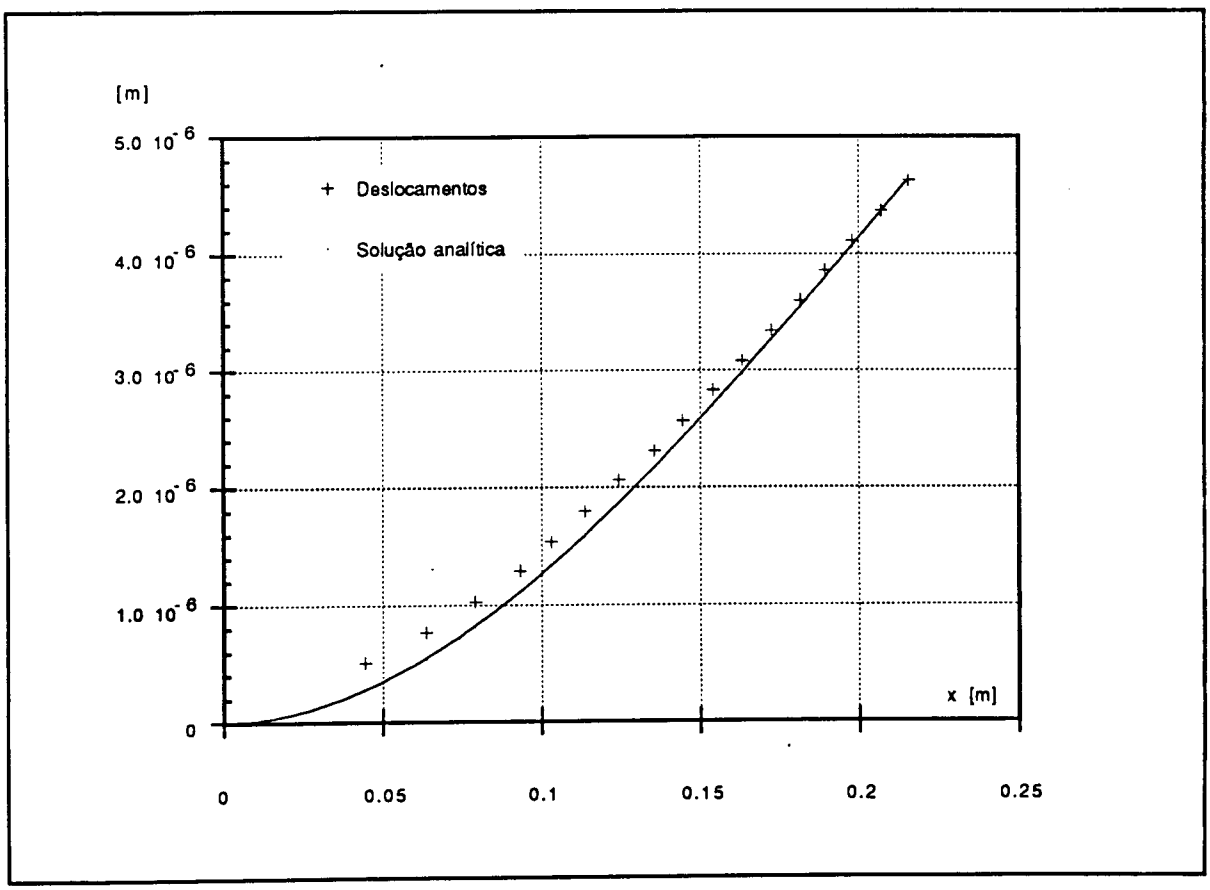


Figura 7.5 Representação gráfica dos deslocamentos medidos ao longo da placa.

Como se conhecia *a priori* o andamento da curva que descreve a deformada, utilizou-se o método dos mínimos quadrados para ajustar um polinómio do terceiro grau ao conjunto de valores, tendo-se obtido a equação;

$$y = 7{,}1830.10^{-8} + 5{,}1328.10^{-6}x + 1{,}0204.10^{-4}x^2 - 1{,}2702.10^{-4}x^3 \quad (7.3)$$
Coeficiente de Correlação = 0,999

Ao comparar o conjunto dos valores resultantes da medição experimental com a curva obtida analiticamente, verifica-se que o erro cometido na determinação do centro da primeira franja é bastante superior ao das restantes. A má definição desta franja e a sua maior largura contribuem para uma maior incerteza na determinação do seu centro, pelo que este ponto foi rejeitado. Ajustando um polinómio do mesmo tipo ao conjunto de valores sem o 2º ponto, foi obtida a seguinte equação:

$$y = 1{,}3748.10^{-8} + 6{,}1447.10^{-6}x + 9{,}6769.10^{-5}x^2 - 1{,}1879.10^{-4}x^3 \quad (7.4)$$
Coeficiente de Correlação = 1,000

A presença de um termo em x sugere a existência de uma rotação de corpo rígido, que se manifesta na figura 7.5, afastando os pontos intermédios da curva teórica. Removendo o termo em x no polinómio (7.4), o que equivale a uma rotação de aproximadamente $6{,}13.10^{-6}$ rad no sentido contrário ao do deslocamento, obtém-se uma curva que segue a equação analítica da deformada com boa aproximação, como se pode constatar na figura 7.6. Destes resultados pode-se concluir que a fixação utilizada não simula perfeitamente o encastramento, pois admite uma rotação de corpo rígido que, no padrão de interferência, aparece sobreposta na deformação elástica da placa.

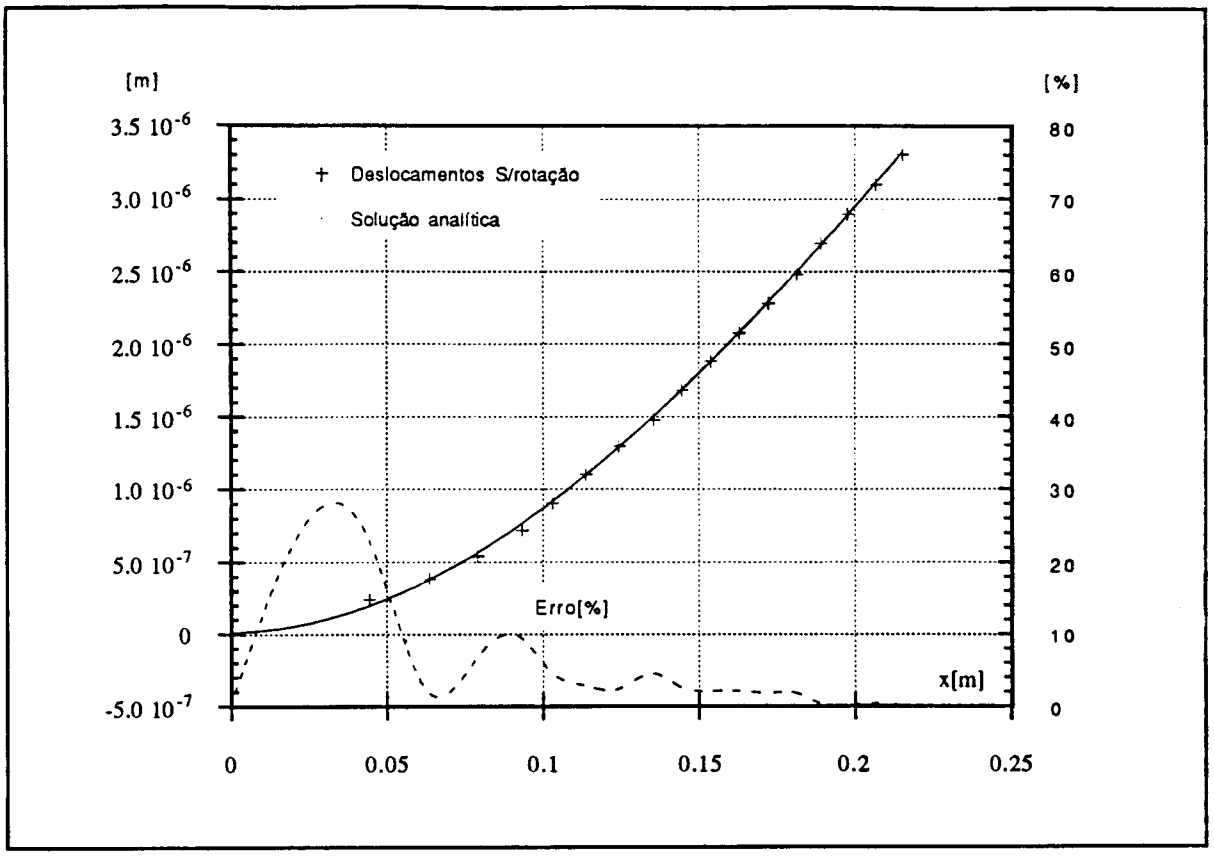


Figura 7.6 Valores experimentais obtidos após remover a rotação de corpo rígido.

Eliminando a rotação de corpo rígido do conjunto de valores medidos e ajustando a esses valores um polinómio semelhante ao obtido pela solução analítica resulta o seguinte polinómio:

$$y = 9{,}886188 .10^{-5} x^2 - 1{,}27638 .10^{-4} x^3 \qquad (7.5)$$

Coeficiente de Correlação = 1,000

Como a 1ª derivada da função deformada corresponde à rotação no plano x0y da normal à secção recta da placa, e essa grandeza é variável nodal em elementos finitos de placa ou casca, a função (7.5) foi derivada em ordem a x. A função resultante é comparada com a derivada correspondente da função (7.4) obtida analiticamente e ambas representadas na figura 7.7.

À semelhança dos deslocamentos, também nas rotações é obtida uma boa concordância entre as soluções analítica e experimental, sendo o erro relativo sempre inferior a 10 %.

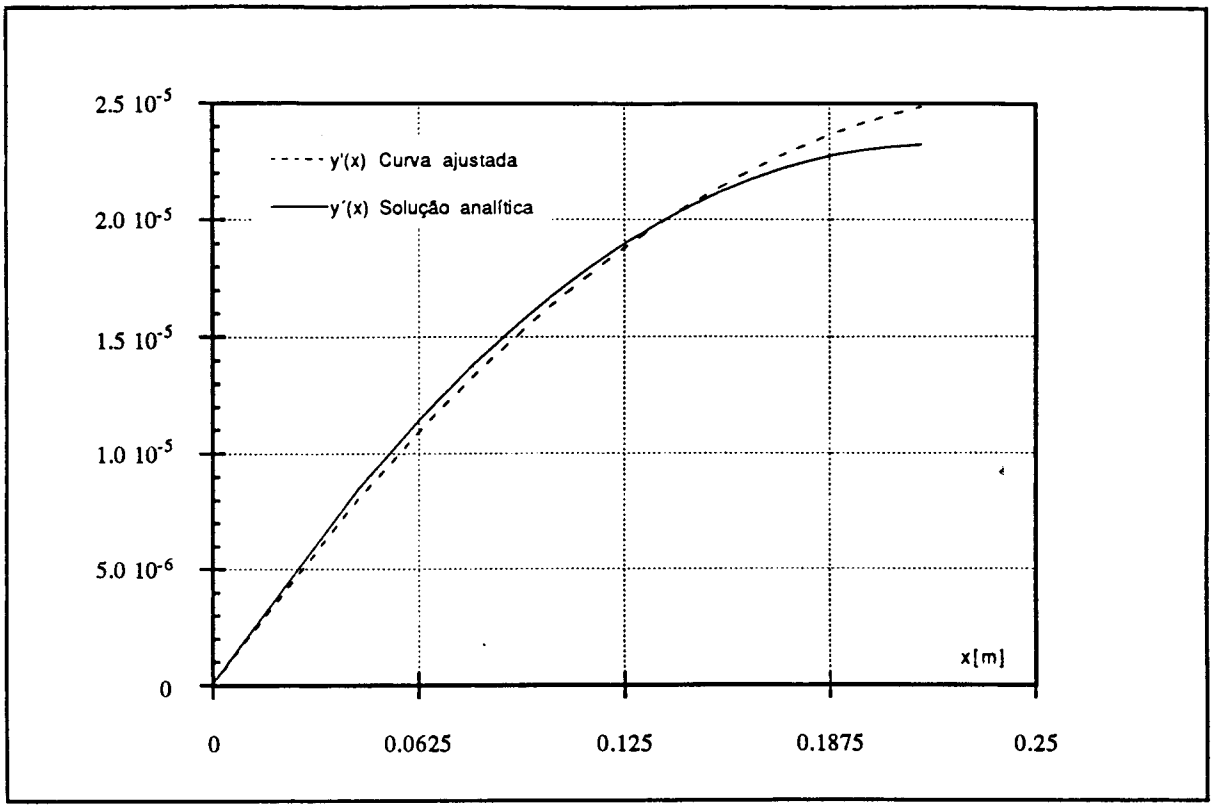


Figura 7.7 Comparação entre as 1ª derivadas da função obtidas analiticamente e do polinómio ajustado ao conjunto de valores.

Tendo acedido à função rotação da normal, pela teoria de deformação de vigas de Kirchhoff, o estado de tensão na direcção axial obtém-se a partir da curvatura da viga:

$$\sigma_{xx} = E\left(\pm z\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right) \qquad (7.6)$$

onde o sinal ± se refere a ambos os lados da superfície neutra. Assim verifica-se que derivando a função rotação se obtém a curvatura da viga que, no modelo de Kirchhoff, corresponde à segunda derivada do deslocamento transversal.

A ampliação dos erros provocada pela dupla derivação constitui um factor adverso deste procedimento, contribuindo para as disparidades entre ambas as funções curvatura da viga, representadas na figura 7.8. No entanto, é importante salientar que há uma boa concordância entre os valores máximos registados na secção de encastramento, secção mais relevante em termos de projecto.

Em síntese, nesta aplicação híbrida existem três procedimentos para obter as tensões na placa:

i) Determinados os deslocamentos ao longo de linhas previamente seleccionadas, obtém-se a função deformada ajustando pelo método dos mínimos quadrados um polinómio com a configuração pretendida. Os deslocamentos nos pontos de uma malha de elementos finitos podem ser obtidos por interpolação a partir destas funções e utilizados como prescrições num programa de elementos finitos tipo placa, casca ou tridimensionais, cuja malha contenha os mesmos pontos seleccionados na medição experimental

ii) Os polinómios ajustados ao conjunto de valores obtidos experimentalmente podem ser derivados sucessivamente, obtendo-se na primeira derivada a rotação e na segunda derivada a curvatura da viga para qualquer secção. As rotações e deslocamentos podem ser utilizados como prescrições nodais numa malha de elementos finitos, sendo este procedimento mais restritivo do que o anteriormente descrito, uma vez que é maior o número de condições numéricas impostas.

iii) Por último, a distribuição de tensões pode ser obtida recorrendo à sua determinação analítica a partir dos polinómios ajustados ao conjunto dos valores experimentais.

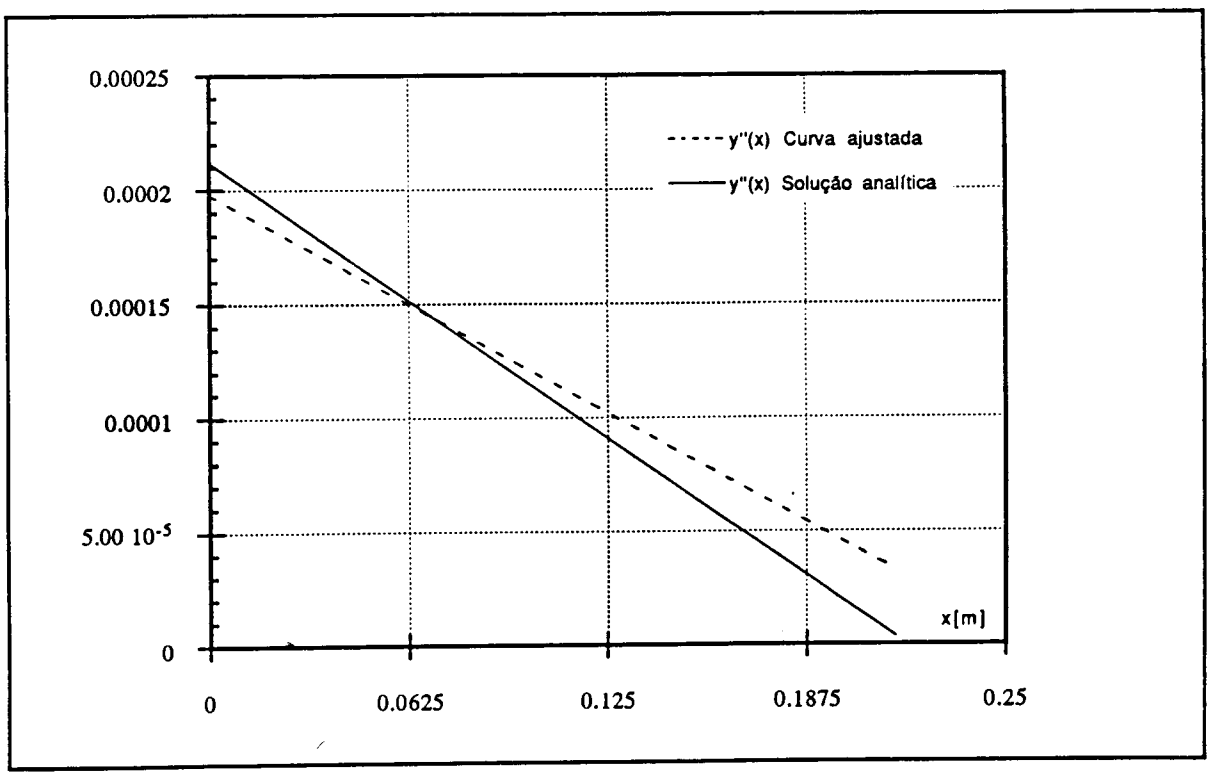


Figura 7.8 Comparação entre as 2ª derivadas da função ajustada e da função obtida analiticamente.

Os valores experimentais, após a correcção, foram comparados com os resultados obtidos pelo método dos Elementos Finitos. Utilizando o código ADINA com elementos de casca de oito nós [5], foram calculados os deslocamentos segundo a direcção normal e as tensões de flexão ao longo da linha média, como se representa na figura 7.9 A placa foi discretizada em 8 elementos, sendo o carregamento simulado por imposição de um deslocamento no nó situado a meio da extremidade livre.

A análise deste problema foi completada recorrendo a rotinas de processamento de imagem que permitem obter a distribuição contínua do deslocamento ao longo de toda a placa. Foram utilizadas técnicas espaciais de determinação de fase que utilizam a transformada de Fourier bidimensional para, no domínio das frequências espaciais, isolar o espectro de frequências que contém a informação correspondente à deformação pretendida. O conhecimento prévio do sentido do deslocamento permite levantar a indeterminação de π e escolher a banda lateral que corresponde a essa deformação.

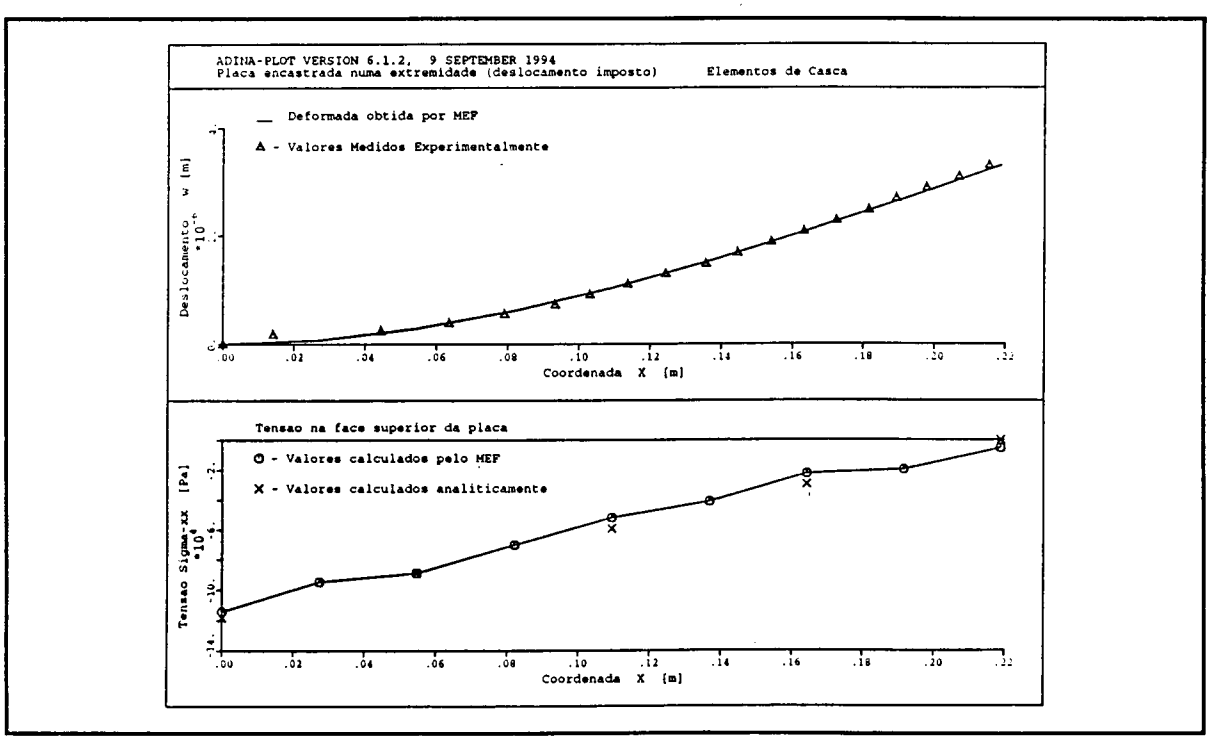


Figura 7.9 Comparação dos valores medidos experimentalmente com os obtidos com o MEF (ADINA).

Quer partindo da análise discreta apoiada na detecção de mínimos, quer utilizando a distribuição contínua de fase, é possível definir os deslocamentos e

rotações em cada um dos nós da malha de elementos finitos. Enquanto o método discreto, referido em primeiro lugar, implica o processamento ao longo das várias linhas definidoras da malha de elementos finitos, no sentido de obter as várias curvas que caracterizam a deformada, o método de fase conduz simultaneamente aos deslocamentos de todos os pontos. O segundo método, embora mais expedito, implica o recurso a rotinas de amaciamento para reduzir o efeito de possíveis erros introduzidos na determinação da fase. A discretização utilizada na recolha da imagem do padrão de interferência , os erros cometidos na modulação de fase [6] e os erros devidos ao processo de cálculo introduzem ruído que é depois amplificado no processo de derivação. Rotinas de filtragem utilizando convoluções ou transformadas de Fourier permitem remover parte do ruído de alta frequência que normalmente aparece associado aos mapas de fase obtidos.

Nas figuras 7.10 e 7.11 apresentam-se os resultados da aplicação das técnicas de fase ao estudo da deformada da placa. Nestas figuras apresenta-se a distribuição espacial de fase e a sua variação ao longo de duas linhas perpendiculares definidas sobre a superfície. Como a resolução desta medida é uma ordem de grandeza superior à da técnica anteriormente referida, é possível revelar pormenores como: a curvatura anticlástica nas secções próximas do encastramento, figura 7.10, ou o desalinhamento do ponto de aplicação da carga relativamente ao eixo de simetria, figura 7.11.

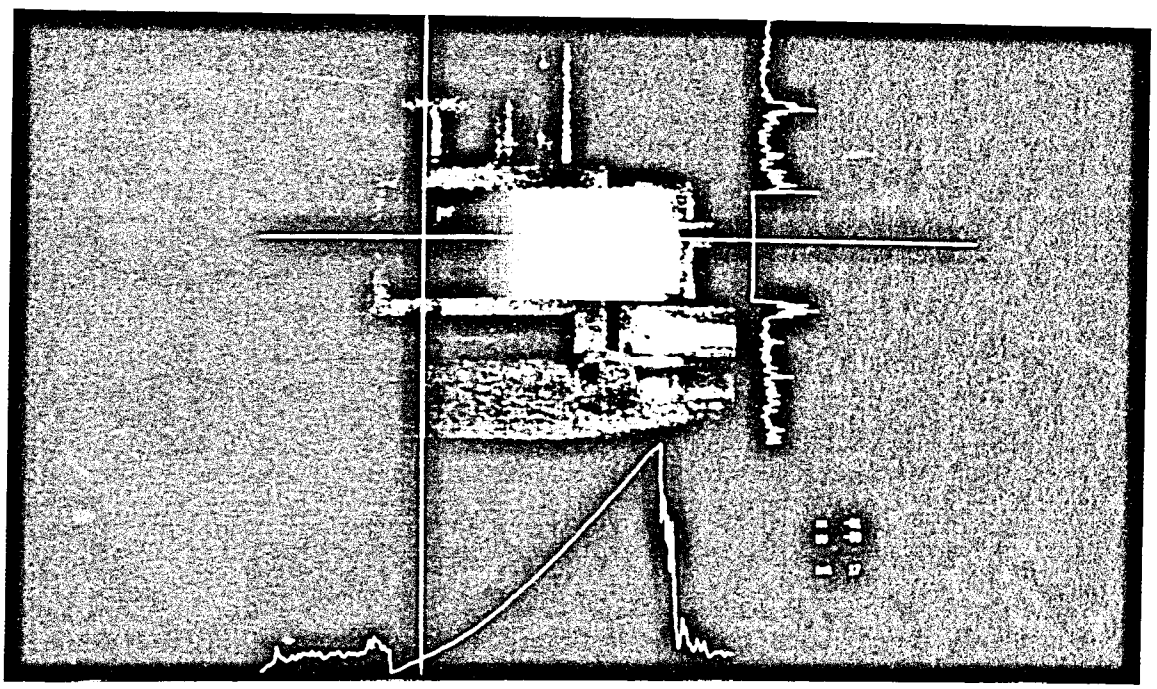


Figura 7.10 Distribuição espacial de fase ao longo da placa. É também representada a variação de fase ao longo de duas linhas perpendiculares que se cruzam sobre um ponto da superfície.

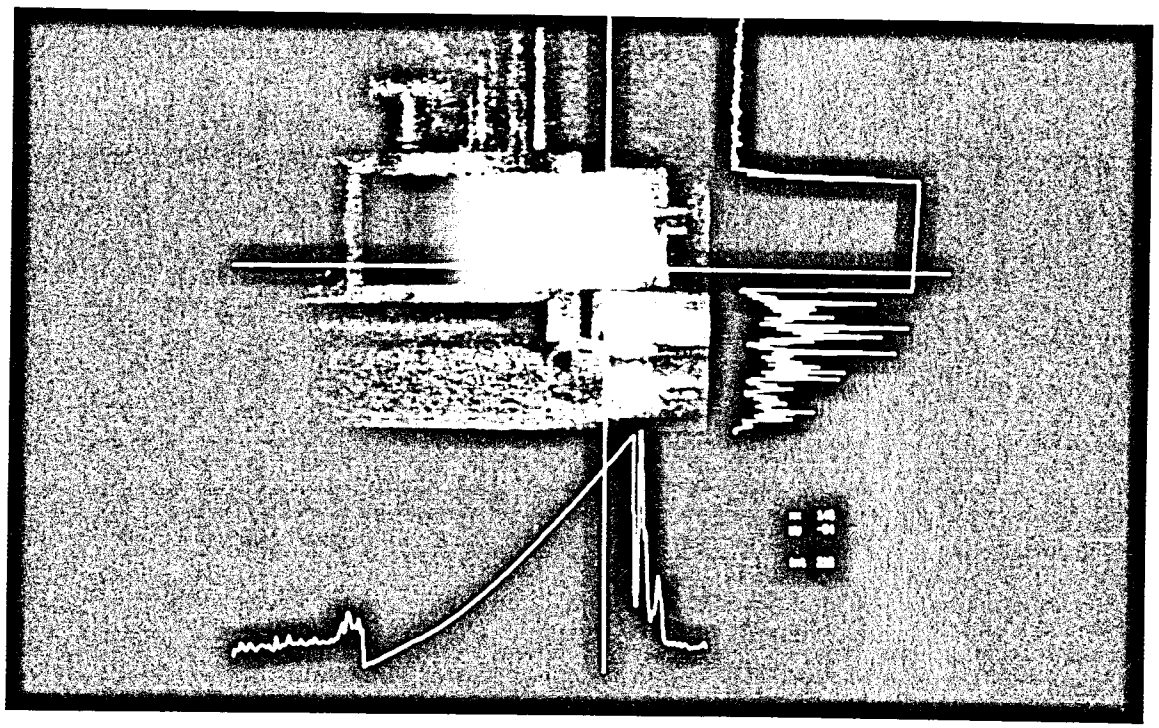


Figura 7.11 Variação de fase ao longo de uma linha transversal próxima do ponto de aplicação da carga.

Os valores determinados por qualquer dos métodos poderão ser utilizados como entradas nas vulgares rotinas numéricas de cálculo de tensões, evitando a resolução do sistema de equações utilizado no método dos elementos finitos para determinar os deslocamentos.

7.2.2 Determinação da deformada de uma placa circular.

Para este ensaio foi construído um suporte em aço CK45 (DIN 17 200) com um anel aparafusado que permite fixar uma placa circular com 0,2 m de diâmetro e de pequena espessura, representado na figura 7.12. Com este suporte é possível simular um encastramento ao longo de todo o bordo exterior de uma placa circular. Esta estrutura axissimétrica pode ser carregada por aplicação de cargas concentradas ou submetendo-a a acção de uma pressão uniforme numa das suas faces. A placa ensaiada, construída em aço St37 (DIN 17 100) com 1,5 mm de

espessura, foi fixada no suporte por aperto dos 12 parafusos M5 sobre o anel de fixação.

Neste caso foi utilizada uma montagem de ESPI com a referência em linha com o feixe objecto e a direcção de iluminação próxima da normal à superfície da placa. A superfície do objecto foi orientada por forma a que o deslocamento tivesse a direcção do vector sensibilidade. Como se mostra na figura 7.13, foi incluido nesta montagem um modulador de fase para permitir aplicar os métodos de fase na obtenção do campo de deslocamentos.

O sistema de processamento de imagem é baseado numa placa DATA TRANSLATION DT 2861, que permite realizar subtracções de 8 bits com rectificação em tempo real e tem capacidade de memória para armazenar até 16 imagens. Esta placa foi utilizada com o interruptor W20 [28] desligado, configuração que selecciona a maior largura de banda para o sinal *video* (4,5 MHz). Deve referir-se que o registo em *video* de uma portadora de *speckle* de um padrão completamente resolvido pode ocupar uma banda com frequências até 5.5 MHZ [7].

Para registar os padrões de interferência foi utilizada uma câmera de *video* monocromática, MICAM HRS *Systemes Sud*, com leitura discreta da intensidade da imagem (h500x v582 *pixels* com a dimensão de 17x11μm). Este tipo de câmeras é vulgarmente designado por CCD (*charge coupled devices*) e possui características que se revelam bastante úteis neste tipo de aplicação. A utilização de um sensor de imagem de reduzidas dimensões operado com tensões baixas (alimentação de 12 V), permite que estas câmeras apresentem construções compactas (64x43x35 mm), o que facilita a sua inclusão nas montagens ópticas. Contudo, a sua resposta linear sem distorção da imagem, a elevada sensibilidade (1 Lux) e a capacidade de desligar o circuito de controlo automático de ganho (CAG) são as características mais importantes na sua utilização no registo dos padrões de interferência. A inclusão de uma lente de campo [8] no sistema formador de imagem permite que seja utilizada uma vulgar lente '*zoom*' na recolha das imagens, com as consequentes vantagens em termos de ajuste da dimensão da área de medição.

O sistema modulador de fase é constituido por um espelho de 10 mm de diâmetro com 1,5 mm de espessura montado sobre um actuador piezoeléctrico linear. Foi utilizado o actuador PZ-30 da BURLEIGH com um curso de 5 μm e uma frequência de resposta até 10 KHz (sem carga) [27].

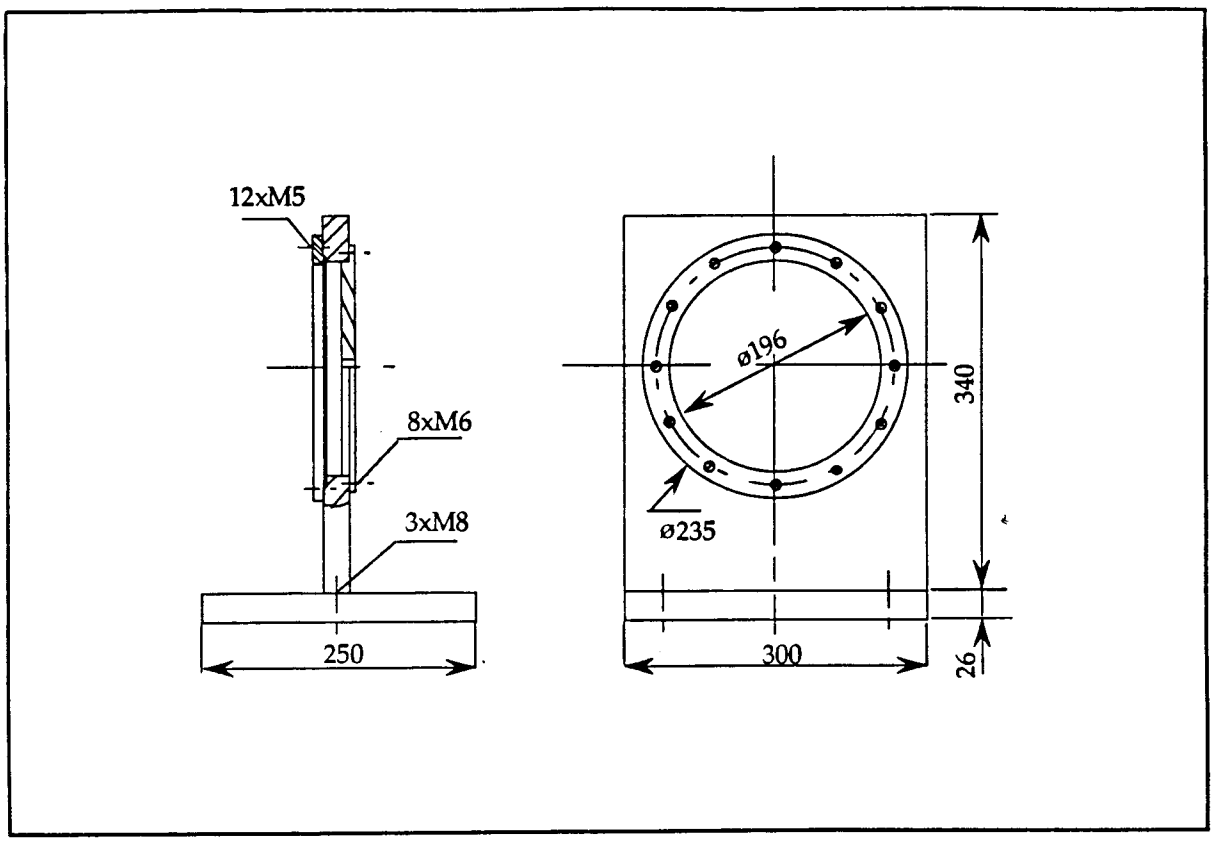


Figura 7.12 Suporte de fixação para placa circular.

A placa circular foi submetida a uma pressão uniforme numa das suas faces enchendo com liquído a cavidade existente no suporte. Um tubo ligado a essa cavidade permite variar a pressão hidrostática sobre a tampa, alterando a altura da superfície livre do líquido.

Depois de registado o padrão de *speckle*, antes da aplicação do acréscimo de pressão, os padrões de interferência foram obtidos por subtracção em tempo real da imagem *video* à imagem gravada. Após estabilizar o padrão de interferência correspondente a uma variação de pressão, eram registados quatro padrões com diferentes diferenças de fase. Para cada carregamento, as alterações de fase entre os feixes eram impostas fazendo variar a tensão de alimentação do actuador piezoeléctrico. Os registos obtidos foram processados em rotinas de determinação de fase, tendo-se obtido a distribuição espacial da diferença de fase induzida pelos deslocamentos devidos à deformação do objecto. Na figura 7.14 representa-se o mapa de fase obtido para uma variação de pressão correspondente a uma altura de coluna de água de aproximadamente 7 mm.

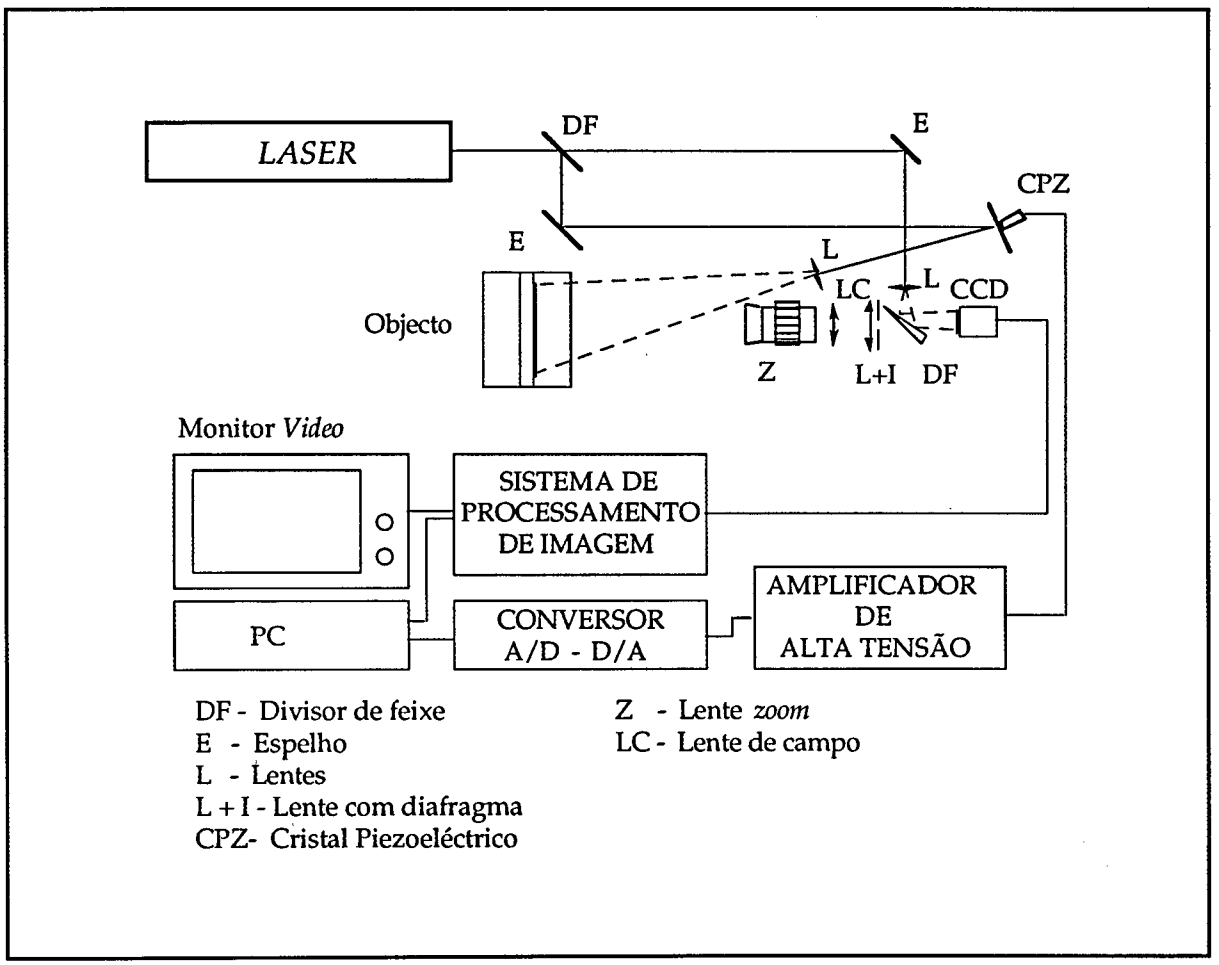


Figura 7.13 Montagem de ESPI com modulação de fase.

Dada a simetria axial da estrutura, foi analisada apenas a deformação ao longo de um raio. Na figura 7.15 está representado o deslocamento ao longo de um raio obtido a partir de um programa de determinação de fase. Os valores calculados para os deslocamentos são comparados com a solução analítica de Kirchhoff para uma placa circular encastrada ao longo do seu contorno exterior e submetida a uma pressão uniforme numa das suas faces. O deslocamento w de qualquer ponto da placa só depende da sua distância ao centro r e pode ser determinado por [9]:

$$w(r) = \frac{q}{64D}\left(a^2 - r^2\right)^2 \qquad (7.5)$$

em que a é o raio e D a rigidez da placa à flexão, obtida a partir de

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\upsilon^2)} \qquad (7.6)$$

onde h representa a espessura da placa circular, E representa o módulo de Young do material e υ o coeficiente de Poisson.

Apesar dos erros introduzidos no processo de cálculo, quer devidos ao controlo da diferença de fase entre os vários registos, quer na discretização do sistema de processamento de imagem, quer ainda pelo próprio cálculo de fase, a concordância entre os valores obtidos experimentalmente e a solução analítica é bastante boa. Uma análise de erros relativos, em que se representa em percentagem o erro em cada ponto, permite verificar que, na maior parte dos pontos, o erro cometido é inferior a 10 %.

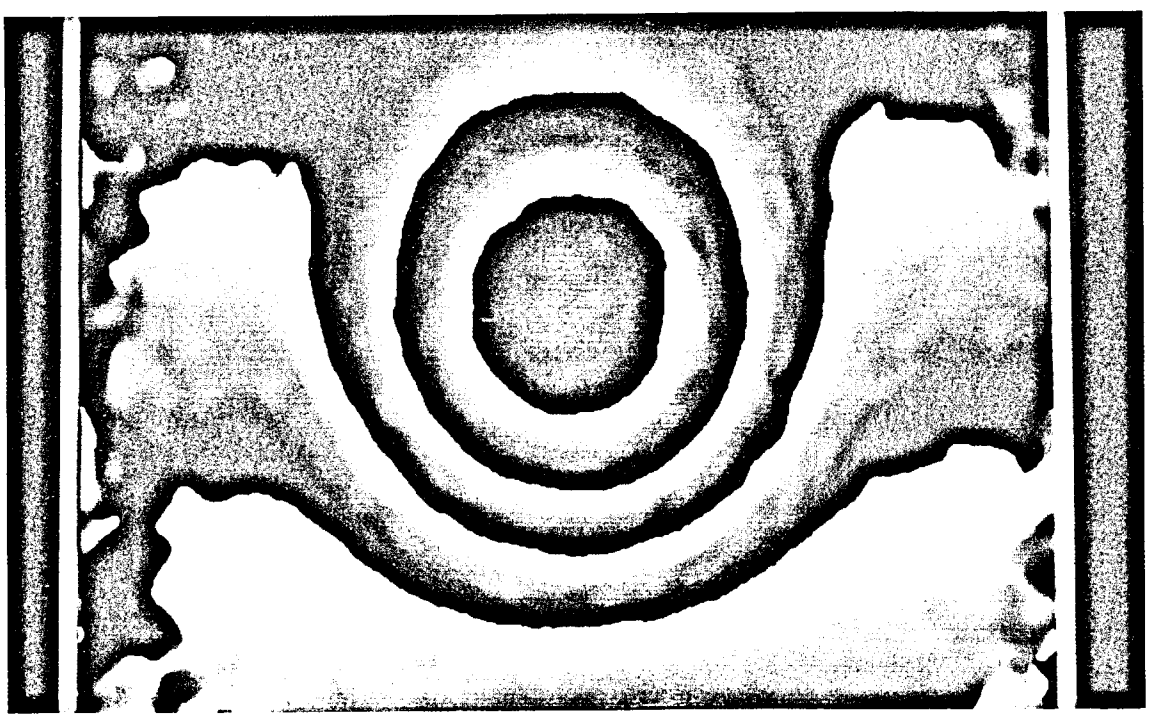


Figura 7.14 Mapa de fase obtido na deformação de uma placa circular encastrada em todo o seu bordo exterior e submetida à acção de uma pressão uniforme. Resultado obtido antes de desembrulhar a fase.

Como é conhecida a solução analítica para a curva que caracteriza a deformada da placa, foi ajustado um polinómio incompleto do quarto grau ao conjunto dos valores experimentais. Utilizando o método dos mínimos quadrados, obteve-se para a deformada a curva seguinte:

$$w(r) = 0{,}01486r^4 - 0{,}00031r^2 + 1{,}5805 \cdot 10^{-6} \qquad (7.7)$$

Este polinómio caracteriza a deformada com boa aproximação, como se pode constatar pela figura 7.16 onde se representam a função ajustada, o conjunto de valores obtidos experimentalmente e os erros calculados com referência à solução analítica.

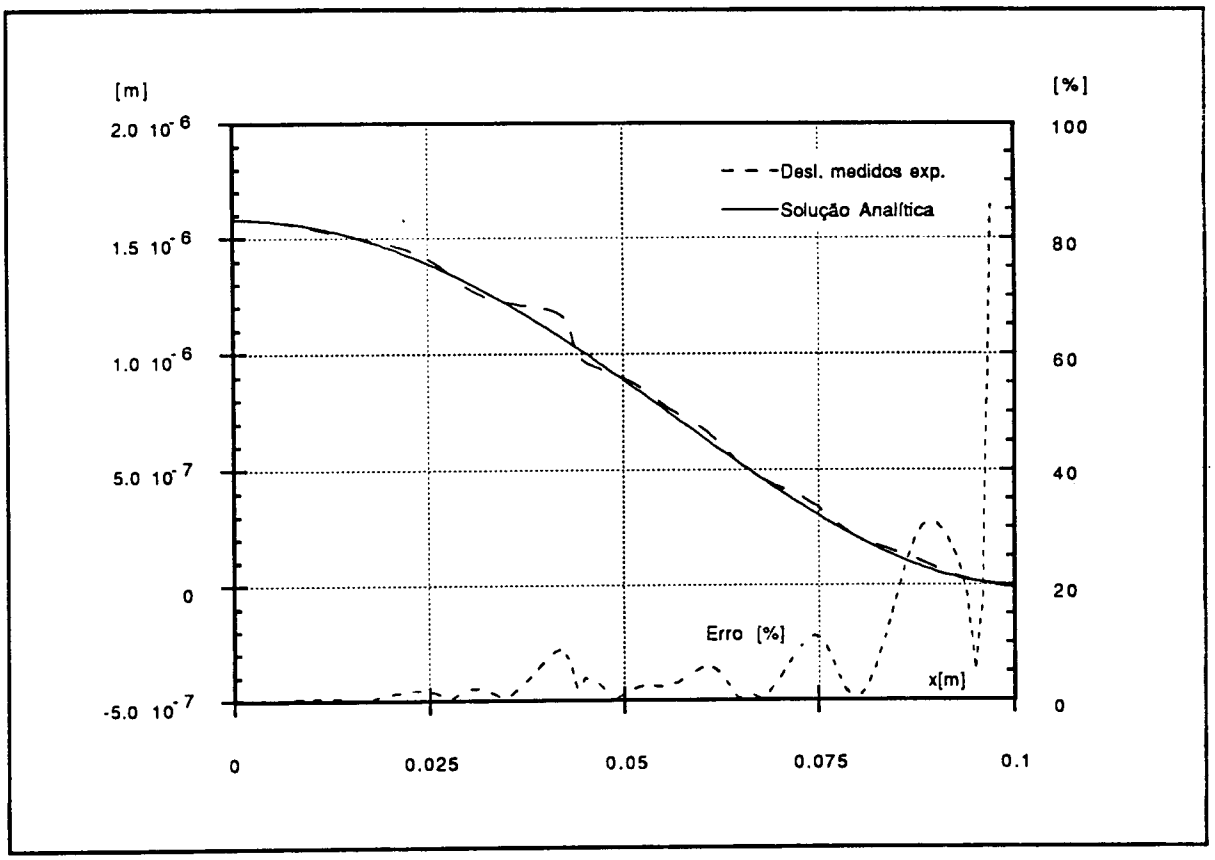


Figura 7.15 Comparação entre os deslocamentos obtidos ao longo de um dos raios e a solução analítica [9].

A função ajustada possui derivadas contínuas semelhantes às correspondentes funções obtidas por derivação da função analítica que caracteriza a deformada radial. Na figura 7.17 representam-se as primeiras derivadas de ambas as funções. Foram também comparadas as segundas derivadas e verificou-se que a concordância entre as funções se mantinha. Na figura 7.18 estão representadas as 2ª derivadas, e pode verificar-se que apenas na proximidade do

encastramento, zona onde o deslocamento tem dimensões próximas da amplitude do erro cometido na medição, se verifica uma ligeira divergência.

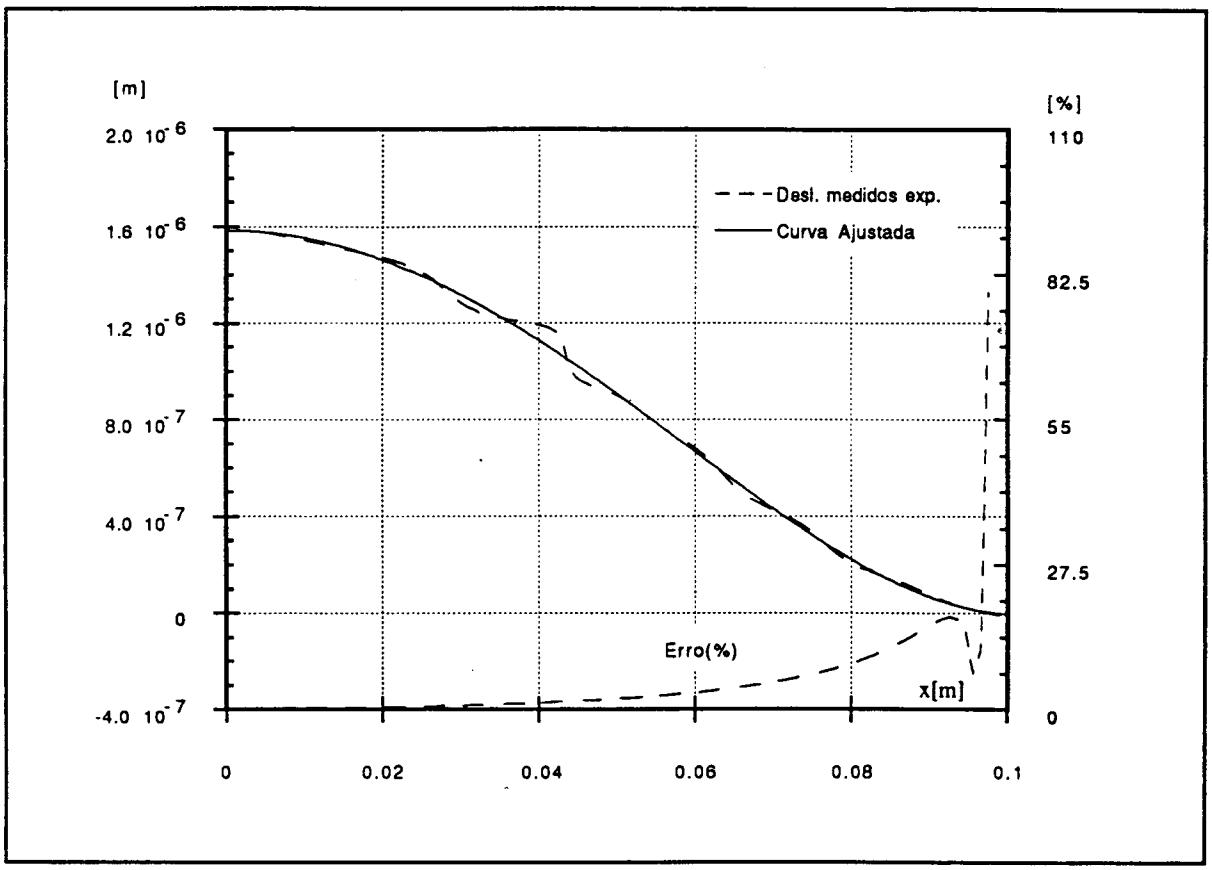


Figura 7.16 Erro cometido ao ajustar um polinómio do tipo $y(x)=Ax^4+Bx^2+C$ ao conjunto de valores medido experimentalmente.

Neste exemplo existe, mais uma vez, a possibilidade de obter a distribuição de tensões a partir de um dos três procedimentos descritos no primeiro caso tratado. Realça-se a vantagem de, com este método, podermos determinar parâmetros estruturais do problema, deslocamentos e respectivas derivadas, convenientemente codificados, por exemplo gravados em *diskette*, facilmente acessíveis a um programa de elementos finitos.

Os registos interferométricos obtidos, embora com menor visibilidade, resultam de um processamento electrónico em tempo real que permite um holograma em cada 40 ms (circuito *video* a 50 Hz). A utilização desta técnica revela-se bastante interessante não só porque permite evitar o processamento químico húmido necessário a revelação das placas holográficas, como torna

possível construir um sistema interferométrico compacto e portátil para análise de estruturas. Neste sistema, todos os componentes ópticos que constituem a montagem interferométrica podem ser alojados numa estrutura rígida de reduzidas dimensões controlada por um vulgar computador pessoal, onde se inclui uma placa de processamento de imagem. As exigências de estabilidade são também aliviadas, uma vez que o tempo necessário à gravação de cada interferograma pode envolver apenas dois quadros video (pouco mais de 40 ms).

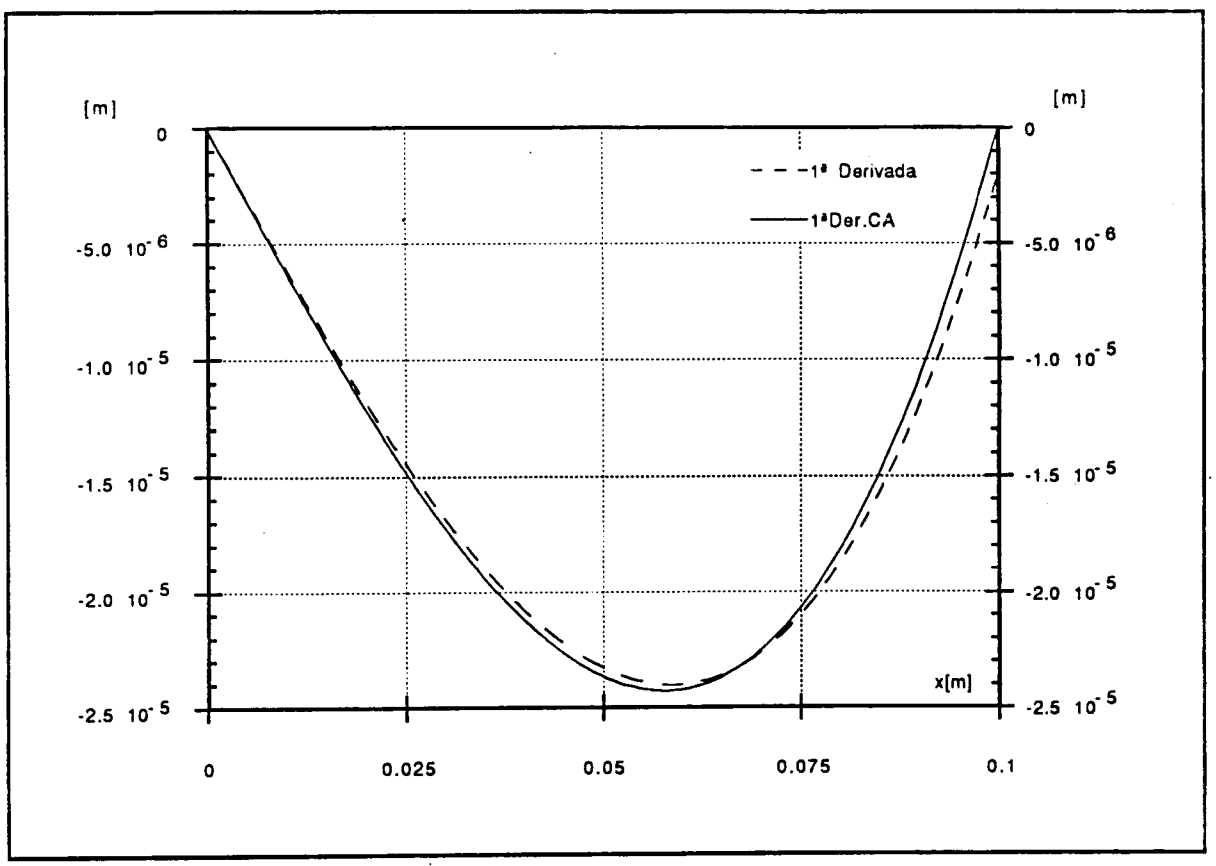


Figura 7.17 Comparação entre as primeiras derivadas da função ajustada e da função obtida analiticamente (CA).

7.2.3 Determinação da deformada de uma tampa de cárter durante a montagem de um vedante.

Os sistema de ESPI descrito anteriormente foi também utilizado na análise da deformada de uma tampa do cárter de distribuição de um motor de

automóvel. O estudo experimental realizado permitiu ajustar um modelo numérico por forma a garantir semelhança entre a solução numérica por elementos finitos e o comportamento real do componente.

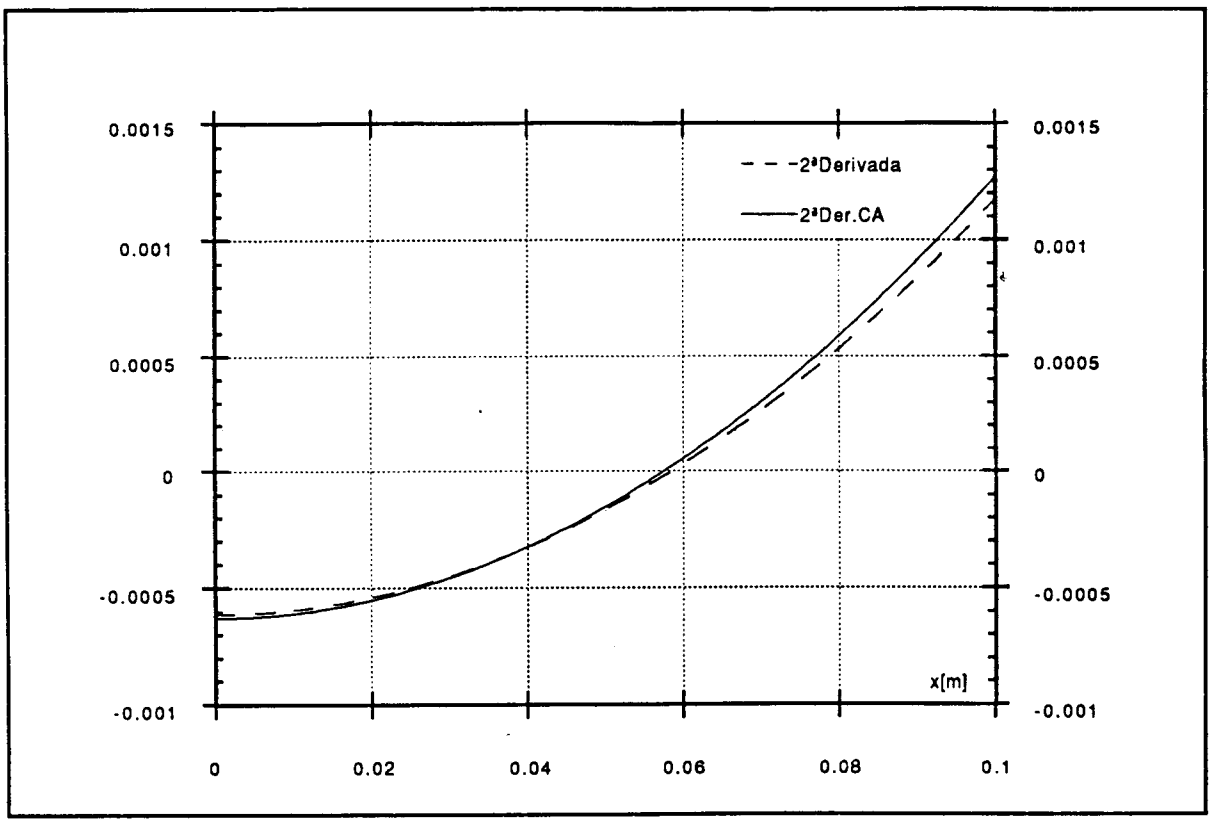


Figura 7.18 Comparação entre a segunda derivada da função ajustada e a segunda derivada da curva correspondente à solução analítica (CA).

Na construção automóvel são frequentemente utilizados componentes obtidos a partir da conformação plástica de laminados de pequena espessura. Normalmente obtidos por embutidura de chapa, estes componentes apresentam tensões residuais que muito influênciam o seu comportamento mecânico. A presença das referidas tensões e a sua geometria, por vezes relativamente complexa, fazem com que a sua simulação numérica implique alguns cuidados na selecção dos modelos matemáticos. Sendo a indústria automóvel extremamente competitiva, quer em termos de preços, quer em termos da qualidade final dos seus produtos, torna-se de vital importância o estudo cuidadoso dos vários componentes a utilizar. O baixo preço dos componentes obtidos a partir de laminados justifica por si só a sua utilização, pelo que o seu

estudo, quer em termos de tensões quer em termos de comportamento dinâmico, se revela de grande importância, principalmente na fase de concepção e projecto. A necessidade de automatizar tarefas de montagem para diminuir os custos de fabrico revela por vezes algumas deficiências que, não influênciando a resistência mecânica do componente, não foram detectadas durante a concepção.

A peça estudada destina-se a proteger a corrente de distribuição usada na transferência do movimento da cambota para veio de excêntricos num motor Renault de 1100 cc. Trata-se de um componente obtido por embutidura profunda em chapa laminada de aço de construção St37 (DIN 17100), com aproximadamente 1.2 mm de espessura [10]. Nesta tampa existe um orificio circular por onde sai a extremidade anterior da cambota, para montagem da polia de comando da bomba de água, como se pode ver na figura 7.19. A parede cilíndrica desse orifício é obtida durante o processo de embutidura e serve de caixa a um retentor de óleo montado automaticamente durante o fabrico do motor.

Foi o aparecimento de uma fuga do óleo de lubrificação do motor, situada no lábio do vedante que encosta na superfície cilíndrica móvel, que desencadeou o estudo da operação de montagem do vedante. Embora se tratasse de uma pequena fuga, só revelada após o motor ter efectuado algumas dezenas de milhares de quilómetros, esta pequena deficiência é incompatível com as actuais normas de qualidade que regem o fabrico de automóveis.

A ferramenta utilizada na montagem do vedante foi alterada por forma a incluir uma célula de carga que permitisse medir a força necessária à montagem. Na figura 7.20 está representada a ferramenta, incluindo a adaptação que permite medir a força de montagem a partir das deformações induzidas por flexão numa placa simplesmente apoiada. Esta placa foi instrumentada com quatro extensómetros ligados em ponte de Wheatstone, por forma a obter um sinal com o máximo de amplificação.

Sobre uma mesa óptica foram reproduzidas as condições de montagem do vedante em frente a uma montagem de ESPI, com o vector de sensibilidade orientado segundo a perpendicular à superfície da tampa. Neste caso foi utilizado um *laser* de He-Ne de emissão contínua com uma potência máxima de 15 mW em TEMoo e um comprimento de onda λ=632,8 nm. Dada a orientação dos componentes ópticos e a radiação coerente utilizada, cada franja de interferência correspondia a um deslocamento de aproximadamente 0,316 μm. O aperto do parafuso utilizado para empurrar a ferramenta, normalmente efectuado por um motor pneumático, foi realizado manualmente. Desta forma evitaram-se as

perturbações introduzidas pelo motor e foi possível controlar com maior sensibilidade o processo de montagem.

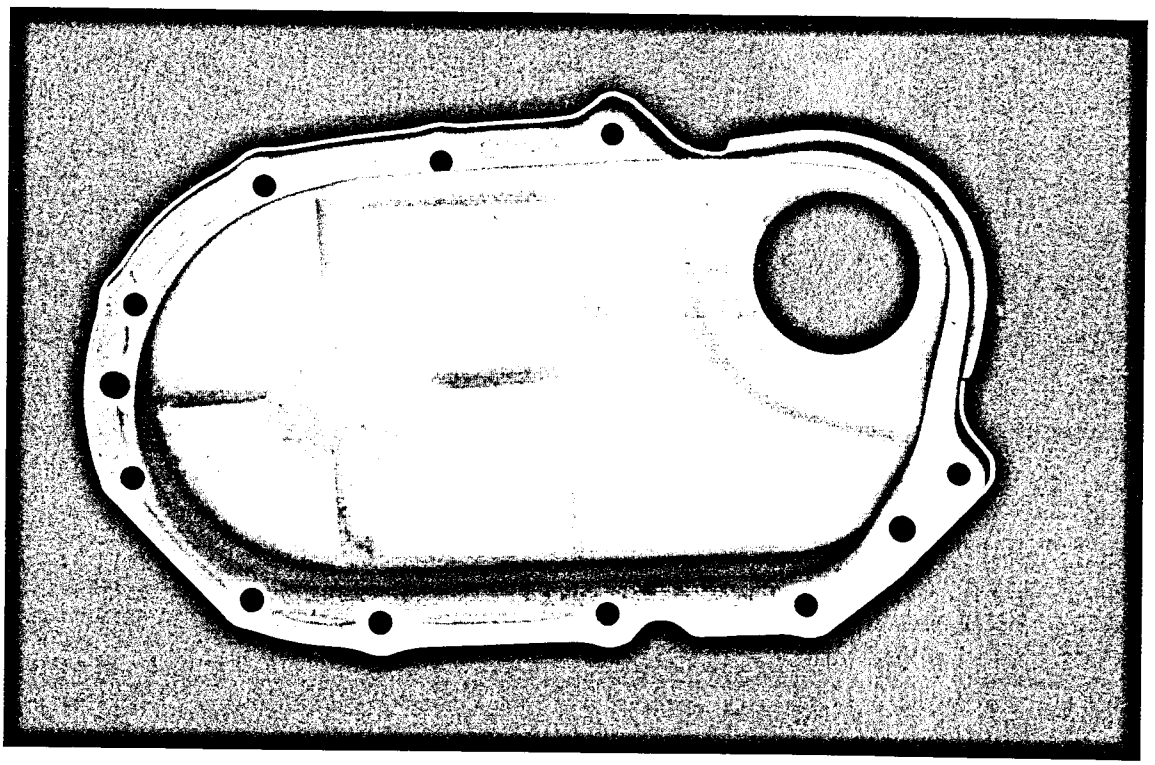


Figura 7.19 Tampa de cárter de motor Renault de 1100 cc.

Com a tampa fixada no bloco por 10 parafusos M5 apertados com o binário recomendado pelo fabricante, foi analisada a sua deformação em tempo real, para vários valores de carga aplicada sobre o vedante. Daqui se pôde concluir que a amplitude da deformação sofrida pela tampa era demasiado grande para ser analisada com referência única. A frequência espacial do padrão de franjas ultrapassava a resolução do sistema de medida, obrigando a actualizações da referência. Deve referir-se que para garantir uma boa modulação do sinal *video* são necessários no mínimo quatro *pixels* por cada franja [11].

A análise dos primeiros padrões de interferência obtidos (ver figuras 7.23 e 7.24) permitiu algumas conclusões importantes. Tratando-se de uma técnica de campo, o ESPI permitiu detectar imediatamente o ponto de maior afundamento. Desta forma foi possível verificar que a deformação máxima sofrida pela tampa era cerca de quatro a cinco vezes superior à medida em anteriores estudos por métodos pontuais. Foi também verificado que durante a montagem do vedante a

superfície cilíndrica que lhe serve de caixa não mantinha o seu eixo paralelo com o eixo da ferramenta, como se representa esquematicamente na figura 7.21.

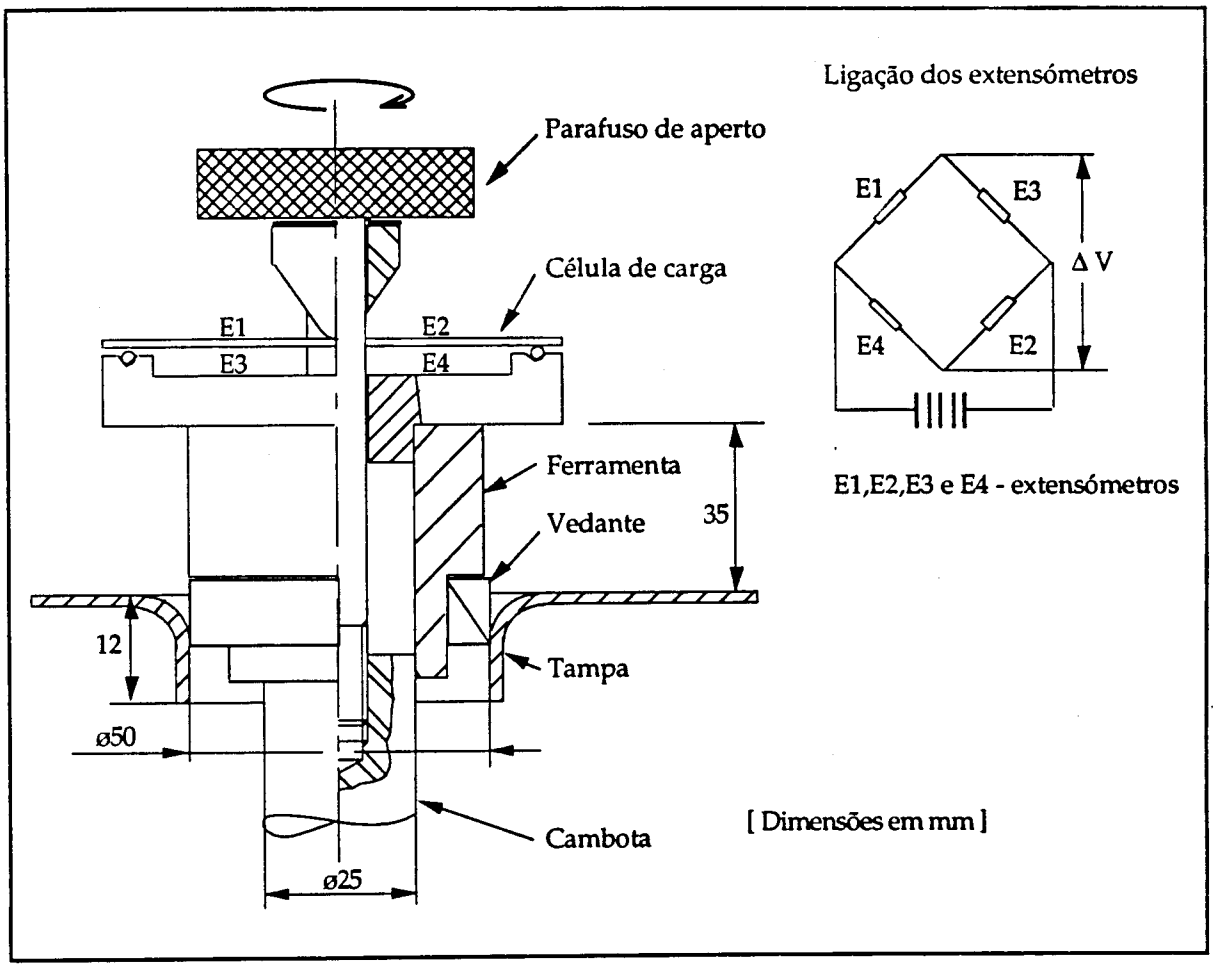


Figura 7.20 Ferramenta de montagem do vedante após ter sido adaptada para medir a força exercida sobre o vedante durante o processo de montagem.

Sendo o vedante fortemente guiado, a deformação assimétrica da tampa contribuia para que este fosse montado inclinado e assim ficasse submetido a um desgaste mais severo.

Estando este motor em vias de ser substituido, pretendia-se uma solução que não implicasse grandes investimentos. A primeira abordagem do problema consistiu em alterar parcialmente a geometria da tampa no sentido de lhe aumentar a rigidez. A introdução de nervuras com diferentes geometrias e a substituição da superfície de montagem do vedante por uma peça maquinada com maior rigidez foram algumas das alterações ensaiadas.

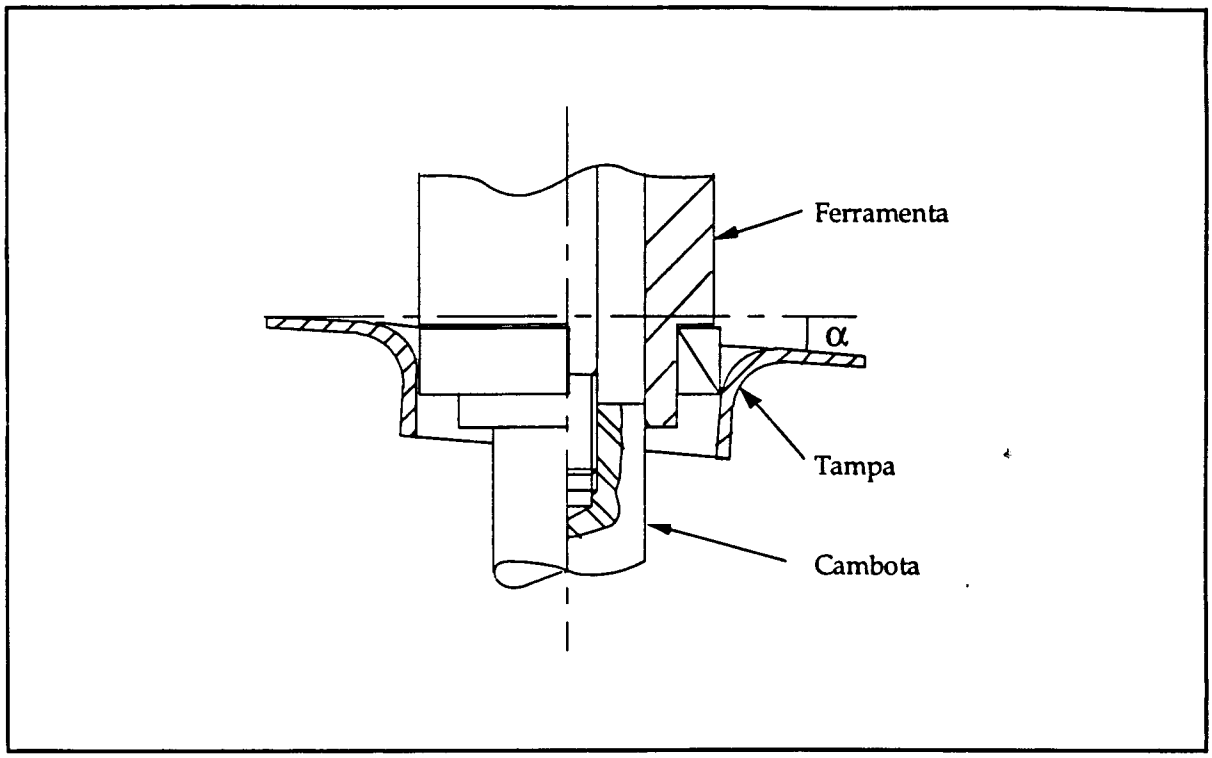


Figura 7.21 Representação esquemática da deformação sofrida pela tampa durante a montagem do vedante.

A montagem de ESPI revelou-se de grande utilidade na análise comparativa das soluções propostas. As várias tampas foram fixadas no motor incluido na montagem óptica e registados os padrões de interferência correspondentes a cada uma das cargas aplicadas sobre o vedante. Deste modo foi possível verificar de forma mais ou menos imediata qual o número e a melhor orientação das nervuras. Das quatro soluções ensaiadas que se encontram representadas na figura 7.22, aquela que revelou piores características foi a tampa em que a caixa do vedante era construída separadamente e não possuia qualquer nervura, designada por versão 1, sendo a tampa com três nervuras dispostas em Y, versão 3, aquela que apresentou maior rigidez para a solicitação em estudo.

Como se pode ver na figura 7.23, na tampa com menor rigidez a força distribuida ao longo da cavidade circular cria uma deformada em que o ponto com maior afundamento está situado fora do orifício de alojamento do vedante. Esta situação corresponde a uma montagem em que o desvio do eixo do vedante relativamente ao eixo da cambota é máximo.

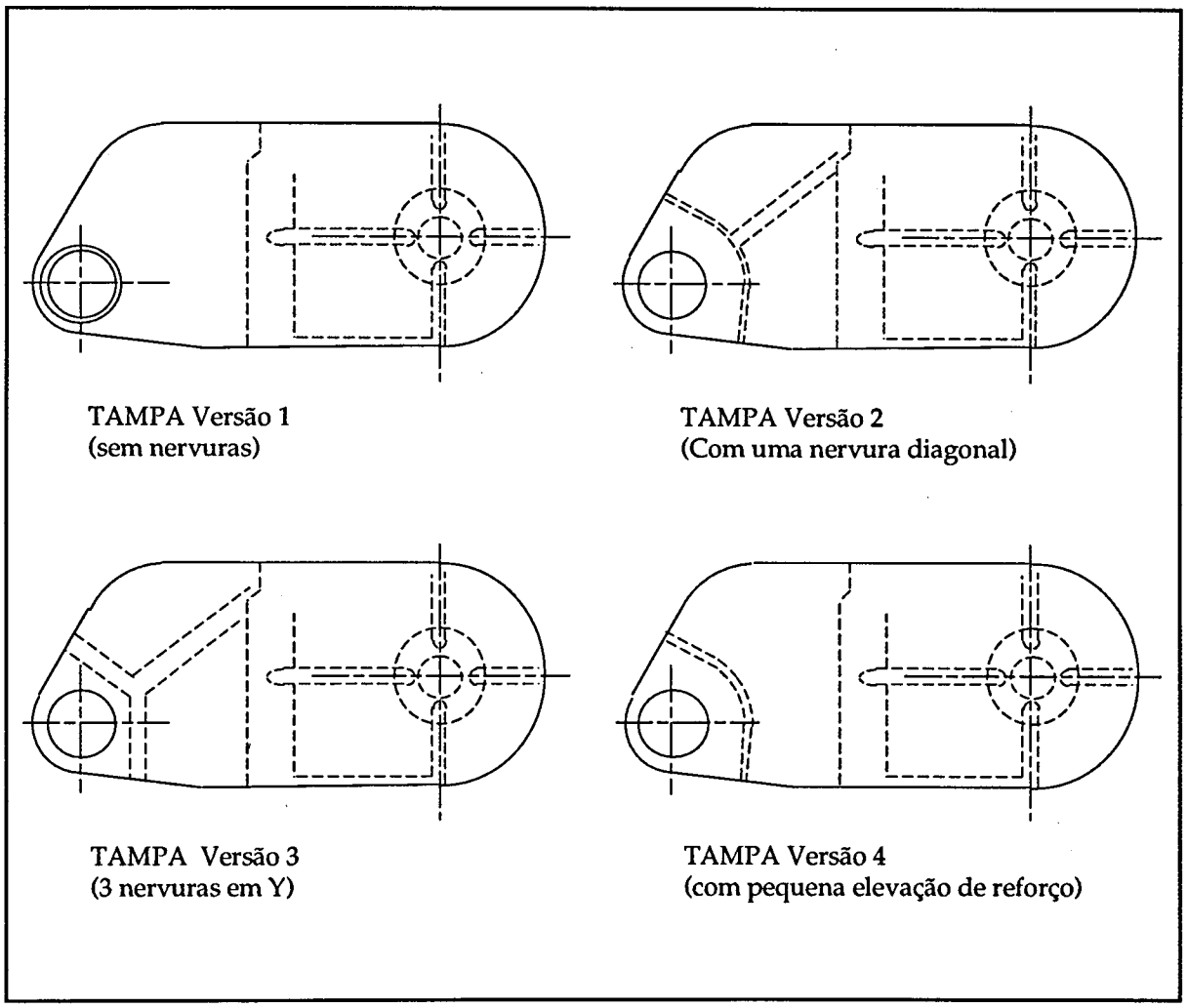


Figura 7.22 Diferentes versões da tampa ensaiadas com o sistema de ESPI.

Na figura 7.24 representa-se um dos padrões de interferência obtidos para a versão dois, onde é perfeitamente detectável a assimetria da deformada relativamente à cavidade de alojamento do vedante, embora esta situação seja menos gravosa que a anteriormente referida.

Uma análise dos padrões de interferência obtidos para as várias versões da tampa permitiu ainda concluir que a nervura de orientação diagonal tinha menor contribuição no aumento da rigidez que as outras nervuras.

Depois de ter sido seleccionada a melhor das soluções, foi realizada uma análise numérica sobre essa versão. As tensões residuais e a geometria, constituída essencialmente por uma área plana com um rebordo vertical, colocaram algumas dificuldades no ajuste do modelo numérico [12]. Foram

ensaiadas várias formas de discretização, variando o número de elementos e a fidelidade geométrica do modelo.



Figura 7.23 Padrão de interferência obtido durante a montagem do vedante na versão 1 da tampa.

Para a obtenção de uma malha que representasse com rigor a geometria da tampa foi necessário recorrer a um programa de elementos finitos com um pré-processador possuíndo boas capacidades de desenho. Neste caso foi utilizado o programa I-DEAS da SDRC. O modelo obtido não conduziu a uma solução satisfatória, apesar do elevado número de elementos envolvidos.

Foi efectuada uma segunda modelação da tampa, em que se procurou tirar partido da informação recolhida na análise dos resultados experimentais. Utilizando o código de elementos finitos ADINA, a estrutura foi discretizada em elementos de casca de 8 nós [13] com uma sobreintegração de 6x6x3. Como este código não possui um pré-processador com boas capacidades gráficas, a nova malha de elementos finitos foi obtida a partir de um desenho da tampa em AUTOCAD. A discretização utilizada foi também traçada directamente sobre a

superfície da tampa, para facilitar a comparação entre os resultados experimentais e numéricos.

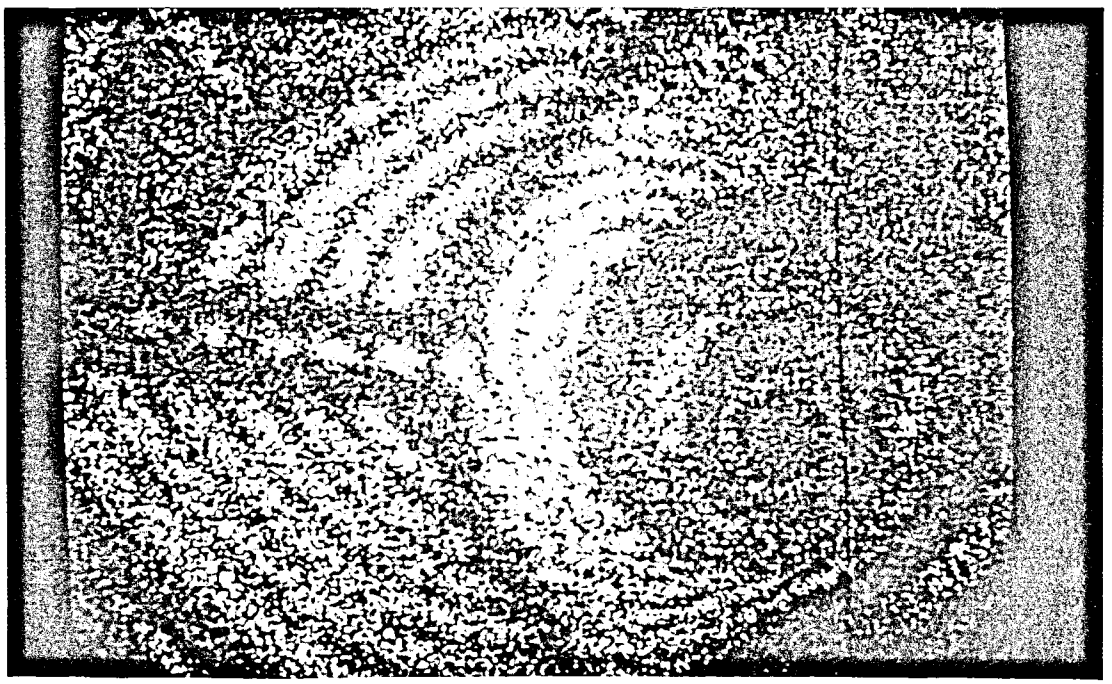


Figura 7.24 Padrão de interferência obtido durante a montagem do vedante na versão 2 da tampa.

Para modelar as nervuras foram utilizados elementos com maior espessura, simulando desta forma a diferença de rigidez. Um ensaio de flexão em três pontos efectuado em dois pedaços de chapa da mesma espessura, com e sem nervura, revelou que a variação de rigidez era aproximadamente de 1 para 20 quando a nervura era flectida longitudinalmente.

No sentido de obter padrões de interferência com melhor contraste, a montagem original foi alterada por forma a poder utilizar a holografia interferométrica na análise da deformada. Utilizando a interferometria em tempo real, foram obtidos vários registos entre os quais o representado na figura 7.25. A análise qualitativa destes registos permitiu seleccionar convenientemente as zonas de refinamento e ajustar as condições de fronteira do modelo numérico, por forma a ajustá-lo ao comportamento do componente.

Da análise comparativa dos resultados numéricos com os valores medidos experimentalmente foi possível concluir que as malhas que incluiam a aba lateral

correspondiam a soluções mais flexíveis que as obtidas na realidade. As malhas que conduziram a melhores resultados incluiam apenas a face superior da tampa e o rebordo correspondente à caixa do vedante, sendo encastradas em toda a periferia. Para o carregamento foram utilizadas as cargas nodais ao longo da periferia do orifício, tendo em atenção as zonas de influência de cada um dos nós, por forma a simular uma carga distribuída.

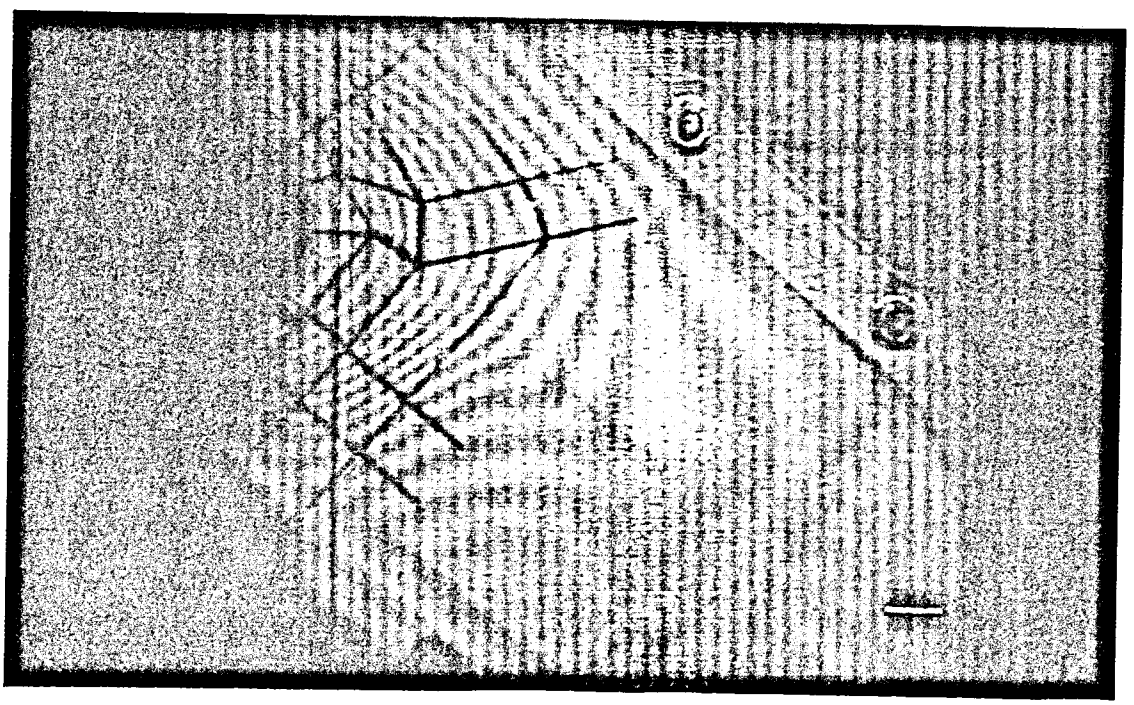


Figura 7.25 Padrão de interferência obtido em holografia interferométrica em tempo real. Este padrão corresponde à versão 3 da tampa quando submetida a uma carga de aproximadamente 15 N.

O recurso a sobreintegração foi necessário por forma a aumentar a rigidez da solução numérica. Foram também modelados todos os desníveis existentes na face superior, pois verificou-se que praticamente todos eles tinham influência na rigidez. Na figura 7.26 representa-se a malha de elementos finitos que conduziu aos melhores resultados. Como se pode ver, trata-se de uma malha com 82 elementos onde apenas estão modelados os pormenores relevantes na deformação da placa. O conhecimento prévio da deformada permitiu afinar

criteriosamente a malha, refinando-a nas zonas de maior gradiente e ajustando convenientemente as condições de fronteira.

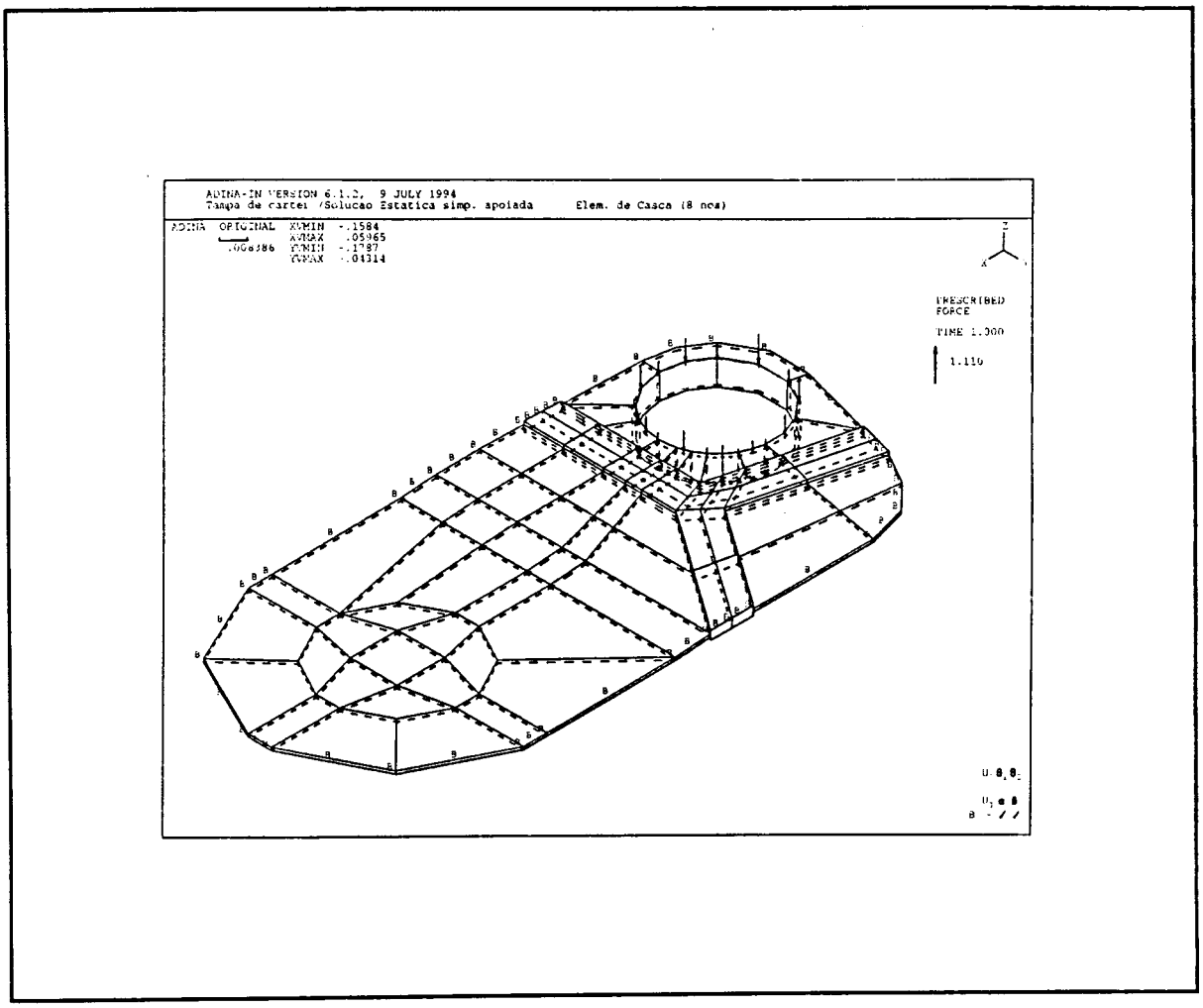


Figura 7.26 Malha de elementos finitos utilizada no código ADINA para simular a versão 3 da tampa.

A utilização das técnicas híbridas foi justificada pelas dificuldades surgidas no ajuste do modelo numérico. Estas técnicas poderiam ainda ser utilizadas na subestruturação da malha para o estudo de qualquer pormenor, utilizando os valores experimentais na definição de novas condições de fronteira locais.

Na figura 7.27 representam-se as isocurvas de deslocamento segundo a direcção z quando a carga distribuida aplicada no aro da cavidade de alojamento do vedante é de 10N e todo o rebordo exterior está encastrado.

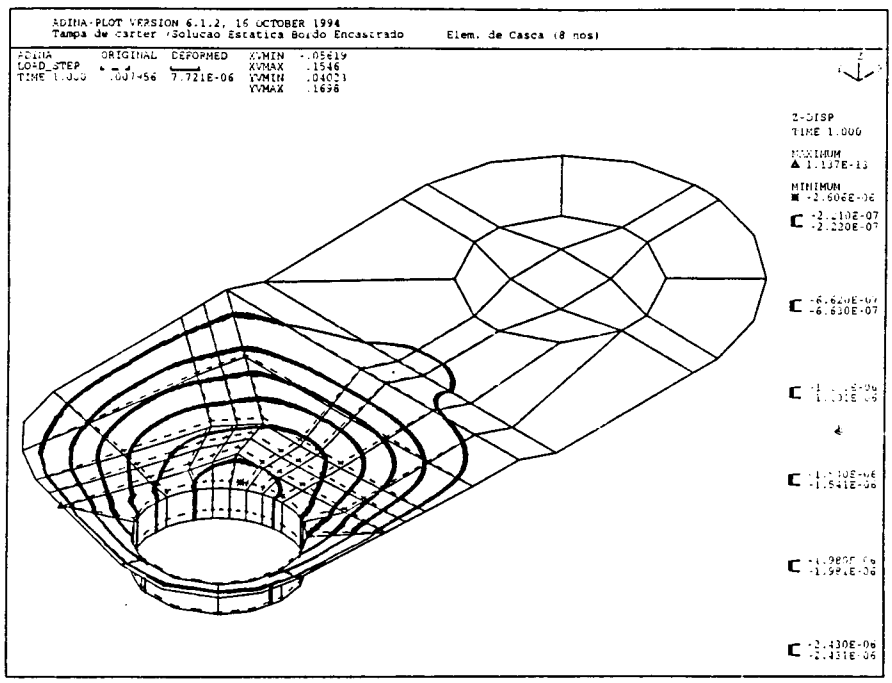


Figura 7.27 Isocurvas de deslocamento segundo a direcção z para a versão 3 da tampa. Carga distribuida e condições de fronteira de acordo com o representado na figura 7.26.

7.2.4 Estudo da deformação de uma guilhotina hidráulica durante o corte.

Nas técnicas de interferometria holográfica o comprimento de onda da luz é o padrão da medida, o que permite efectuar medições com elevada resolução. Utilizando a informação contida na luz proveniente da reflexão em superfícies difusas ou transmitida através de objectos transparentes, esta técnica de campo não necessita de qualquer contacto físico com os objectos a medir e revela-se bem adaptada para aplicações de metrologia. Contudo, a sua elevada resolução impede que seja utilizada em ambientes cuja instabilidade provoque deslocamentos de amplitude próxima da resolução da medida, normalmente da ordem do décimo de micrómetro ou inferior.

A utilização da holografia interferométrica em laboratório, dispondo de mesas ópticas e possibilidade de controlar correntes de convexão e variações de temperatura, está actualmente bastante vulgarizada. No entanto, a aplicação destas técnicas em ambientes industriais reveste-se ainda de alguns cuidados e

implica, normalmente, que os operadores tenham já bastante experiência na sua utilização.

Este trabalho consistiu na medição, fora do laboratório, da deformação sofrida pela lâmina de uma guilhotina hidráulica oscilante durante o corte de chapa. Dadas as dimensões e peso das máquinas em causa, as medições foram efectuadas no seu local de fabrico, aproveitando o período nocturno, sem laboração, para evitar o ruído produzido durante o funcionamento normal da fábrica. As perturbações provocadas pelo tráfego numa autoestrada existente nas proximidades limitaram as medições ao período de menor movimento, compreendido entre as 2 e as 6 horas da manhã.

Tratando-se de um pavilhão industrial de grandes dimensões, não era possível controlar as correntes de ar e a luz ambiente. Por isso, foi construída uma estrutura em madeira que serviu de suporte a um tecido de flanela preto. Esta estrutura, que se representa na figura 7.28, permitiu isolar a montagem do ambiente circundante.



Figura 7.28 Montagem para interferometria holográfica instalada sobre a mesa da máquina. Pode também observar-se a estrutura em madeira utilizada para isolar a montagem, a qual se encontra sem a cobertura.

Para evitar as vibrações produzidas pela central hidráulica, esta foi substituida por uma bomba volumétrica de accionamento manual, com a qual se pôde variar a pressão no circuito de potência da máquina em pequenos acréscimos controláveis através de um manómetro apropriado.

A área estudada situa-se sensivelmente a meio da zona de corte e entre dois dos calcadores utilizados na fixação da chapa. Nessa zona foi colocado um pedaço de chapa com espessura próxima do limite de corte da máquina, sobre o qual foi descido o avental móvel até a lâmina encostar na chapa. Como se pretendia avaliar a deformação relativa entre a lâmina superior e o corpo da máquina, utilizou-se a mesa desta para colocar a montagem óptica, utilizando assim o corpo da máquina como referência da medida.

Para esta medição foi seleccionada a interferometria holográfica de dupla exposição. Com a utilização desta técnica limita-se a duração do período ao longo do qual é necessário manter a estabilidade da montagem. De referir que as variações de temperatura provocam deformações da ordem de grandeza da resolução da medida. Os registos interferométricos obtidos com dupla exposição fixam o campo de deslocamentos entre duas situações da superfície e podem ser reconstruídos em qualquer altura, bastando iluminá-los com um feixe *laser* com as caracteristícas do utilizado como referência. A reconstrução do holograma com uma radiação de diferente comprimento de onda altera os dois registos da mesma forma, mantendo as características do padrão de interferência. Na figura 7.29 pode observar-se um dos registos após ser reconstruído com um *laser* de Árgon.

Os hologramas foram registados em placas de vidro com emulsão Agfa-Gevaert (*holotest*) 8E75HD sensíveis ao vermelho e com uma resolução máxima superior a 3000 linhas por milímetro. Foram registados hologramas de fase com processamento químico de revelação e branqueamento GP 62 e GP 432 [1] respectivamente, realizado num laboratório improvisado nas instalações sanitárias da fabrica.

Um *laser* de He-Ne emitindo 15 mW em TEM_{oo} com polarização vertical e comprimento de onda λ=632,8 nm foi utilizado como fonte de luz. No sentido de simplificar a montagem óptica foi utilizado um só feixe de referência, pelo que os registos obtidos não permitiam utilizar a modulação de fase para levantar a indeterminação de π no sentido do deslocamento. Um comparador com resolução de 1 μm montado numa base magnética sobre a mesa da máquina e na proximidade da área em estudo permitiu determinar o sentido do deslocamento.

Os hologramas gravados foram depois reconstruídos em laboratório utilizando uma *laser* de Árgon. As frentes de onda registadas no holograma foram fotografadas e registadas em *video*. O registo electrónico foi convertido em ficheiros numéricos por um sistema de processamento de imagem, a partir dos quais foi possível utilizar o processamento digital na sua análise. Tratando-se de uma montagem de referência única, não era possível recorrer a técnicas temporais de modulação de fase para obter a distribuição espacial dos deslocamentos.

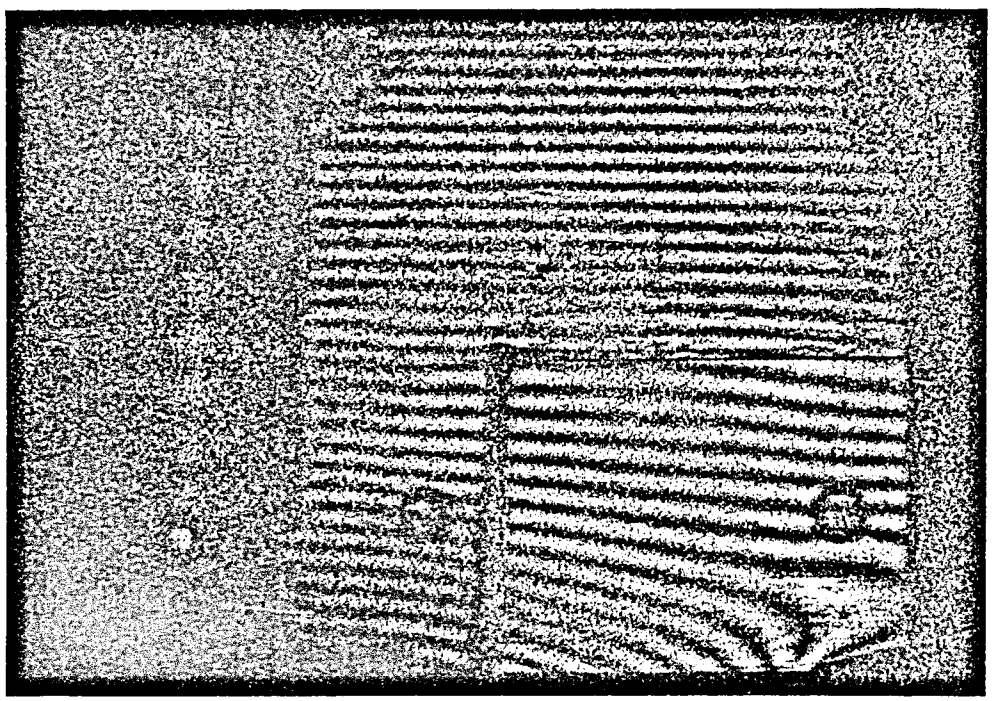


Figura 7.29 Registo interferométrico do campo de deslocamentos da lâmina de uma guilhotina hidráulica obtido por dupla exposição.

Rotinas de segmentação e erosão foram utilizadas para determinar as linhas correspondentes aos mínimos de cada uma das franjas. Desta forma foi obtido um conjunto de isocurvas de deslocamento ao longo de uma área pré-definida. A variação da intensidade média ao longo da imagem e o ruído de *speckle* não permitiram o processamento de todo o registo.

Admitindo que o deslocamento variava linearmente entre cada par de franjas, foram utilizadas interpolações lineares para obter os deslocamentos dos

pontos intermédios e construir uma simulação tri-dimensional do campo de deslocamentos a partir das isocurvas, figura 7.30.

Os padrões de interferência obtidos consistiam num conjunto de franjas horizontais paralelas entre si. Sendo o vector de sensibilidade perpendicular à superfície da lâmina, um padrão de interferência deste tipo corresponde a uma rotação de corpo de rígido em torno de um eixo horizontal paralelo à superficie. As deformações elásticas envolvendo deslocamentos normais à superficie serão reveladas pelas variações da frequência espacial do padrão de franjas.

Como neste caso se pretendia comparar duas soluções construtivas para a mesma máquina, o mesmo ensaio foi efectuado sobre um protótipo construido de acordo com a nova solução proposta. As alterações mais importantes neste protótipo consistiam na redução das dimensões da mesa e na utilização de um novo travamento da estrutura, tendo sido possível reduzir significativamente o peso da máquina.



Figura 7.30 Simulação tridimensional do campo de deslocamentos a partir do conjunto de isocurvas (variação de pressão ≈ 0,2 MPa).

Na figura 7.31 representam-se ambas as guilhotinas ensaiadas. A menor dimensão da mesa da segunda máquina não permitia reproduzir a geometria da

primeira montagem, pelo que a montagem óptica foi realizada sobre uma chapa de aço fixada sobre a mesa. Uma chapa com 15 mm de espessura foi colocada sobre pedaços de madeira em cima da mesa e fixada com acessórios aparafusados na furação existente na máquina. A introdução de pedaços de madeira entre as superfícies de aço destinava-se a filtrar possíveis instabilidades resultantes de vibrações provocadas por ligações rigidas entre peças de aço.

O estudo realizado sobre a guilhotina hidráulica foi repetido sobre o protótipo da nova solução proposta pelo fabricante. Como carregamento foram também utilizadas acréscimos de pressão hidráulica que variaram entre 0,2 e 0,5 MPa e recorreu-se à mesma técnica de registo dos padrões. Na figura 7.32 representa-se a simulação do campo de deslocamentos obtida na análise da deformada do protótipo.

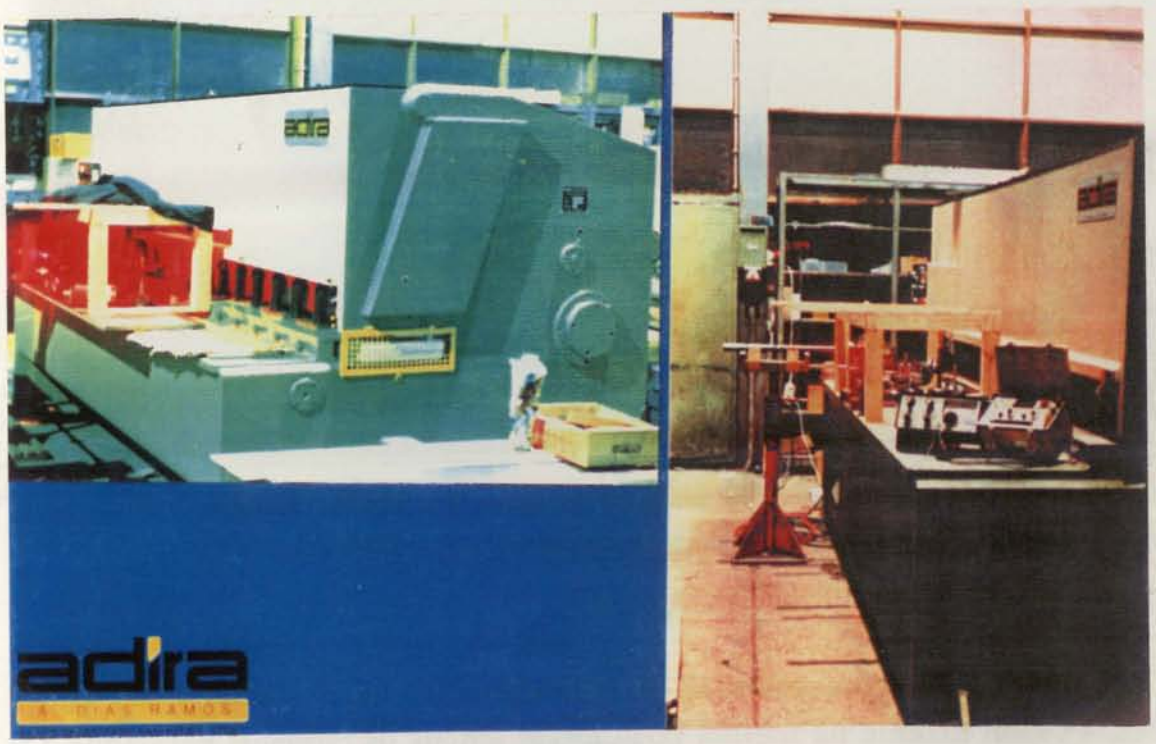


Figura 7.31 Protótipo e guilhotina hidráulica ensaiados.

Também neste caso o deslocamento predominante é uma rotação de corpo rígido em torno de um eixo horizontal, embora aqui a maior frequência espacial das franjas permita concluir que a rotação no protótipo excede a verificada na primeira máquina ensaiada. O ponto de convergência situado no canto inferior

direito do padrão de franjas, ponto de contacto da lâmina com a chapa a cortar, não é neste caso tão perceptível como nos registos obtidos inicialmente. Deve referir-se que a orientação vertical das franjas nessa zona corresponde a uma deformação localizada da lâmina devida à concentração da força de corte, de onde se pode concluir que, neste caso, esta se encontra distribuida por uma maior extensão da lâmina.

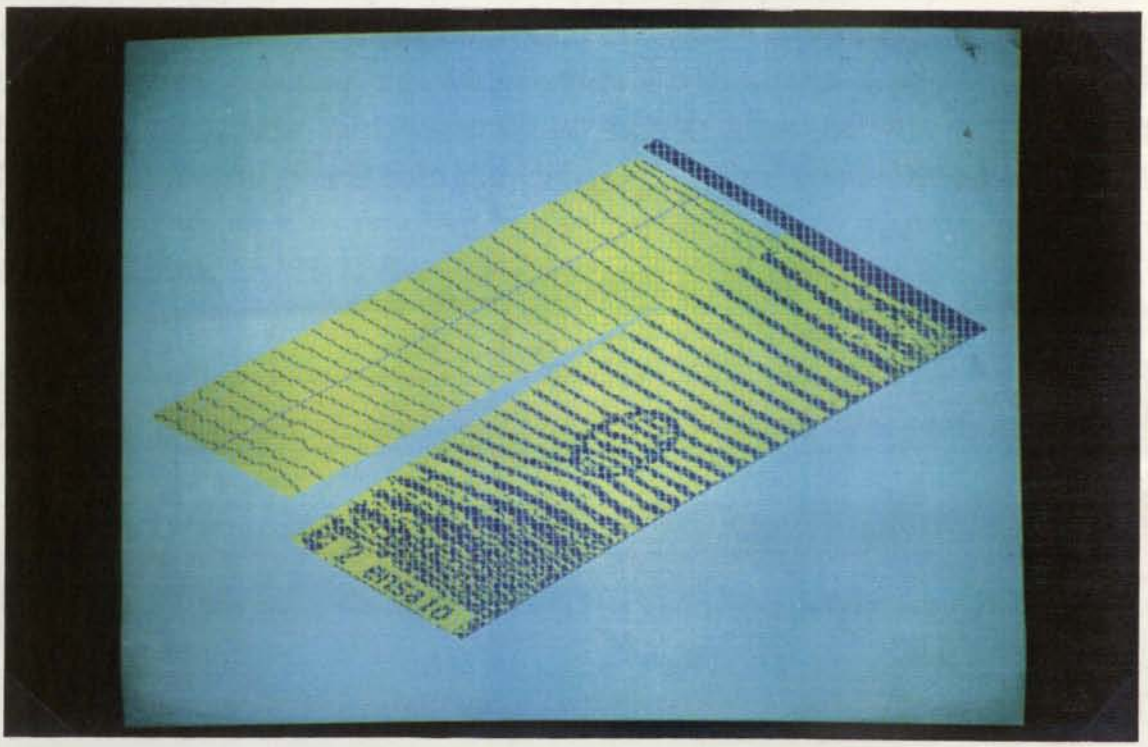


Figura 7.32 Simulação tridimensional do campo de deslocamentos a partir do conjunto de isocurvas obtido na análise da deformada do protótipo (variação de pressão ≈ 0,2 MPa).

Na figura 7.33 representam-se os deslocamentos ao longo de duas linhas definidas sensivelmente na mesma posição em ambos os modelos ensaiados. Os valores representados foram corrigidos por forma a ter em conta as diferentes escalas, tendo-se admitido uma variação linear dos deslocamentos entre cada par de franjas. Dado que não existem variações significativas na frequência espacial das franjas, foram ajustadas rectas pelo método dos mínimos quadrados aos dois conjuntos de pontos. Os coeficientes de correlação obtidos foram de 0,99986 e 0,99962, respectivamente, para o 1º e 2º ensaio .

Em ambos os ensaios, a rotação sofrida pelo montante móvel da guilhotina foi no sentido de aproximar a parte superior do holograma, enquanto a parte inferior é afastada. Tais conclusões foram retiradas das leituras efectuadas no comparador e depois confirmadas na análise da deformada obtida por elementos finitos [14].

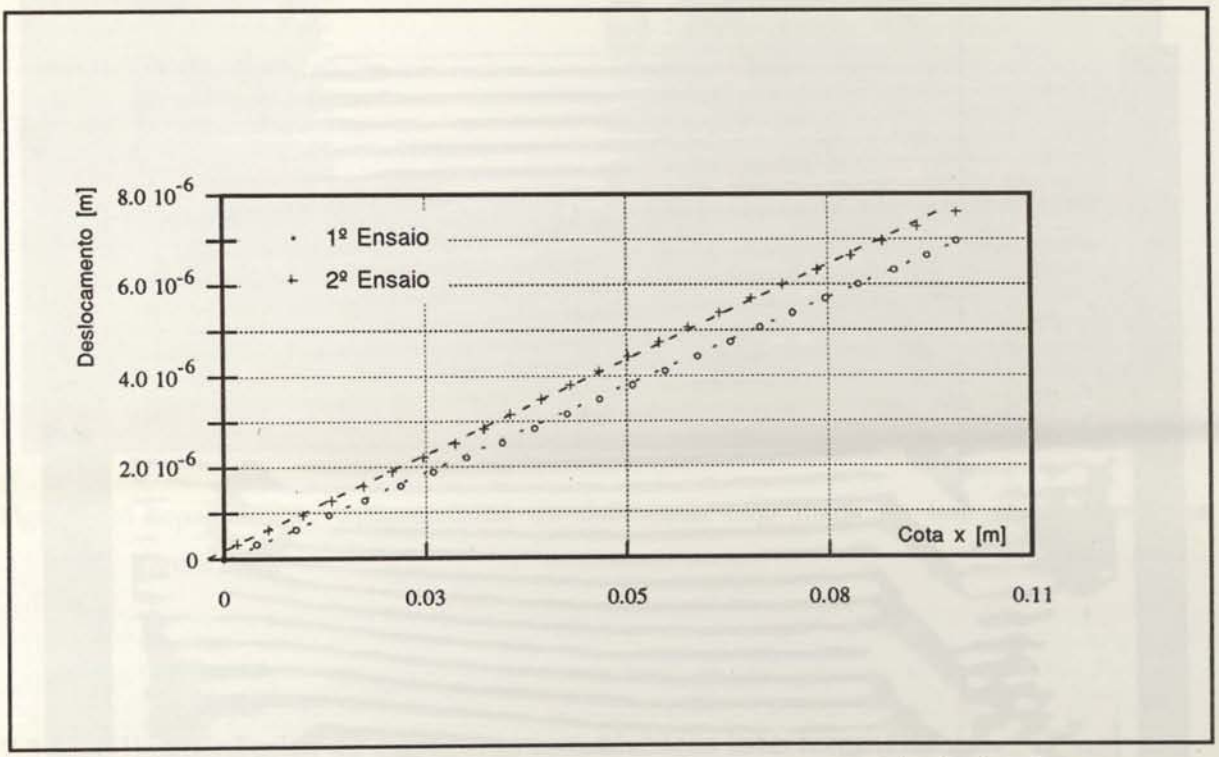


Figura 7.33 Comparação entre as rotações sofridas pelos montantes móveis das duas estruturas ensaiadas. As rectas representadas foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados.

As imagens registadas em ficheiros numéricos foram também processadas por rotinas de processamento de imagem, fazendo uso das técnicas espaciais de determinação de fase. Na figura 7.34 representa-se um dos mapas de fase obtidos por aplicação de uma rotina de determinação de fase que recorre à transformada de Fourier bi-dimensional (FFT-*Fast Fourier Transform*).

Da análise dos padrões de interferência obtidos, podemos concluir que, para este nível de carregamento (variações de pressão que não excederam 0,5 MPa), a deformação da máquina consiste essencialmente numa rotação de corpo rígido do

montante superior relativamente ao corpo da guilhotina. De referir que, neste tipo de máquina, esse deslocamento é imposto construtivamente. Os valores obtidos para o 1º e 2º ensaios, declives das rectas ajustadas aos conjuntos de pontos, foram respectivamente de $6{,}98E^{-5}$ e $7.61E^{-5}$ rad.

Dos mapas de fase obtidos pelo processamento de imagem é possível obter uma representação tridimensional da deformada. Na figura 7.35 representa-se a configuração obtida para a deformada da lâmina da segunda guilhotina analisada.

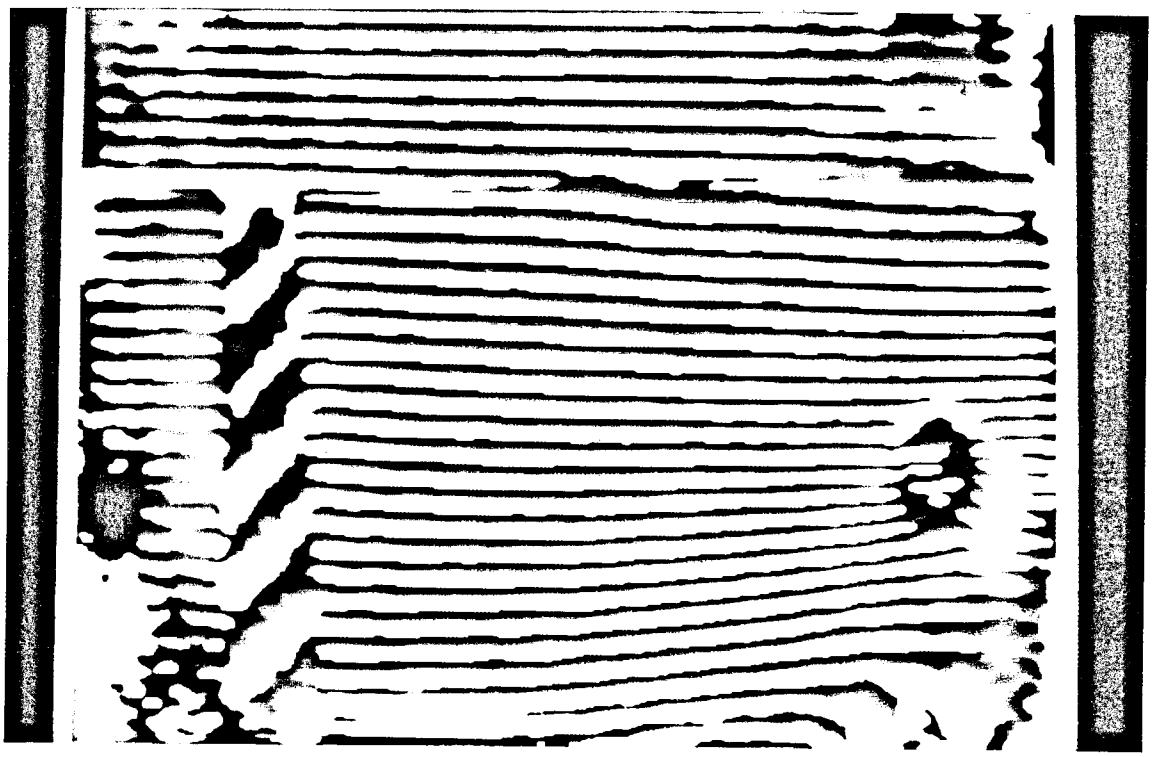


Figura 7.34 Mapa de fase obtido sobre a imagem do registo interferométrico da deformada do protótipo.

Deste trabalho pode concluir-se que a resolução da técnica utilizada é de longe superior à necessária para medir a deformação do montante, mas poderá revelar-se de grande utilidade se o objecto de estudo for a deformada da lâmina na região de contacto com o material a cortar. Dadas as facilidades de acesso e a geometria dos montantes laterais da máquina, estas técnicas poderiam também revelar-se de grande utilidade quer no estudo do seu empenamento durante o corte, quer medindo os deslocamentos no seu plano para analisar as deformações induzidas.

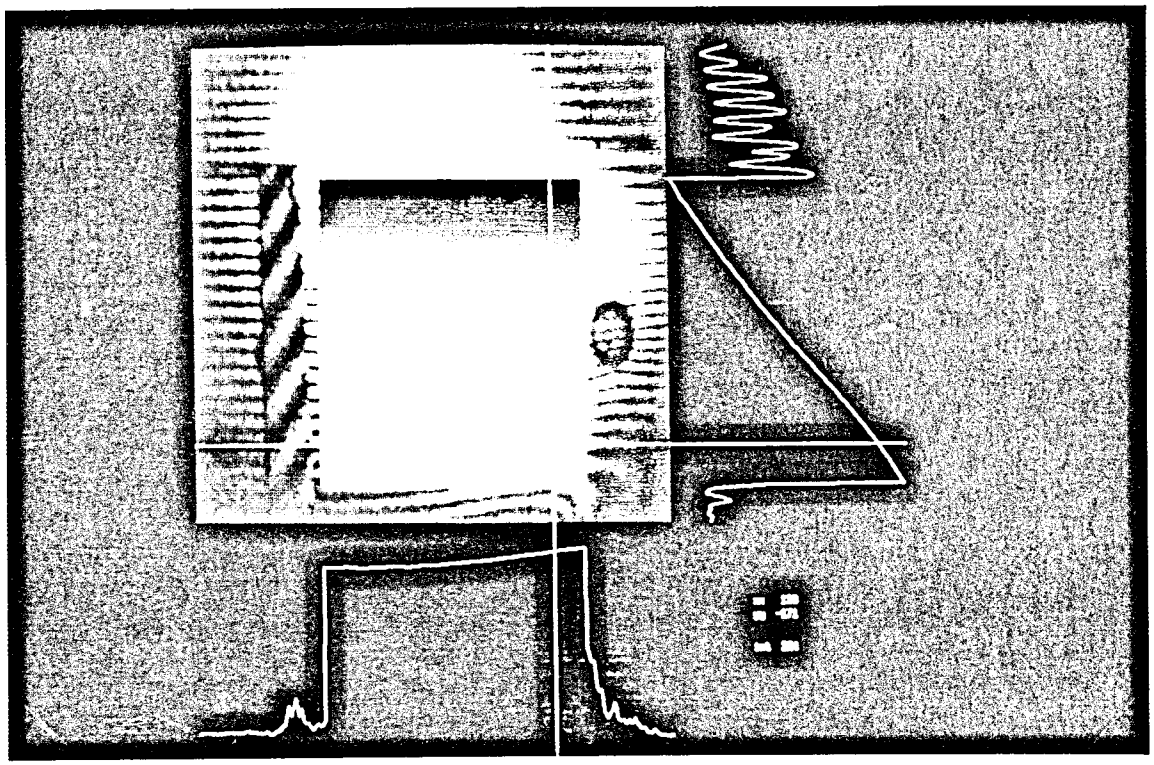


Figura 7.35 Representação tridimensional da deformada cujo mapa de fase se representa na figura 7.34.

7.3 Análise dinâmica de estruturas com técnicas interferométricas.

As técnicas de interferometria holográfica estão particularmente bem adaptadas para a análise dinâmica de estruturas principalmente aquelas que, possuindo áreas aproximadamente planas e sem grandes declives, tenham uma distribuição de massa facilmente alterada pela fixação de transdutores. Tratando-se de técnicas de campo utilizáveis sem contacto físico elas permitem uma análise global da vibração da estrutura sem interferir na sua distribuição espacial de massa.

A análise dinâmica de estruturas tem como finalidade conhecer o seu comportamento quando solicitadas por causas variáveis no tempo. Esta análise pode ser feita em condições em que a causa perturbadora é periódica, ou em situações em que esta é transitória. Sempre que a excitação da estrutura é

periódica, é de esperar da parte desta um comportamento periódico correspondente. Neste caso, é necessário conhecer as frequências e os respectivos modos próprios da estrutura, os quais, convenientemente sobrepostos, permitem descrever o seu comportamento em qualquer instante. Esta técnica é designada por análise modal [18] e consiste em admitir que a configuração de uma estrutura em qualquer instante resulta da sobreposição dos seus modos de vibração multiplicados pelas respectivas amplitudes, tal como num desenvolvimento em série de modos próprios:

$$\tilde{U}(t)= \sum_{i=1}^{n_{modos}} a_i \tilde{U}_i \cos(\omega_i t) \qquad (7.8)$$

onde $\tilde{U}(t)$ corresponde à configuração da estrutura no instante t e resulta da sobreposição de cada vector próprio da estrutura $\tilde{U}_i$ à respectiva frequência ω_i. A intensidade de cada vector é condicionada por um factor de escala a_i que corresponde à amplitude de vibração de cada modo próprio. Estas amplitudes constituem as incógnitas da equação (6.3) e o seu número é igual ao número de modos próprios que considerarmos necessários para a estrutura.

Por sua vez a configuração temporal da força excitadora é aproximada com um desenvolvimento em série trigonométrica envolvendo frequências iguais às frequências próprias da estrutura. Por aqui se constata que a análise modal pode constituir um ferramenta atractiva e económica para o estudo do comportamento de uma estrutura em regime dinâmico, quando a perturbação é de baixa frequência. Este é o caso de estruturas do tipo recticulado usadas em veículos de passageiros, onde as altas frequências são eficazmente amortecidas e não têm amplitudes com influência determinante no estado de tensão global. Por exemplo, no ensaio de impacto de um vagão ferroviário só se consideram relevantes, para as tensões na estrutura, as frequências inferiores a 16 Hz [19].

O método anteriormente referido tem uma importante limitação no estudo de fenómenos transitórios de alta velocidade, como é o caso da propagação de ondas de tensão. Nesta situação, como já foi anteriormente referido, a configuração da estrutura pode ser caracterizada por duas zonas distintas: uma em que a estrutura já se encontra em vibração e a outra em que está em repouso. Uma técnica de aproximação modal não seria conveniente, pois necessitaria de um elevado número de modos de vibração para apenas aproximar a solução ao

problema. Para este caso seria muito mais eficaz o método das diferenças centrais já referido anteriormente.

As técnicas de interferometria holográfica permitem medir a amplitude do deslocamento, quer numa deformação estática quer em situações envolvendo fenómenos dinâmicos. Quando os fenómenos em análise são periódicos, é possível utilizar a interferometria em tempo médio para obter a distribuição espacial das amplitudes de vibração. Neste caso, é possível estudar fenómenos rápidos aproveitando o tempo de exposição para integrar a energia necessária à gravação dos registos. Na situação mais geral, o objecto em análise pode ser comparado em duas situações separadas no tempo, o que permite obter a propagação do campo de deslocamentos. As técnicas utilizadas nesta aplicação podem envolver técnicas de modulação de amplitude e de fase da iluminação e encontram-se descritas no sexto capítulo deste trabalho.

A possibilidade de construir sistemas de ESPI compactos e portáteis [15], [16] permite que estas técnicas possam ser utilizadas para analisar estruturas fora do ambiente laboratorial. O registo dos padrões de interferência em *video*, gravando um novo holograma em cada 20 ms, reduz as exigências de estabilidade ao período de gravação de cada registo, evitando o moroso processamento necessário à gravação de cada holograma. Em ambientes de grande instabilidade é ainda possível recorrer a técnicas de modulação de amplitude do feixe *laser* para reduzir o tempo de gravação de cada registo, diminuindo assim a sensibilidade da montagem às perturbações externas.

Na figura 7.36 representa-se esquematicamente a montagem de ESPI que foi utilizada neste trabalho para a análise dinâmica de componentes estruturais. Esta montagem é idêntica à representada na figura 7.13, com a objectiva de abertura do feixe de iluminação do objecto substituida por um vidro despolido montado no eixo de um motor eléctrico. A substituição da objectiva por um difusor tem por fim permitir descorrelacionar o padrão de *speckle*, o que é conseguido fazendo rodar o vidro despolido por forma a utilizar uma área diferente no espalhamento do feixe de iluminação [17].

A inclusão de um modulador de fase num dos braços do interferómetro aumenta significativamente as capacidades do sistema de ESPI, permitindo a sua operação com técnicas de modulação de fase.

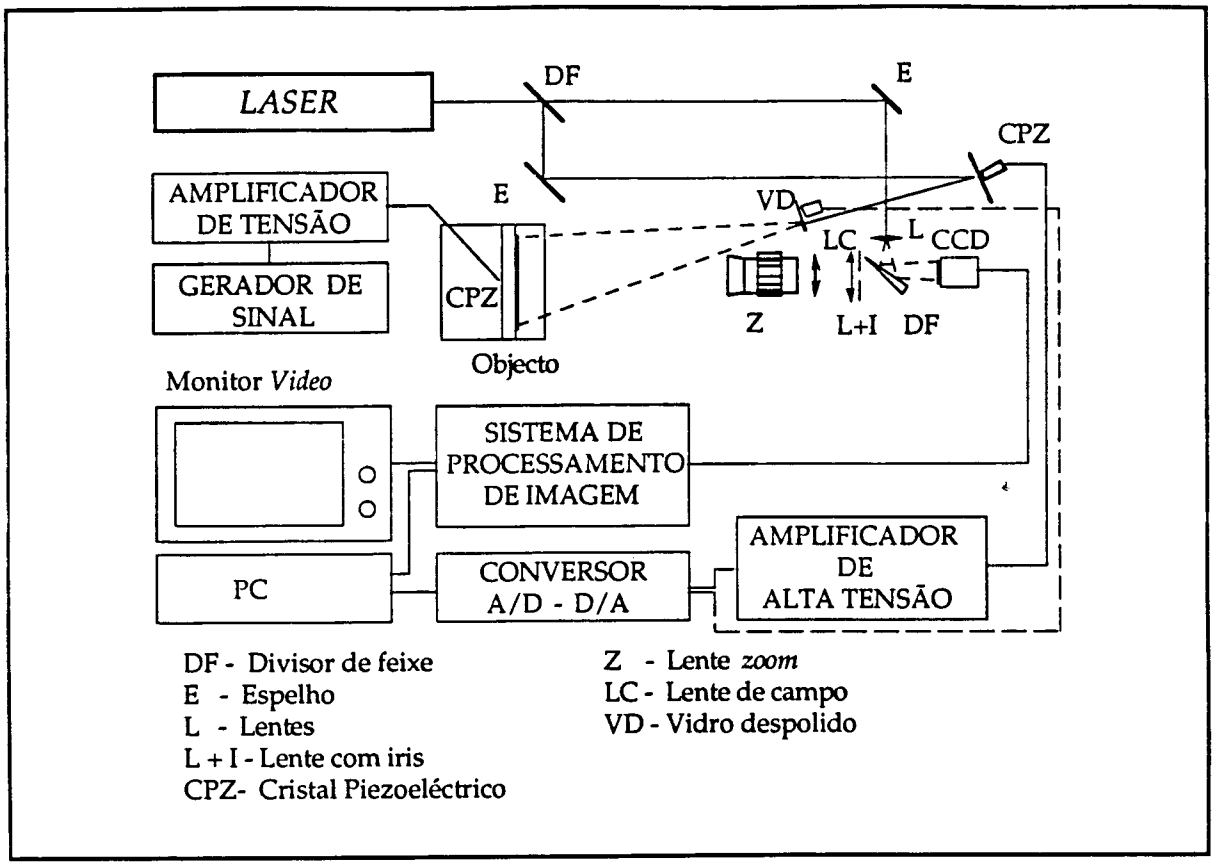


Figura 7.36 Montagem de ESPI com modulação de fase e dispositivo para redução de ruído de *speckle*.

7.3.1 Análise modal de uma placa rectangular

O sistema acima descrito, operado em tempo médio, foi utilizado na detecção dos modos próprios de uma placa rectangular com 0,25 x 0,1 x 0,005 m construída em aço St 37 (DIN 17 100). Esta placa possui seis furos, três ao longo de cada um dos lados menores, que permitem simular um duplo encastramento por aperto de seis parafusos M6 contra um suporte, como se representa na figura 7.37.

Na excitação harmónica da placa foi utilizado um cristal piezoeléctrico comercializado pela Morgan Matroc Ltd. sob a referência BEG/1-6, com as dimensões 0,025 x 0,006 x 0,0005m e 0,5 E^{-3} kg de massa. Ao cristal foi aplicada uma tensão sinusoidal de amplitude constante e frequência variável. O varrimento efectuado nas frequências permitiu detectar os vários modos de

vibração pelo aparecimento dos padrões de interferência correspondentes a cada uma das frequências próprias.

A inclusão de uma placa de processamento de imagem com capacidade de efectuar subtracções com rectificação em tempo real permite eliminar os termos de autocorrelação presentes nos padrões de interferência obtidos em tempo médio, operando o sistema em subtracção. A imagem contendo apenas os termos de autocorrelação, a subtrair das imagens *video* obtidas do objecto em vibração, é gravada imediatamente antes da obtenção de cada padrão de interferência. Para registar esta imagem, o objecto é mantido em repouso e o espelho que constitui o modulador de fase é posto a vibrar com uma amplitude correspondente a um zero da função J_0^2, (método referido no 5º capítulo deste trabalho). Desta forma são eliminados os termos resultantes da interferência entre ambos os braços do interferómetro, permanecendo apenas os termos invariáveis no tempo. Este procedimento permite obter padrões de interferência de bom contraste sem recorrer à filtragem electrónica do sinal *video*.

Mantendo o modulador de fase desactivado e efectuando um varrimento na frequência de excitação do objecto, são detectados os vários modos de vibração pelo aparecimento de padrões de interferência estacionários. Estes padrões caracterizam a distribuição espacial da amplitude do movimento para esse modo de vibração, e têm uma intensidade modulada pelo quadrado da função de Bessel de ordem zero. A função de franja é descrita pela expressão (5.9) referida no capítulo 5 deste trabalho e representa-se da seguinte forma:

$$|M_1 - M_2|^2 = J_0^2\left(\frac{4\pi a_o}{\lambda}\right) \qquad (5.9)$$

Nestes padrões, a franja de ordem zero apresenta-se clara e com uma intensidade aproximadamente cinco vezes superior a qualquer das restantes. A relação entre cada franja e a amplitude do movimento pode ser obtida a partir dos zeros da função J_0 e encontra-se representada na figura 5.7.

Excitando sinusoidalmente a placa com uma das suas frequências próprias, e integrando no tempo vários ciclos da sua vibração, obtém-se a distribuição espacial da amplitude do movimento harmónico. Contudo, perde-se a informação referente à fase do movimento. Se em simultâneo com a excitação do objecto, o modulador de fase for excitado com uma frequência ligeiramente diferente (± 0,5 a 1 Hz), obter-se-á um batimento entre os dois movimentos com uma frequência igual à diferença entre os sinais. Desta forma é possível observar

o movimento efectuado pelo componente em vibração como se ele estivesse a desenvolver-se à frequência do batimento. Esta técnica permite detectar visualmente quais as zonas que vibram em fase.

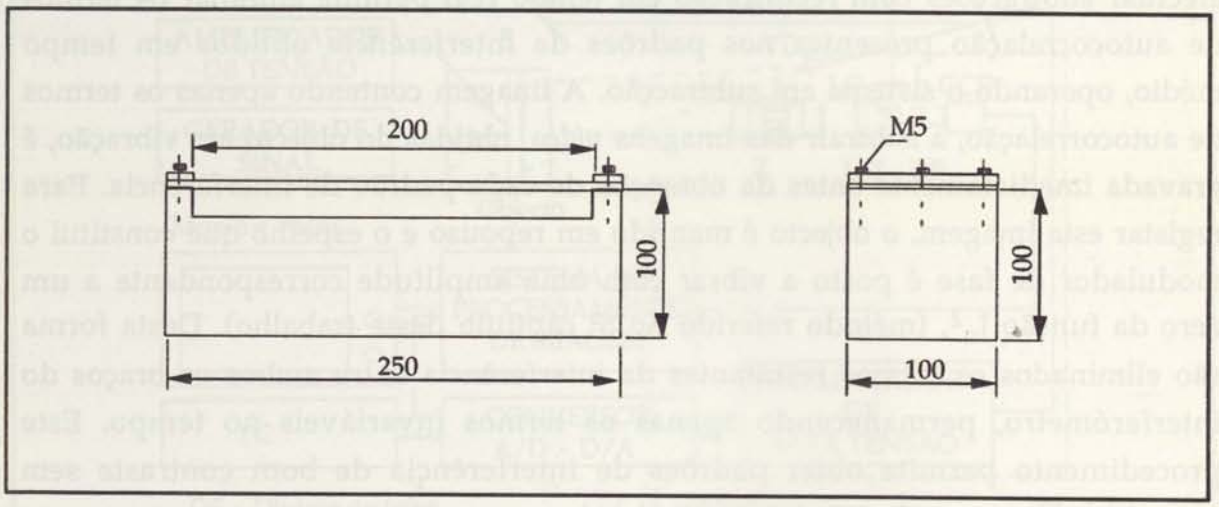


Figura 7.37 Placa submetida à análise modal duplamente encastrada no suporte .

Na figura 7.38 está representado um dos padrões de interferência obtidos. Como se pode verificar, trata-se de um padrão de interferência que, embora com bom contraste, apresenta também ruído de *speckle*. Este ruído é típico dos padrões de interferência obtidos por sistemas de ESPI e resulta de, neste sistema interferométrico, os grãos de *speckle* serem resolvidos pelo detector de imagem.

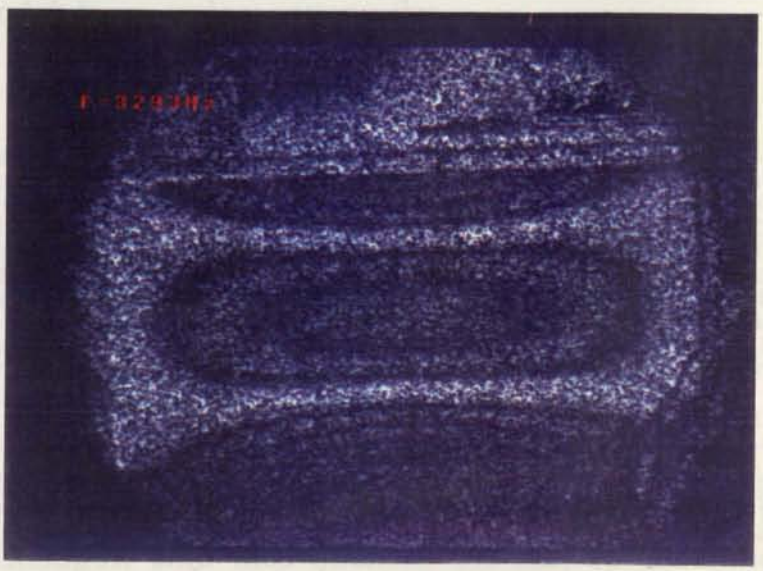


Figura 7.38 Padrão de interferência obtido em tempo médio para uma placa rectangular em vibração sinusoidal.

O sistema de ESPI utilizado permite reduzir o ruído multiplicativo de *speckle*, efectuando a média de vários padrões de interferência obtidos com o objecto a vibrar nas mesmas condições, mas iluminado com padrões de *speckle* descorrelacionados entre si. A utilização de uma placa de processamento de imagem com possibilidade de memorizar até 16 imagens e um sistema de iluminação com difusor permite utilizar rotinas de redução de ruído de *speckle* e obter padrões de interferência com contraste próximo do obtido com holografia. Os padrões de franjas representados na figura 7.39 foram obtidos da média de oito imagens gravadas em tempo médio, iluminando o objecto com padrões de *speckle* descorrelacionados entre si.

A placa estudada foi modulada usando uma malha de elementos finitos de placa com 8 nós que, utilizada no código ADINA, permitiu obter numericamente a configuração dos vários modos de vibração. Na figura 7.39, comparam-se os primeiros modos de vibração da placa obtidos numericamente com os resultados experimentais resultantes da utilização das técnicas interferométricas em tempo médio.

De referir que embora neste caso se tenha optado por excitar a placa com um cristal piezoeléctrico colado na placa, o mesmo resultado poderia ter sido obtido com uma excitação acústica. Nesse caso, a potência a utilizar seria bastante superior dado que, para as frequências em jogo, a transmissão de energia através do ar é pouco eficiente. Na colocação do excitador devem ser tidos alguns cuidados, pois não serão excitados os modos cujas linhas nodais coincidam com o eixo de excitação.

Na obtenção da solução numérica foi utilizado o método de iteração por subespaços [20], dispondo esta técnica da vantagem de permitir determinar apenas o número desejado de frequências próprias. Foram utilizados dois critérios de aproximação à distribuição contínua de massa. No caso de matrizes de massa concentrada (*lumped mass matrix*) num elemento finito dispondo de n_e nós, admite-se que em cada nó se localiza um núcleo pontual de massa igual à massa total do elemento a dividir pelo número de nós. Numa outra aproximação mais realista, adopta-se uma distribuição consistente de massa (*consistent mass matrix*), em que se verifica existir efeitos inerciais mútuos entre nós; deste modo os elementos fora da diagonal principal da matriz consistente de massa não são nulos, o que não se verifica na aproximação anterior.

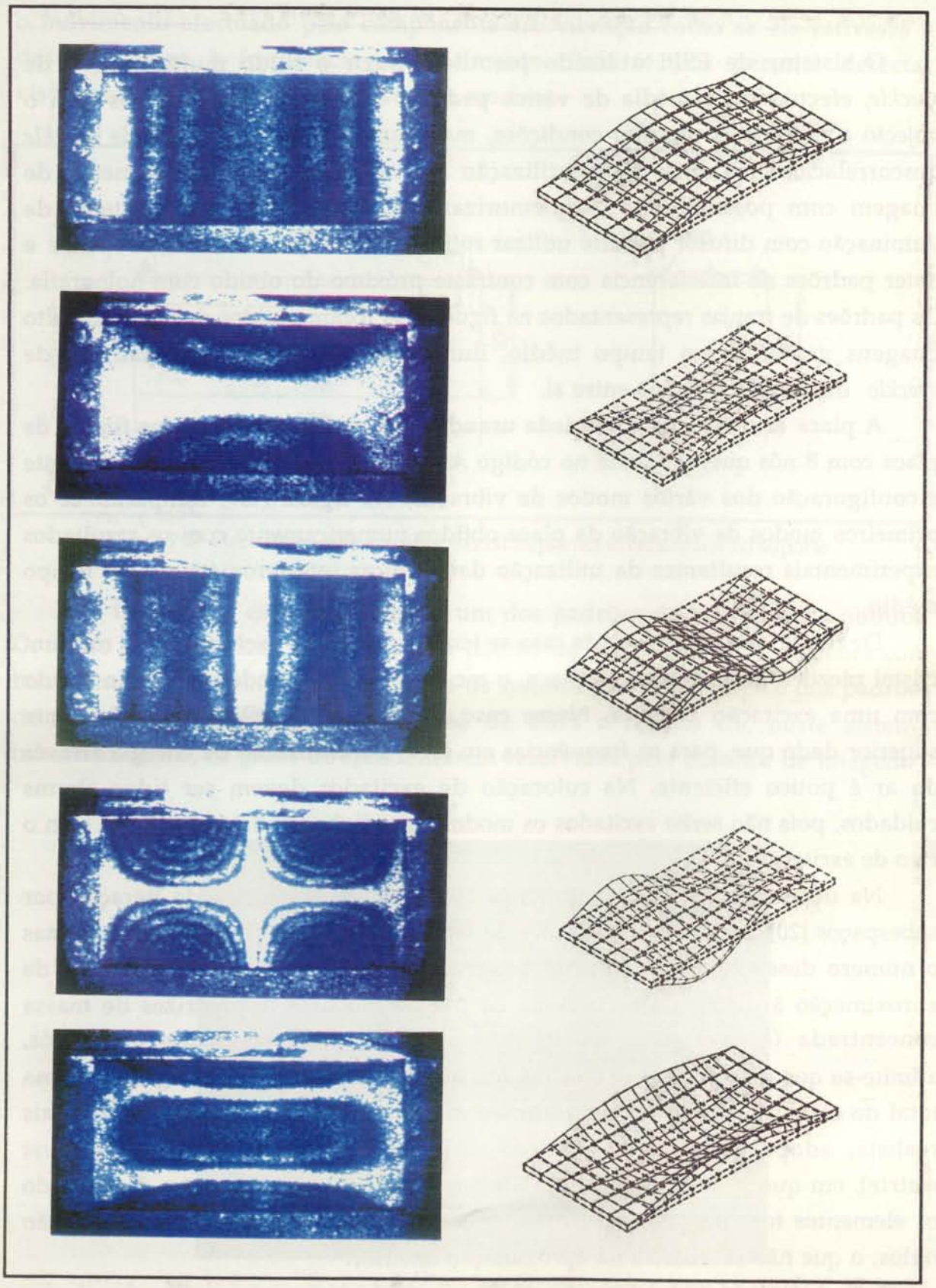


Figura 7.39 Análise comparativa dos primeiros modos de vibração de uma placa obtidos numericamente com os resultados da análise experimental.

Na análise dos resultados apresentados na tabela 7.1, verifica-se que a aproximação discreta de massa conduziu à determinação de frequências próprias inferiores às obtidas pela aproximação consistente. Esta diferença, sendo insignificante para os primeiros modos, vai-se acentuando para as frequências mais elevadas. Sendo sob o ponto de vista computacional mais vantajosa, a utilização de uma matriz concentrada é uma boa opção no caso se pretenderem apenas os primeiros modos. Os dois modelos convergem para a solução exacta à medida que se aumenta o refinamento da malha.

	ADINA (Consistent)		ADINA (lumped)		Solução Ref [21] (a)	ESPI
	4x6 elem.	10x20 elem.	4x6 elem.	10x20 elem.		
MODO 1	683	682	681	682	684	630
MODO 2	1110	1106	1069	1101	1102	1055
MODO 3	1876	1868	1854	1868	1884	1704
MODO 4	2533	2518	2421	2508	2523	2374
MODO 5	3362	3350	3020	3306	3558	3290
MODO 6	3679	3632	3558	3634	3731	3311
MODO 7	4450	4384	4151	4369	4464	4099
MODO 8	4856	4810	4328	4754	4836	4646
MODO 9	6053	5936	5614	5943	6313	5609
MODO 10	6925	6735	6154	6716	7078	6297
Tempo CPU	3.6 s	44.36 s	3.01 s	31.9 s		

(a)- Solução obtida com uma malha 4x6 de elementos de Mindlin isoparamétricos de 8 nós. Programa de Elementos Finitos DINAMI - DEMEGI/FEUP, utilizando iteração por subespaços.

Frequências em Hz.

TABELA 7.1 Comparação entre as frequências próprias de uma placa rectângular obtidas numericamente e por via experimental.

A concordância entre os resultados experimentais e as soluções numéricas, sendo exacta na forma dos modos, apresenta contudo desvios nas frequências. Tais desvios resultam não só do processo iterativo da resolução, mas também de erros de arredondamento gerados pelo processo numérico de cálculo.

7.3.2 Análise modal de uma placa circular.

A mesma análise foi efectuada para a placa circular referida em 7.2.2. A placa foi mantida no suporte que se encontra representado esquematicamente na figura 7.12 e foi utilizado um cristal piezoeléctrico idêntico ao utilizado para excitar a placa rectangular referida na secção anterior. Um varrimento nas frequências permitiu detectar os vários modos de vibração que se representam na figura 7.40, em comparação com os resultados obtidos numericamente. Também neste caso existe uma boa concordância entre ambas as soluções.

A utilização combinada das técnicas experimentais com as técnicas numéricas permitiu ajustar a discretização que melhor se ajusta à resolução do problema. Utilizando várias malhas, variando independentemente o número de elementos envolvidos em cada uma das direcções, foi seleccionada aquela que conduziu a resultados mais consentâneos com as medições experimentais.

	ADINA (Consistent)		ADINA (lumped)		ESPI
	4x6 elem.	10x20 elem.	4x6 elem.	10x20 elem.	
MODO 1	287.5	278.6	277	276.6	285
MODO 2	588.5	579.5	581	579.3	483
MODO 3	976.9	950	957	950	770
MODO 4	1154	1083	1101	1071	921
MODO 5	1447	1390	1371	1389	1151
MODO 6	1769	1657	1686	1654	1431
MODO 7	2028	1896	1791	1894	1600
MODO 8	2494	2302	2275	2299	1993
MODO 9	2782	2470	2149	2464	2107
MODO 10	2714	2425	2450	2387	2864
Tempo CPU	3.46 s	78.71 s	2.93 s	56.97 s	

TABELA 7.2 Comparação entre as frequências próprias de uma placa circular obtidas numericamente e os resultados experimentais obtidos com ESPI.



Figura 7.40 Comparação entre os modos próprios obtidos experimentalmente e os obtidos com a solução numérica efectuada com o programa de Elementos Finitos ADINA.

Verificou-se também que as frequências próprias dependiam do binário de aperto dos parafusos do suporte, isto é, da rigidez da fixação do objecto, o que permite concluir da importância das técnicas experimentais no ajuste do modelo matemático. Elementos estruturais com simetria geométrica podem ser analizados a partir de modelos parciais. Neste caso, os vários modos de vibração resultam da combinação de soluções numéricas a que foram impostas condições de simetria e antissimetria.

7.3.3 Análise modal de um acessório de um motor automóvel.

O sistema de ESPI anteriormente descrito foi ainda utilizado na análise modal da tampa descrita no ponto 7.2.3 deste trabalho. Com a tampa montada de acordo com as recomendações do fabricante num bloco de motor, foi utilizada a técnica de tempo médio para obter os seus modos próprios.

A tampa ensaiada destina-se apenas a cobrir a corrente de transmissão 2:1 do movimento da cambota para a árvore de cames, evitando a saída do óleo de lubrificação. Trata-se de uma peça com diminuta contribuição para a resistência mecânica do motor, pelo que a sua concepção é orientada essencialmente no sentido de obter o menor peso. A geometria destes componentes apresenta normalmente grande volumetria e reduzida espessura, pelo que é de fácil excitação dinâmica e, ao mesmo tempo, funciona como caixa de ressonância, amplificando o ruído produzido pela sua vibração. Estes componentes revelam-se importantes fontes de ruído, principalmente quando as suas frequências próprias se situam no espectro excitado pelo normal funcionamento do motor.

A análise modal permite obter as frequências próprias de vibração de uma estrutura e constitui uma ferramenta auxiliar de projecto de grande importância sempre que se trate de estruturas submetidas a solicitações variáveis no tempo. As técnicas de interferometria holográfica com registo em *video* operadas em tempo médio permitem obter de forma expedita os vários modos de vibração de qualquer componente estrutural. Na figura 7.41 representam-se os quatro primeiros modos de vibração obtidos com o sistema de ESPI representado na figura 7.36. Os padrões de franjas apresentados resultaram da aplicação de rotinas de redução de ruído de *speckle* envolvendo 8 imagens.

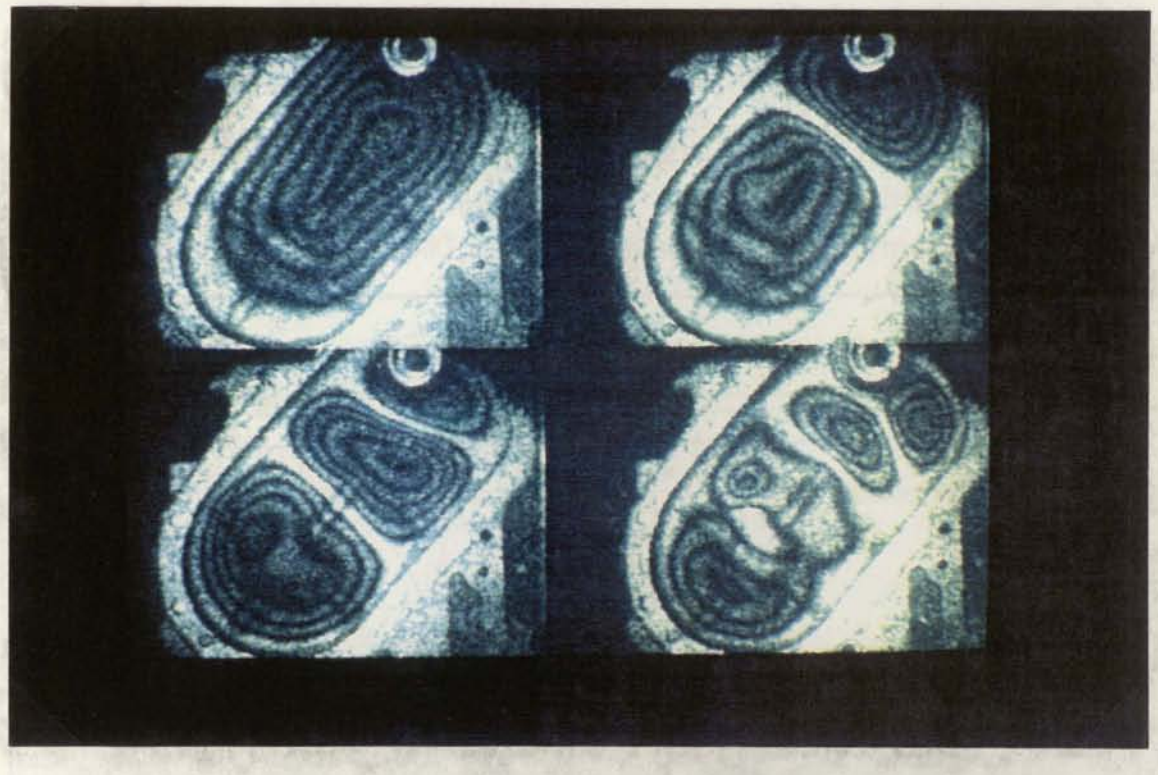


Figura 7.41 Primeiros quatro modos de vibração de uma tampa da distribuição de um motor.

As frequências próprias obtidas com os métodos de holografia interferométrica foram comparadas com os valores resultantes de uma análise modal clássica efectuada por acelerómetros. Na figura 7.42 apresenta-se um gráfico Log./Amplitude *versus* frequência, obtido a partir da aceleração medida num ponto situado sensivelmente a meio da superfície da tampa [22]. Neste gráfico, os valores próprios são detectadas pelo aparecimento de picos de inflexão na curva. A concordância entre os resultados é bastante boa nos dois primeiros modos, embora nos modos de frequências mais elevadas os valores obtidos pelo ESPI sejam superiores aos obtidos com os acelerómetros. Uma possível explicação para esta disparidade poderá residir na colocação do acelerómetro na superfície da placa. Efectivamente a colocação desta massa suplementar baixa as frequências próprias da placa, principalmente as mais elevadas.

O conhecimento *a priori* das frequências e modos próprios da estrutura revelou-se de grande importância no ajuste do modelo numérico. O componente em análise foi modulado por uma malha de elementos finitos de casca com 8 nós, a partir da qual, utilizando o código ADINA com iteração por subespaços, foi obtida uma solução numérica para os quatro primeiros modos de vibração. A malha de elementos finitos utilizada na solução estática revelou-se, neste caso,

completamente desadequada, conduzindo a soluções onde, quer a geometria quer a frequência dos modos próprios se afastavam significativamente da solução experimental, o que pode ser comprovado nos resultados que se mostram na figura 7.43.

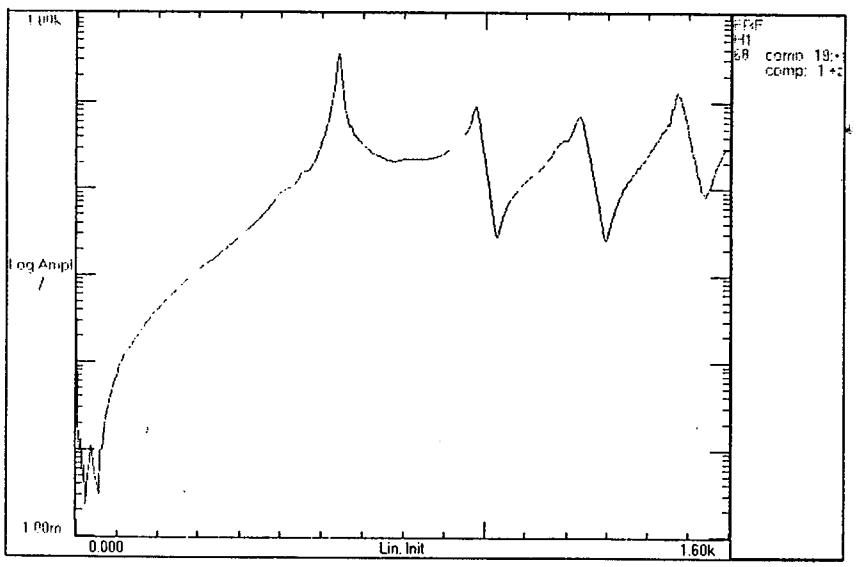


Figura 7.42 Gráfico de Log./Amplitude *versus* frequência para um ponto sensivelmente a meio da superficie da tampa.

A selecção da discretização mais ajustada para a resolução numérica do problema implicou alterações, quer na geometria da placa, quer nas condições de fronteira, tendo os melhores resultados sido obtidos com uma malha onde a superfície da placa era modulada por um plano sem qualquer reforço e tendo todo o seu bordo exterior encastrado. À semelhança dos resultados experimentais, esta solução permitiu obter modos de vibração onde os acidentes geométricos tinham pouca influência na geometria dos modos de vibração estudados. Na figura 7.44, representa-se a solução obtida após o ajuste da malha referido anteriormente.

No sentido de averiguar a importância da análise modal neste ensaio, e dadas a facilidades encontradas no laboratório de acústica e vibrações do IDIT (Instituto de Desenvolvimento Industrial e Tecnológico), foram efectuados

alguns ensaios de acústica sobre um motor de automóvel possuindo uma tampa semelhante [22]. Utilizando uma das câmeras surdas [29] deste laboratório (ou câmera *anechoic*, na designação anglosaxónica), foram efectuadas medições de potência acústica e intensimetria com o motor a trabalhar em baixo regime, aproximadamente 900 a 1000 r.p.m., e no seu regime normal de funcionamento 3000 a 3500 r.p.m..

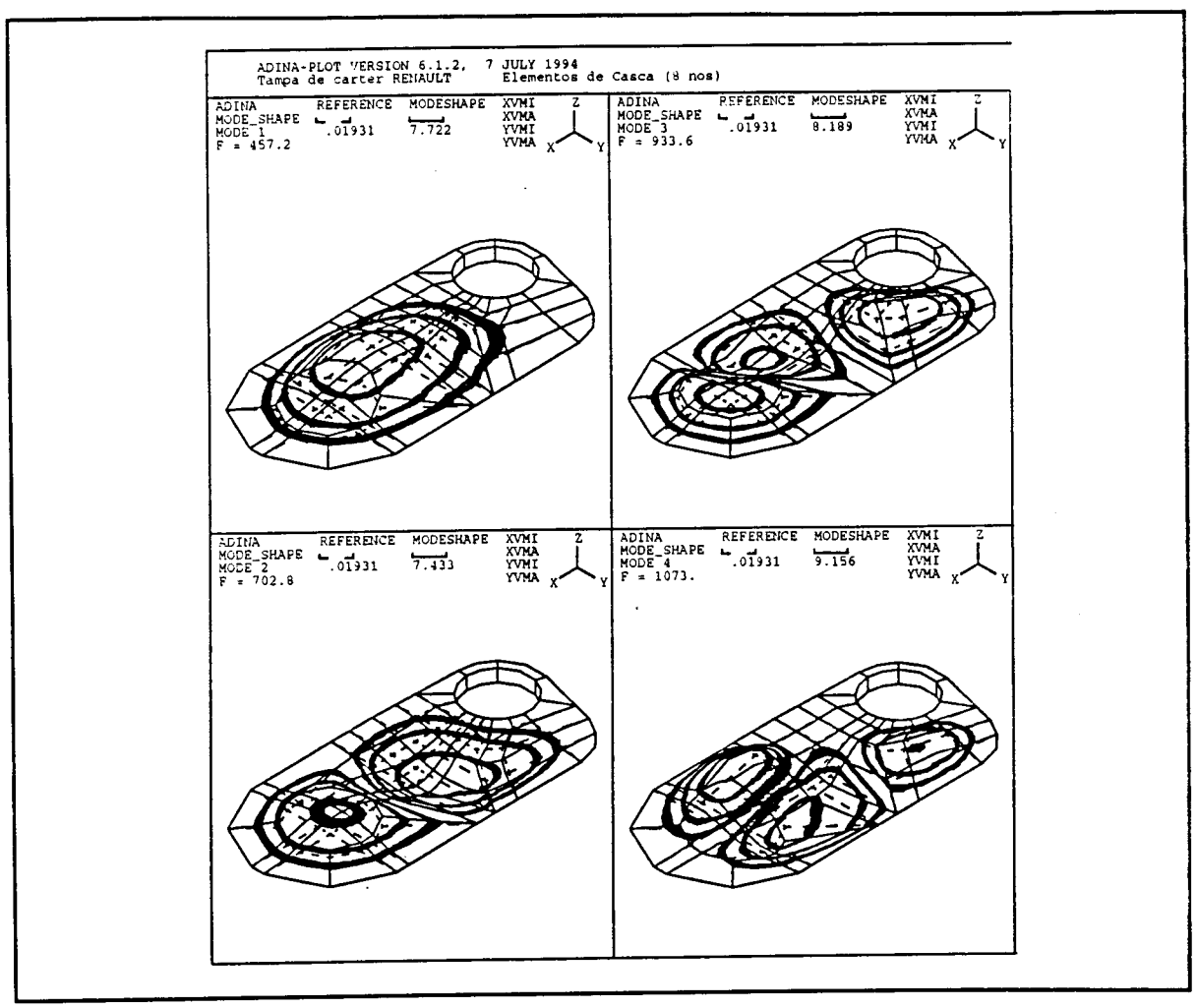


Figura 7.43 Modos próprios de uma tampa de cárter obtidos com uma das malhas de Elementos Finitos utilizada com resultados aceitáveis na solução estática.

As medições de potência acústica revelaram a predominância, no espectro do ruído produzido pelo motor, das primeiras frequências próprias da tampa. Contudo, foram as medições de intensimetria aquelas em que os resultados

obtidos mais claramente demonstraram ser a tampa uma das principais fontes de ruído, quando o motor é operado no seu regime normal de funcionamento.

Para as medições de intensimetria, foi definida uma malha sobre o motor com as dimensões 0,6 x 1,0 m contendo 6 elementos que, como se representa na figura 7.45, foram designados de acordo com a sua colocação relativamente ao motor. Em cada um dos elementos foram efectuadas medições da potência acústica do ruído para os dois regimes de funcionamento referidos.

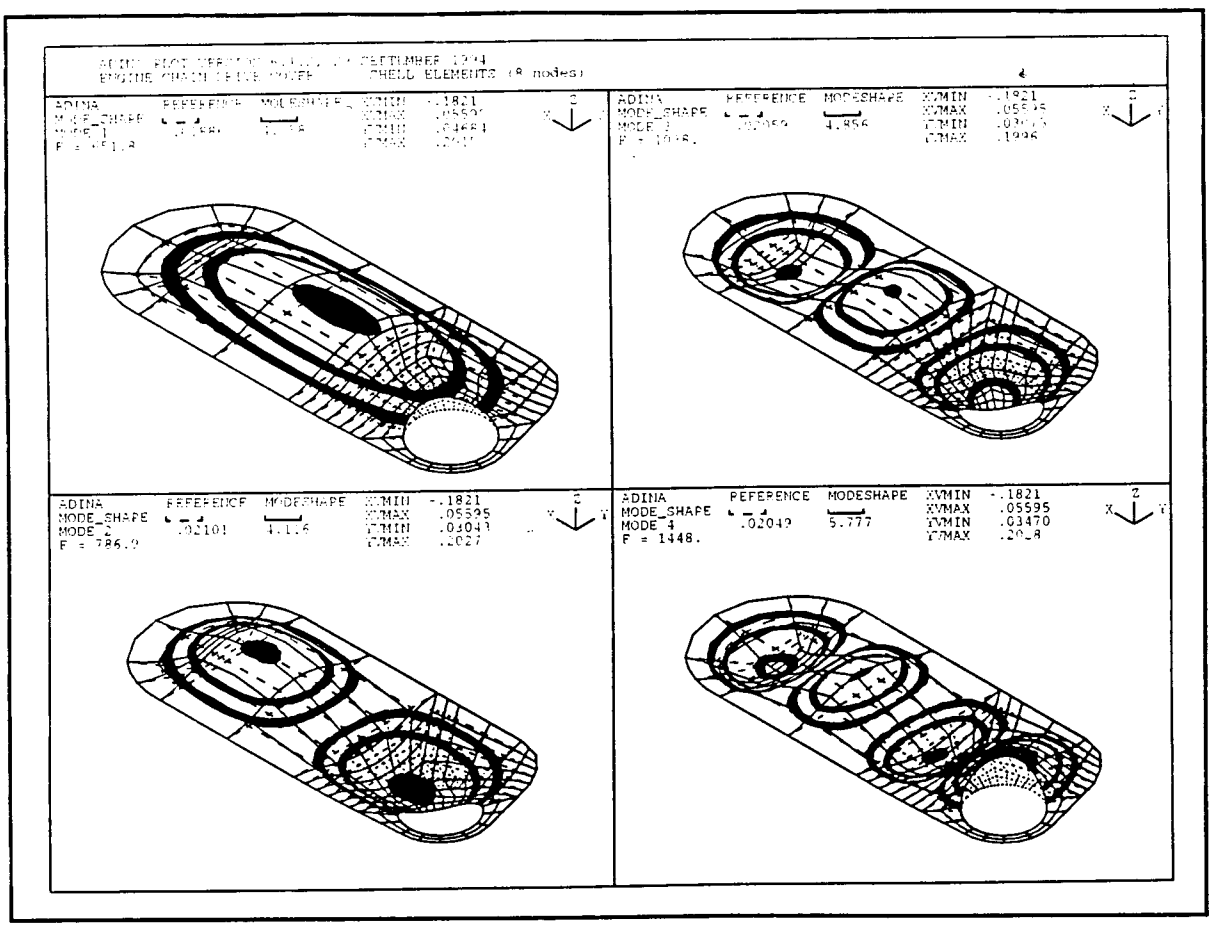


Figura 7.44 Modos de vibração de uma tampa de cárter obtidos após o ajuste efectuado na geometria da malha.

Os resultados obtidos da medição de intensidade acústica com o motor a trabalhar em baixo regime mostraram que a zona mais ruidosa correspondia à região sobre o ventilador, sendo o ruído produzido pelo fluxo de ar durante o funcionamento deste componente. Contudo, quando o motor trabalhava no seu regime normal de funcionamento, era a região sobre a tampa aquela que contribuia em maior percentagem para a intensidade total do ruído produzido.

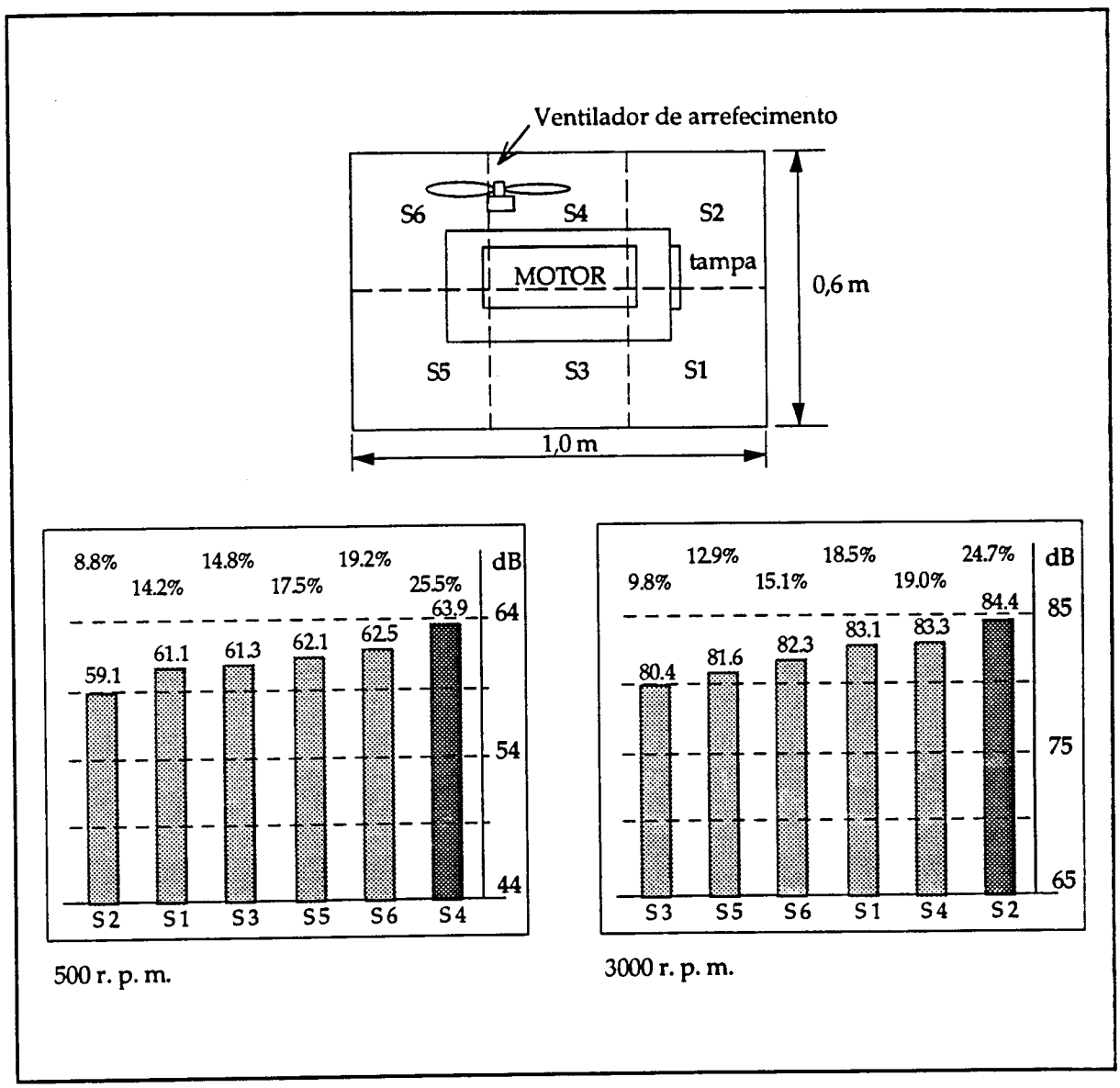


Figura 7.45 Malha para medição de intensimetria do ruído produzido pelo motor e resultados das medições efectuadas a 500 r.p.m. e 3000 r. p. m. .

Medições de aceleração obtidas a partir de um acelerómetro colocado directamente sobre a tampa provaram que, pelo menos os três primeiros modos de vibração, eram excitados pelo funcionamento do motor, como se pode observar nas figura 7.46.

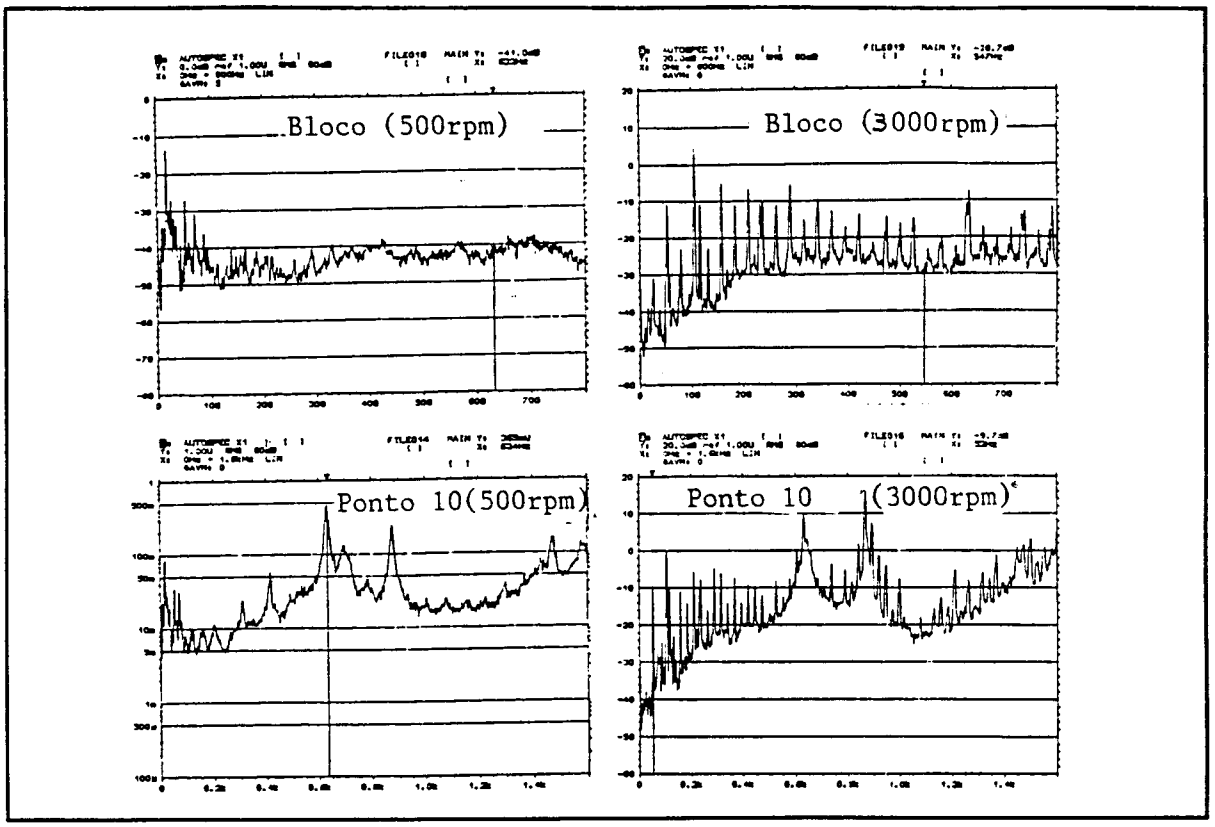


Figura 7.46 Gráficos, Log./Amplitude *versus* frequência (bloco, tampa a 500 rpm e 3000 rpm)

7.3.4. Medição da amplitude dos deslocamento efectuada sobre uma peça em vibração sinusoidal com recurso a técnicas de modulação de amplitude .

A utilização da técnica de tempo médio na obtenção da distribuição espacial da amplitude do movimento de um objecto em vibração tem como principal inconveniente a completa perda da informação de fase do movimento. Além disso, embora com esta técnica se obtenha um eficiente aproveitamento da energia de iluminação disponível, a intensidade dos registos obtidos, dada a modulação de fase durante ao processo de gravação, aparece modulada por funções de Bessel de primeira ordem. Embora esta perda da linearidade entre a intensidade do registo e a amplitude de vibração do ponto correspondente não inviabilize as medições qualitativas, ela impede a utilização de rotinas de cálculo numérico na análise automática dos padrões de interferência obtidos.

O recurso às técnicas de modulação de amplitude permite obter padrões de interferência envolvendo apenas duas situações distintas do campo de

deslocamentos imposto ao objecto. Desta forma são obtidos padrões de interferência com uma distribuição de intensidade que varia linearmente com os deslocamentos. Nestas técnicas, o tempo de exposição do registo é reduzido por forma a que durante a sua gravação o deslocamento do objecto possa ser considerado nulo. Ao reduzir o tempo de exposição, torna-se necessário dispôr de grandes quantidades de energia em tempos relativamente curtos, razão pela qual estas técnicas, quando utilizadas com *lasers* contínuos, são pouco eficientes em termos da utilização da fonte de luz.

Quando técnicas de modulação de amplitude são utilizadas no estudo de fenómenos transitórios, as enormes potências necessárias implicam o recurso a *lasers* de emissão pulsada. No caso dos movimentos periódicos, ou aqueles que sendo não destrutivos possam ser repetidos periodicamente, é possível obter a energia necessária à gravação do registo integrando o resultado de vários padrões de interferência idênticos. Desta forma é possível utilizar estas técnicas com *lasers* de emissão contínua, embora a sua aplicação se restrinja a montagens de grande estabilidade. A energia disponível, a sensibilidade do meio de registo e a velocidade de propagação do fenómeno em estudo condicionam a dimensão máxima da área a estudar. O objecto em estudo, representado na figura 7.47, consiste numa membrana metálica plana, de pequena espessura, que constitui o elemento vibrante do auscultador de um telefone.



Figura 7.47 Objecto utilizado nas medições efectuadas com o sistema modulado em amplitude.

Recorrendo à modulação de amplitude, e utilizando o sistema de ESPI que se encontra representado esquematicamente na figura 7.48, foi possível obter registos interferométricos de um objecto em vibração sinusoidal. Trata-se de um objecto circular com uma área aproximada de 12 cm^2, que pode ser posto a vibrar fora do seu plano aplicando um tensão eléctrica sinusoidal ao electroiman.

A modulação de amplitude da fonte de luz foi obtida recorrendo a um cristal acusto-óptico para deslocar espacialmente o feixe de luz, impedindo-o de se propagar na direcção do objecto. Para esta função foi utilizado um gerador de rádio frequência IntraAction Corp. modelo DE-70M para comandar um cristal acusto-óptico ADM-70, do mesmo fabricante. Por sua vez, o gerador de sinal de rádio frequência (RF) era comandado por impulsos síncronos com a excitação, obtidos num gerador de impulsos baseado no microcontrolador 80535 [23].

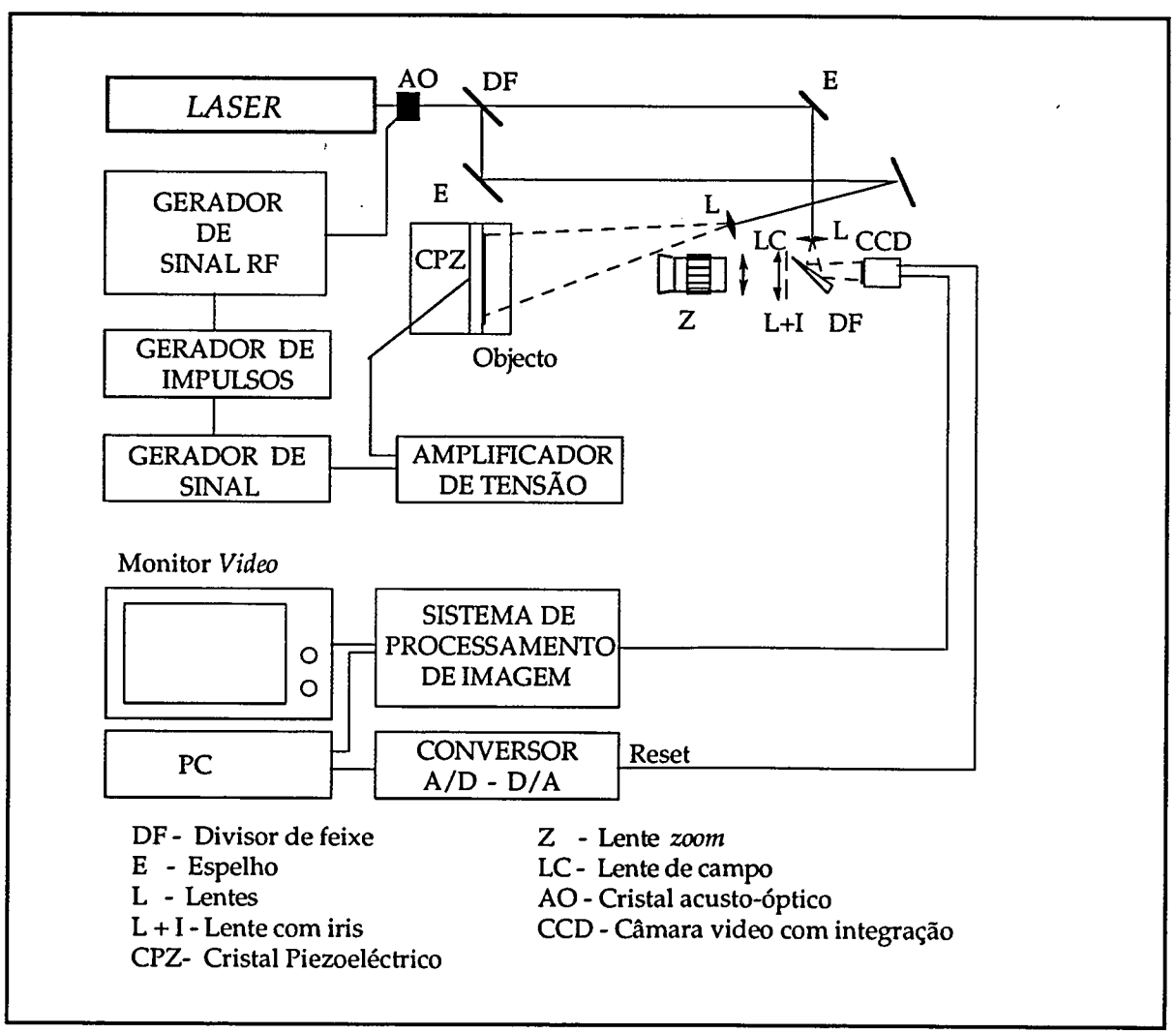


Figura 7.48 Sistema de ESPI com possibilidade de utilização em modulação de amplitude.

O gerador de impulsos utilizado dispõe de um visor de cristais liquídos e ligação a um vulgar teclado de computador, a partir do qual pode ser comandado. A rotina utilizada foi programada em linguagem máquina e permite obter um ou dois impulsos por ciclo do sinal de entrada, e pode ser operada em dois modos de funcionamento. No modo constante, obtém-se um sinal síncrono com a entrada em que os tempos t_1, t_2 e t_3, como se representa na figura 7.49, são absolutos e controláveis a partir do teclado. Em modo proporcional, o operador especifica quais as fracções do ciclo de entrada que quer atribuir a cada um dos parâmetros; o sistema ajusta-os automáticamente, de acordo com o período do sinal de entrada. Quer a comutação entre simples e duplo impulso, quer a actualização dos vários parâmetros podem ser efectuadas em tempo real através do teclado ligado ao microcontrolador, sendo toda a informação apresentada contínuamente no visor.

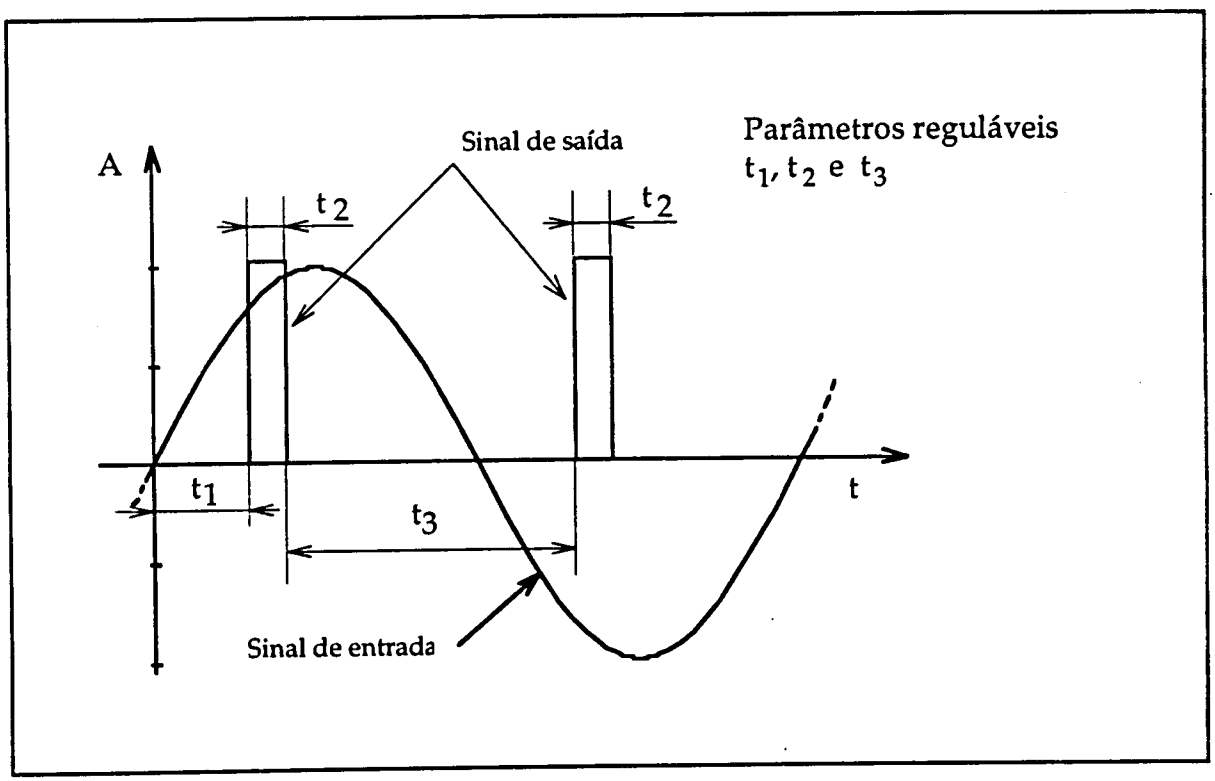


Figura 7.49 Parâmetros de controlo do gerador de impulsos operando em modo constante com duplo impulso.

A utilização do registo em *video* (25 imagens/s) impõe um tempo limite para a gravação de cada padrão de interferência. Com o aumento da frequência de

excitação do objecto, um maior número de exposições contribui para o registo final. No entanto, ao diminuir a duração de cada impulso, reduz-se a quantidade de energia que incide na área fotossensível da câmera.

A colocação dos impulsos em instantes do ciclo em que o objecto se desloca a maior velocidade, ou a utilização de impulsos demasiado largos contribui para aumentar a componente de tempo médio no registo final [24]. Desta forma, para garantir o melhor contraste dos padrões de interferência, os impulsos deverão ser colocados nos pontos de inflexão do movimento. A sua duração deverá ser o mais curta possível, sendo a duração mínima condicionada pela energia necessária à activação do meio de registo. No limite, quando são utilizados dois impulsos de curta duração por período, obtém-se uma função de franja sinusoidal cuja frequência espacial depende da diferença de fase entre os dois registos efectuados [25].

A inclusão no sistema de ESPI de detectores *video* de maior sensibilidade, ou com possibilidade de integrar vários quadros de *video*, permite aumentar a gama de aplicação do sistema. Nesta montagem, foi utilizada uma câmera PULNIX TM-86 com uma sensibilidade de 2 lux, dispondo da possibilidade de integrar até 14 quadros de *video*. O detector fotossensível desta câmera é arrefecido por efeito de Peltier para diminuir a contribuição do ruído electrónico, que é amplificado pela integração [26].

Este sistema foi utilizado com simples impulso e subtraíndo o padrão de *speckle* do objecto em movimento de um padrão de referência préviamente gravado com o objecto em repouso. O fraco contraste das imagens obtidas, como se pode ver na figura 7.50, deve-se à grande sensibilidade do sistema a instabilidades na montagem, quando operado com referência fixa. A utilização do sistema em adição, embora reduza a sensibilidade do sistema às instabilidades, necessita de filtragem electrónica do sinal *video* para remoção dos termos de autocorrelação.

A energia máxima disponível no *laser* de Árgon utilizado é de 1Watt. A energia é fortemente reduzida pelo processo de modulação de amplitude disponível. Desta forma, quer a dimensão dos objectos a ensaiar com este sistema, quer as frequências de vibração, são fortemente limitadas. Apesar da utilização de sistemas de detecção *video* de grande sensibilidade, não foi possível efectuar medições no objecto ensaiado, para frequências acima dos 700 Hz. Os padrões obtidos apresentam franjas em tudo idênticas às resultantes da análise estática contudo, apresentam um maior ruído de *speckle*, ver figura 7.50. Este ruído resulta da integração do ruído electrónico e de instabilidades da montagem



Figura 7.50 Padrão de interferência obtido com o sistema de ESPI operado em modulação de amplitude.

A utilização de sistemas de modulação baseados em cristais electro-ópticos permitirá duplicar a quantidade de energia disponível. Contudo, este método será certamente melhor adaptado à utilização de um *laser* pulsado. Tendo o LOME adquirido recentemente um sistema desse tipo, capaz de dispôr de 180 mJ em cada impulso com duração de 10 a 30 ns, será possível vir a utilizar esta técnica para analisar objectos de maiores dimensões, quer submetidos a vibrações periódicas, quer na análise de fenómenos transitórios.

7.4 Ensaios não destrutivos de materiais compósitos com *Shearography*.

Dada a crescente utilização dos materiais compósitos na construção de elementos estruturais, tornou-se indispensável desenvolver métodos numéricos

adaptados ao comportamento destes materiais, bem como técnicas experimentais que possam ser utilizadas de forma expedita para avaliar, quer a sua integridade estrutural, quer o seu comportamento em serviço. A maior parte das técnicas experimentais clássicas pode, por vezes com ligeiras adaptações, ser utilizada no estudo deste tipo de estruturas. No entanto, a sua natureza heterogénea e os novos conceitos de projecto, admitindo a existência de defeitos, implicam a investigação em novas técnicas que permitam um maior rigor na detecção e avaliação da extensão de defeitos com influência na resistência dos componentes.

Alguns dos defeitos mais frequentes podem ser revelados pela sua influência no comportamento superficial da estrutura, desde que esta seja convenientemente carregada. Dessa forma, é possível utilizar técnicas ópticas na análise não destrutiva destes materiais e desenvolver sistemas de detecção de defeitos baseados nestas técnicas. Tratando-se de técnicas de campo de elevada resolução, permitem detectar sem contacto gradientes introduzidos no campo de deslocamentos da superfície pela presença de defeitos. A combinação das várias técnicas interferométricas disponíveis com os vários métodos de carregamento permite obter um conjunto de procedimentos experimentais, de entre os quais se poderá seleccionar o mais adequado à revelação de determinado tipo de defeito [30].

Uma das técnicas anteriormente descritas, cuja utilização na análise não destrutiva de materiais compósitos tem vindo a ser divulgada é o ESPI com referência de *speckle*. Vulgarmente designada pelo termo anglosaxónico *Shearography*, esta técnica encontra-se descrita no quarto capítulo da presente tese. A utilização de uma padrão de *speckle* como referência acarreta uma diminuição de contraste nos padrões de interferência. Contudo, o facto deste interferómetro possuir dois braços com o mesmo percurso introduz algumas caracteristícas desejáveis na sua utilização:

i) sendo a montagem óptica bastante simples, é também menos sensível a instabilidades;
ii) como ambos os braços do interferómetro têm o mesmo percurso, esta montagem é menos sensível a perturbações introduzidas no caminho dos feixes;
iii) pode ser utilizada com *lasers* de reduzido comprimento de coerência;
iv) permite obter directamente as derivadas dos deslocamentos, ou das amplitudes de vibração, característica que se revela baste útil na medição de gradientes localizados.

Nesta montagem óptica, qualquer deslocamento do objecto que altere simultaneamente ambos os feixes não provoca o aparecimento de franjas, embora possa reduzir o contraste do padrão de interferência por descorrelação do *speckle*. As franjas de interferência resultam da existência de gradientes de deslocamento ou gradientes na amplitude de vibração. A detecção destes gradientes permite determinar o posicionamento dos defeitos e ter uma estimativa da sua extensão. Embora a resolução da medida seja equivalente à dos sistemas de ESPI convencionais, é possível alterar a sua sensibilidade fazendo variar a direcção e grandeza do deslocamento (*Shear*) introduzido entre as imagens. Na figura 7.51 está representada a montagem óptica utilizada para esta aplicação, e as diferenças entre os padrões de interferência obtidos para uma deformação da superfície que conduza ao aparecimento de uma convexidade.

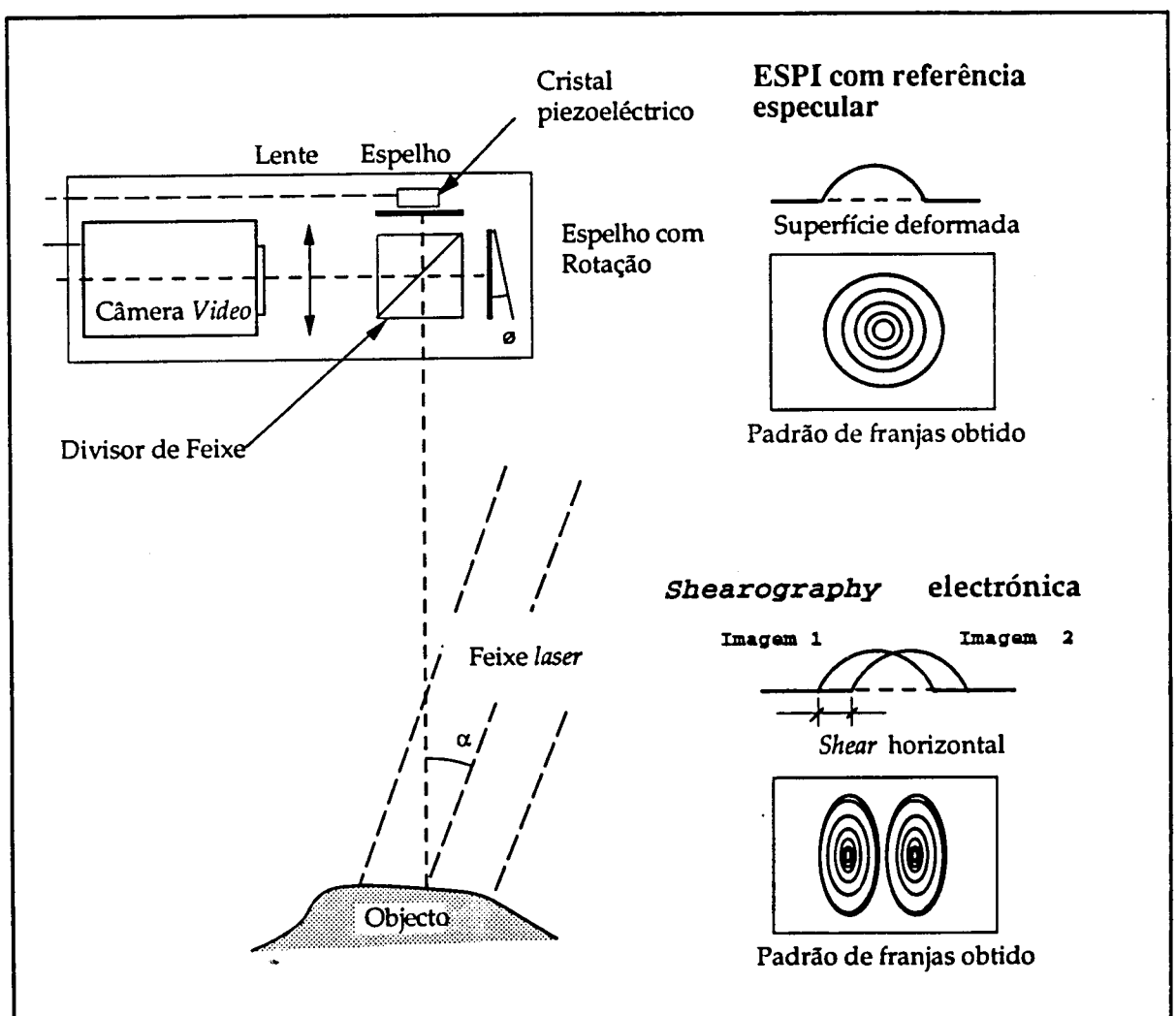


Figura 7.51 Montagem óptica para shearography e comparação entre os padrões obtidos com esta técnica e os obtidos com uma montagem convencional de ESPI.

A inclusão de um modulador de fase num dos braços do interferómetro permite utilizar as técnicas de modulação de fase para aumentar a resolução da medida de uma ordem de grandeza, como foi descrito no quinto capítulo desta tese. Neste trabalho foi utilizada a técnica da *Shearography* sobre vários tipos de estruturas compósitas para detecção de defeitos cuja natureza implicasse gradientes de deformação compatíveis com o método. Defeitos de descolamento em estruturas *sandwich*, inclusões ou delaminagens foram introduzidos propositadamente em estruturas de teste, por forma a avaliar as capacidades de detecção da *Shearography*.

O carregamento da estrutura foi realizado por aquecimento superficial e ou por aplicação de uma depressão na superfície exterior. O aquecimento superfícial foi efectuado por um vulgar secador de cabelo ou, alternativamente, por lâmpadas de halogéneo. Para aplicação da depressão, foi construída uma câmara cilíndrica provida de uma janela de vidro numa das faces de topo. Com esta câmera, foi possível aplicar depressões até -100 mbar, numa área de aproximadamente 60 cm^2.

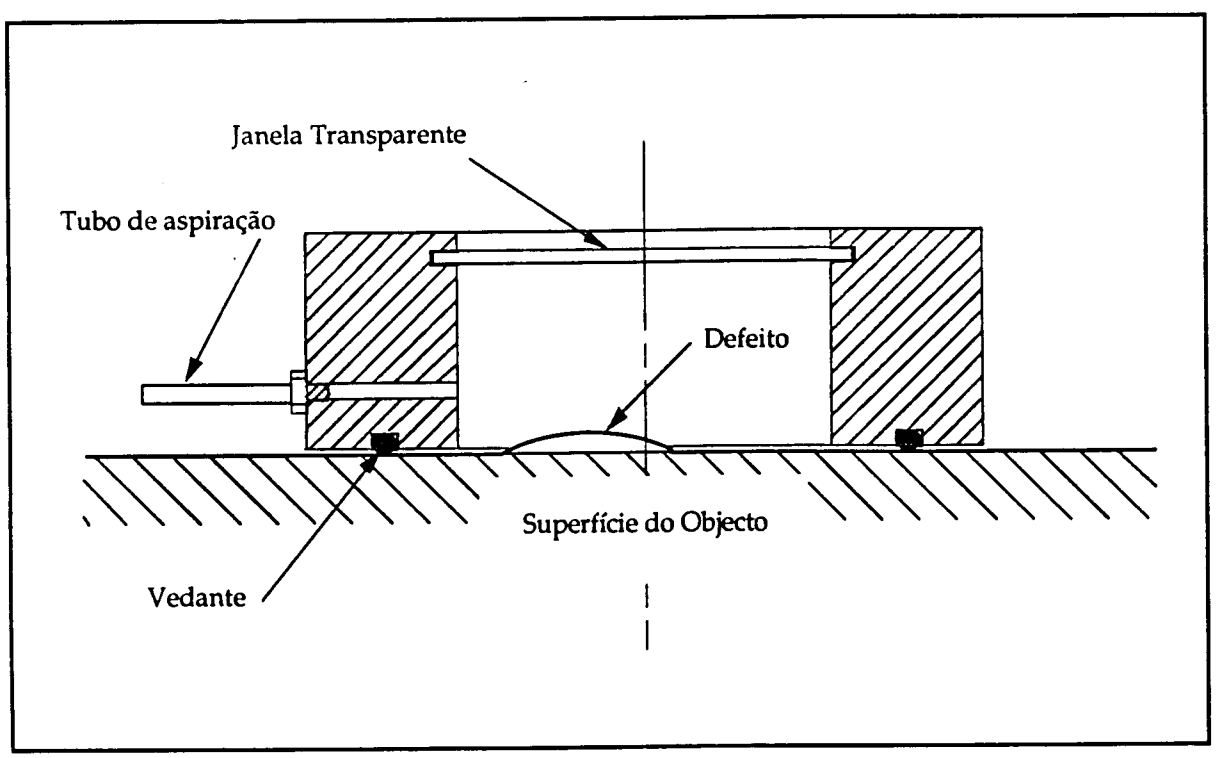


Figura 7.52 Câmera utilizada para aplicar depressões sobre a superfície do objecto [31].

Na figura 7.53 representam-se os resultados obtidos sobre uma placa laminada de CFRP 200x250 mm com um defeito provocado por inclusão de uma folha de aluminio com 10x30mm a 0,5 mm da superfície. Trata-se de uma placa de laminado constituida por 4 camadas de pré-impregnado de carbono unidireccional com *epoxy*, cuja sequência de empilhamento é [0,90,0,90]s e uma espessura final de aproximadamente 1 mm. São apresentados nessa figura os resultados obtidos com um *Shear* de aproximadamente 5 mm na direcção horizontal e na direcção vertical, respectivamente. Para o carregamento da estrutura foi utilizado um aquecimento com uma lâmpada de halogéneo de 50 W.

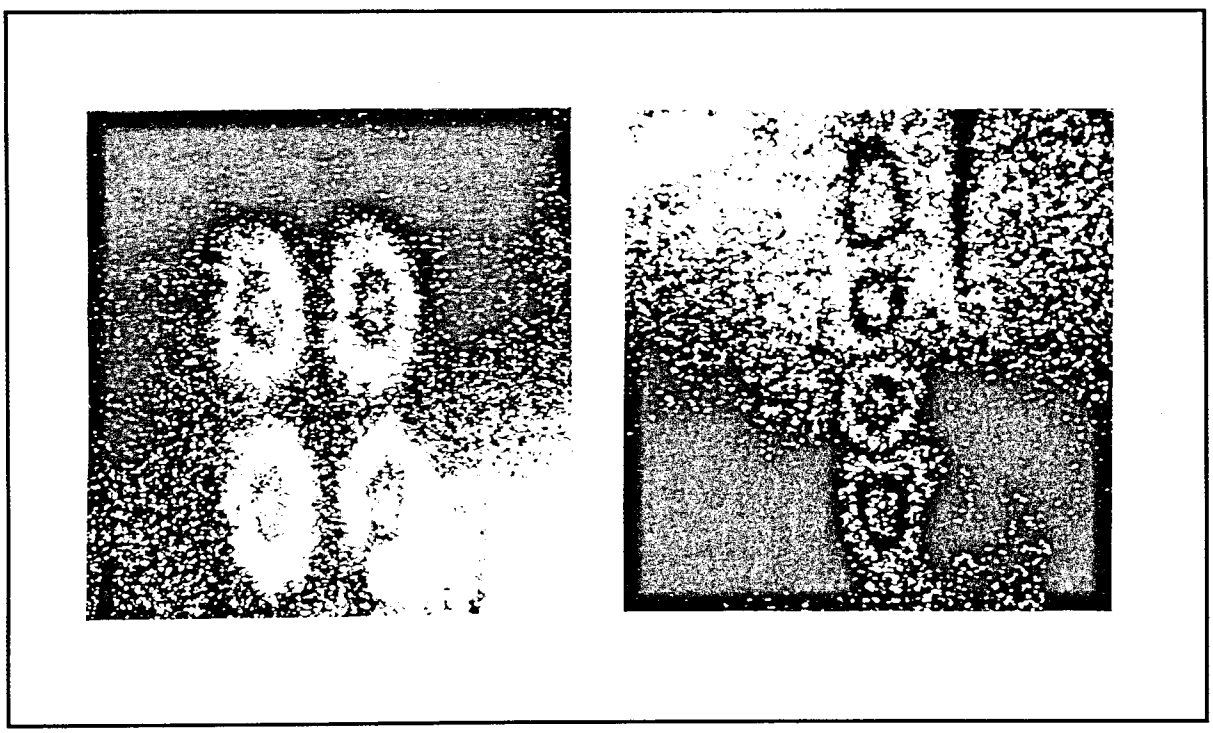


Figura 7.53 Padrões de interferência obtidos para um defeito resultante da inclusão de uma folha rectangular de alumínio com 10x30 mm colocada a 0,5 mm da superfície de uma placa de CFRP. Os padrões foram obtidos com um *shear* de 5 mm na horizontal e na vertical respectivamente.

Da análise dos padrões representados na figura pode verificar-se a adesão do laminado na zona central do defeito, de onde resulta o aparecimento de duas convexidades com aproximadamente metade do tamanho da folha de alumínio. A placa de laminado foi também ensaiada utilizando o carregamento por depressão. Para esse efeito foi utilizada a câmera representada na figura 7.52 e a placa de material compósito foi colada numa placa de alumínio com 5 mm de

espessura para lhe aumentar a rigidez à flexão. A colagem da placa a ensaiar no suporte de alumínio simula também a situação real de um componente como parte integrante de uma estrutura com um aumento significativo da sua rigidez à flexão. Na figura 7.54 representa-se uma das imagens obtidas com a placa referida anteriormente, com um defeito circular de 26 mm de diâmetro situado a 0,5 mm da superfície. A variação de pressão necessária à revelação do defeito que se representa na figura 7.54 é inferior a -100 mbar, e pode ser obtida recorrendo a uma vulgar pêra de borracha.

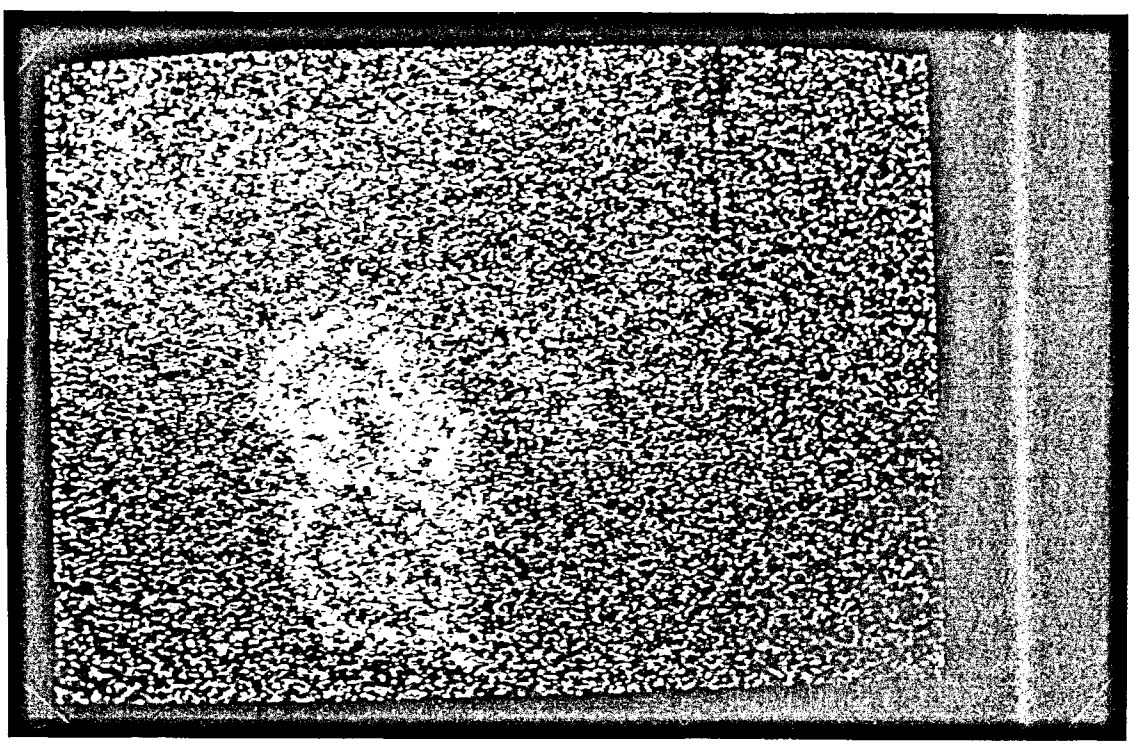


Figura 7.54 Padrão de interferência obtido para um defeito circular com 26 mm de diâmetro introduzida numa placa de CFRP a 0,5 mm da superfície.

Esta técnica foi ainda utilizada para revelar defeitos de colagem em estruturas de alumínio com construção em *sandwich,* como se representa na figura 7.55. Trata-se de uma construção com núcleo em "ninho-de-abelha" de aluminio colado com filme adesivo FM-123-5 (CYANAMID), muito vulgar em construção aeronáutica. Neste tipo de estruturas, e dada a boa condutibilidade térmica do metal, a solicitação que se revelou mais eficiente na revelação dos defeitos foi a depressão. As variações de pressão utilizadas foram algo superiores

às necessárias para a detecção dos defeitos nos laminados de carbono, mas nunca foi excedido o limite de -400 mb.

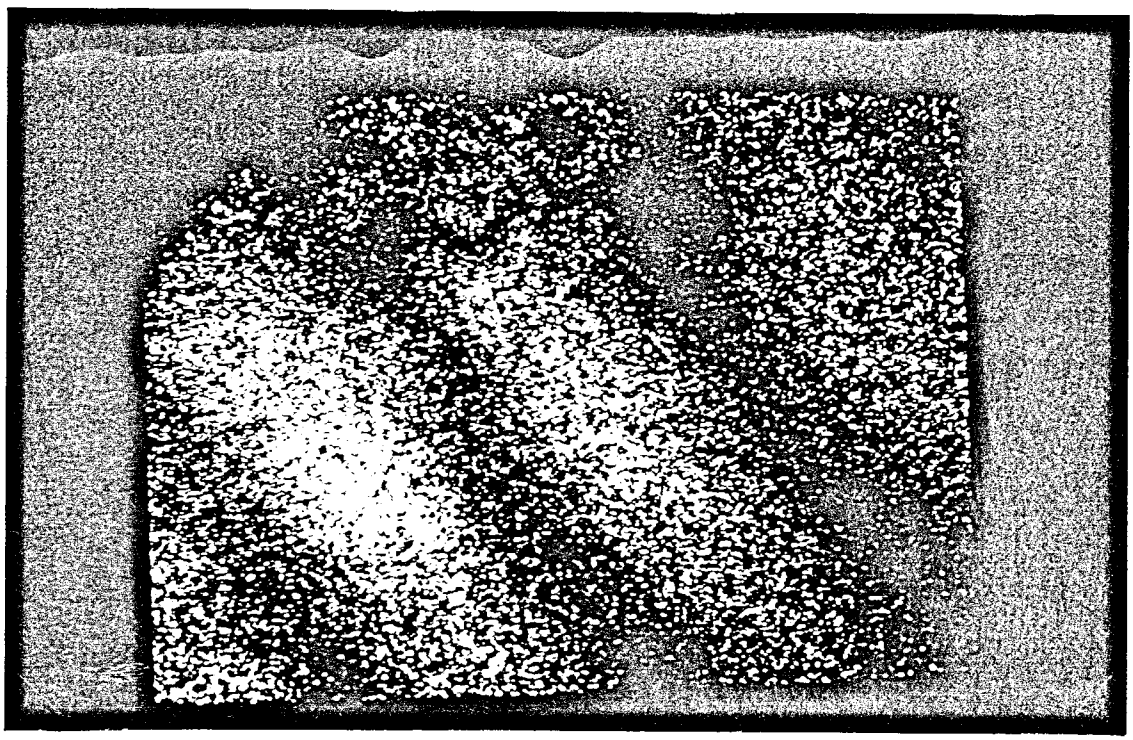


Figura 7.55 Painel de alumínio com construção em *sandwich* ensaiado com um *shear* horizontal de 5 mm . O defeito introduzido consiste num descolamento circular entre a pele e o núcleo com 30mm de diâmetro. As franjas paralelas revelam uma deformação global da placa devida ao carregamento.

Após os ensaios iniciais sobre placas em que foram introduzidos defeitos com dimensão e forma conhecidas, esta técnica tem vindo a ser utilizada sobre componentes estruturais da indústria aeronáutica disponíveis por o LOME estar integrado num programa de *Round Robin* no âmbito de um projecto EUCLID. Neste caso, foram ensaiados componentes reais construídos em materiais compósitos por empresas da indústria aeronáutica. Os ensaios foram realizados após os componentes terem sido submetidos a ensaios de impacto. Na figura 7.56 representa-se a primeiro componente ensaiado, indicando as suas dimensões e o posicionamento das zonas de impacto. O carregamento consistiu no aquecimento suave da superfície (variações de temperatura inferiores a 5°, confirmadas por medições por termografia de infravermelhos) com lampâdas de 50 W e 500 W. Na figura 7.57 representam-se os resultados obtidos para os impactos 5 e 6.

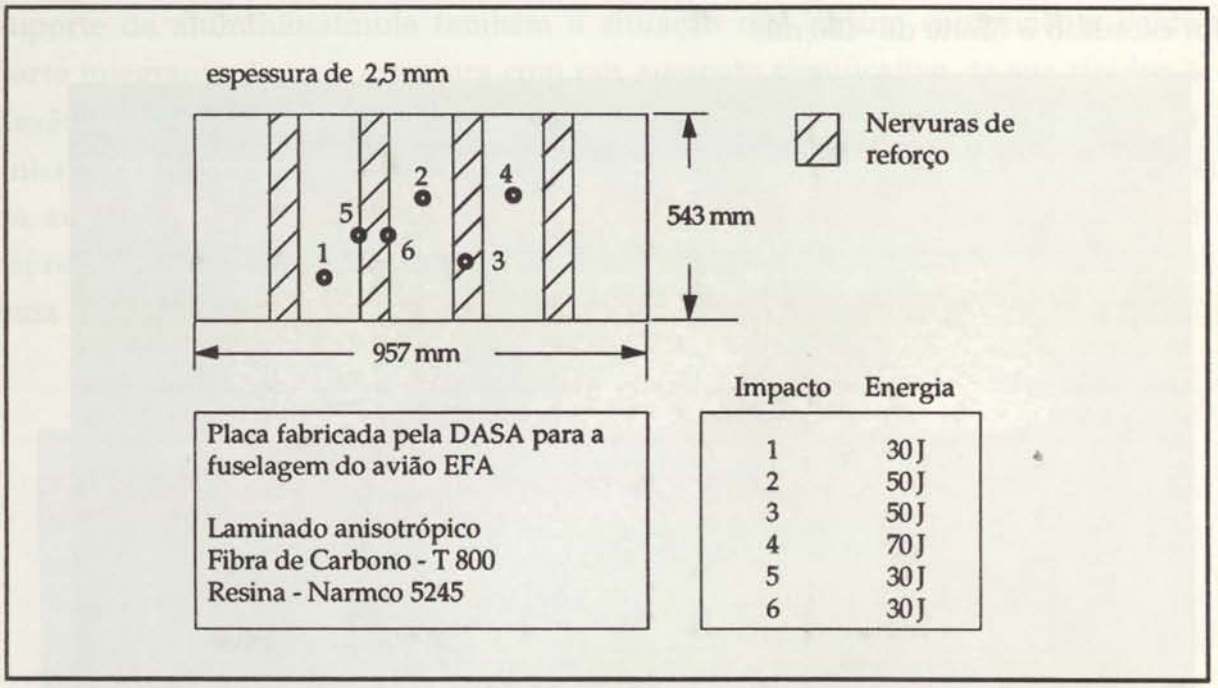


Figura 7.56 Dimensões e geometria de um componente em material compósito ensaiado com *Shearography*.

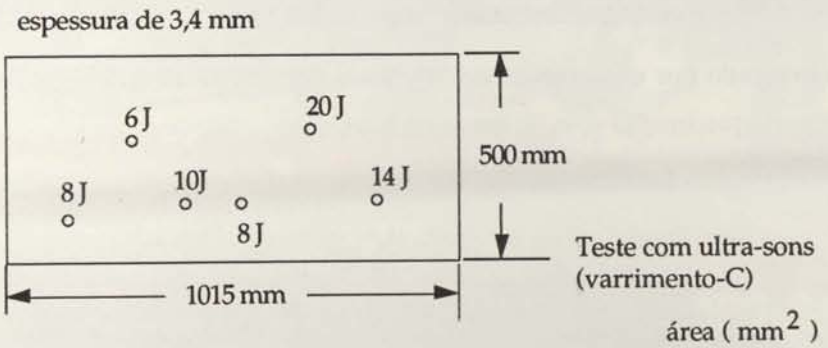


Figura 7.57 Padrão de interferência obtido na detecção dos defeitos provocados pelo 5º e 6º impacto.

Neste componente foram detectados defeitos em todos os impactos assinalados, o que prova que, embora a superfície exterior não tenha sido alterada

pelos impactos, estes provocaram delaminagens interiores com dimensão suficiente para alterarem o campo de deslocamentos na superfície. A grande resolução da medida pode ser confirmada pelo aparecimento de franjas de interferência numa zona em que se encontrava colado um extensómetro, denunciando a diferente deformação verificada na superfície do extensómetro.

O segundo componente ensaiado, cujas dimensões se representam na figura 7.58, tinha geometria semelhante ao anterior e também havia sido submetido a vários ensaios de impactos, embora de energia inferior aos do primeiro componente. Neste caso, e à semelhança de um ensaio prévio realizado com ultra-sons, só foi possível detectar defeitos em impactos com energia superior a 8 J.



Placa fabricada pelo NLR (Holanda) Laminado anisotrópico de 20 camadas [±45°] Fibra de Carbono - T 400 H Resina - Fibredux 6376		área (mm^2)
	4 J	0
	6 J	0
	8 J	5
	10 J	474
	14 J	555
	20 J	747

Figura 7.58 Dimensões e geometria de um componente em material compósito ensaiado com *Shearography*.

Nas figuras 7.59 e 7.60 representam-se os padrões de interferência obtidos na detecção dos defeitos quando se utilizava um *shear* de aproximadamente 10 mm. O carregamento utilizado consistiu num ligeiro aquecimento superfícial provocado com uma lâmpada de halogéneo de 500 W.



Figura 7.59 Defeito provocado por um impacto de 20J. *Shear* vertical de 10 mm, sendo a estrutura solicitada por aquecimento com lâmpada de halogéneo.



Figura 7.60 Defeito provocado por um impacto de 14J. *Shear* horizontal de 10 mm, sendo a estrutura solicitada por aquecimento com lâmpada de halogéneo.

Em todos os ensaios foi utilizado uma laser de Árgon com uma potência de aproximadamente 0,6 W em TEM_{oo} para iluminar as superfícies cujas áreas de ensaio variaram entre 160 e 600 cm^2. A montagem óptica utilizada encontra-se representada na figura 7.61 e corresponde à realização do esquema apresentado na figura 7.51. Os resultados obtidos foram bastante encorajadores pois, quando comparados com outras técnicas como por exemplo o varrimento C com ultra-sons, revelaram defeitos com aproximadamente a mesma extensão.

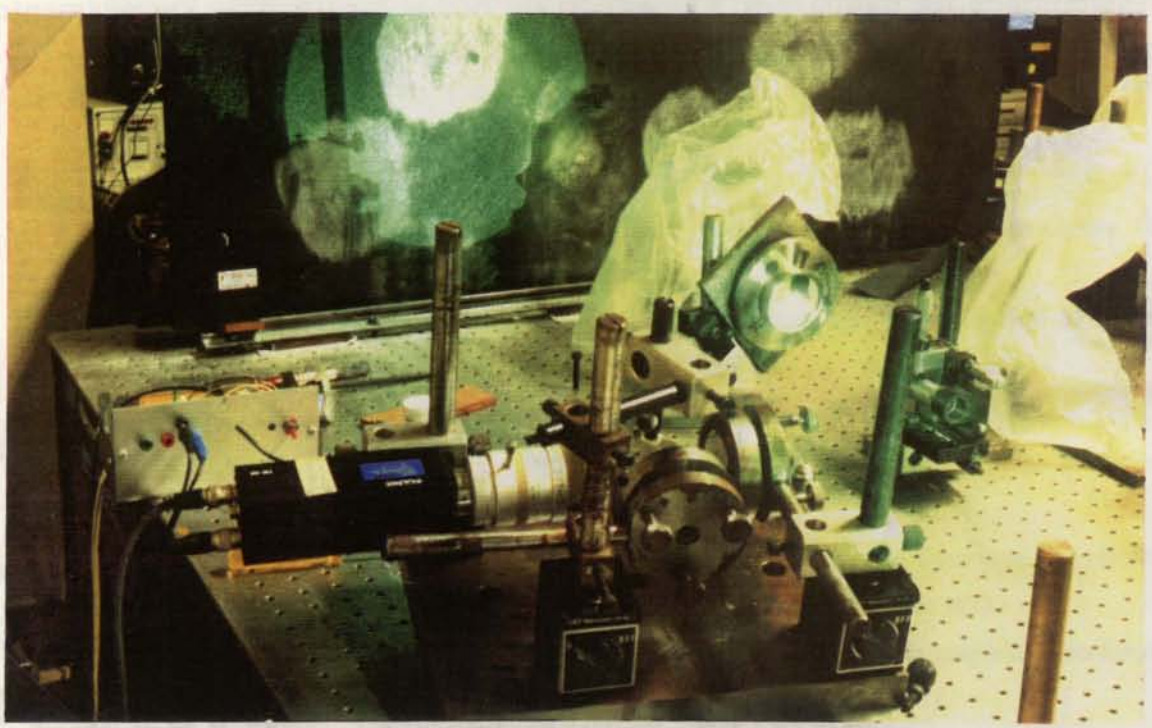


Figura 7.61 Montagem óptica utilizada nos ensaios não destrutivos de materiais compósitos.

Os bons resultados obtidos com esta técnica encorajam futuros trabalhos de investigação no sentido de construir um sistema compacto e portátil que possa ser utilizado na análise não destrutiva de materiais compósitos. Embora esta técnica seja de fácil utilização, e não implique o recurso a montagens ópticas de grande complexidade, tem limitações que deverão ser consideradas antes de se optar pela sua utilização:

i) embora mais tolerante que as montagens holográficas convencionais, esta é uma técnica interferométrica e, como tal, implica que se tenham

certos cuidados para garantir a estabilização do ambiente em que se realiza a medida;

ii) sendo uma técnica óptica, utiliza a luz para codificar as alterações verificadas nas superfícies, pelo que só permite detectar defeitos que se manifestem superfícialmente alterando a deformação da estrutura.

Contudo, alguns melhoramentos poderão ser ainda introduzidos nesta técnica. A utilização de *lasers* pulsados permitirá reduzir as limitações impostas na estabilidade da montagem, e o estudo de novos métodos de carregamento poderá contribuir para melhorar a capacidade de detecção dos defeitos.

Referências

[1] Hariharan, P.; "Optical Holography - Principles, Techniques and Applications", Cambridge Studies in Modern Optics, Cambridge University Press, Cambridge, 1984.

[2] Abramson, N.; "The Making and Evalution of Holograms", Academic Press, London, 1981.

[3] Chousal, J. A. G. ; "Processamento de Imagem na Intrepretação de Franjas Interferométricas em Análise Experimental de Tensões", Tese de Mestrado apresentada no Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1991.

[4] Timoshenko, S. P.;"Resistência dos Materiais", Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1975.

[5] ADINA Verification Manual ARD 90/9.

[6] Creath, K. ;"Phase-Measurement Interferometry Techniques", in *Progress in Optics* (Ed. E. Wolf), Vol. XXVI, Cap. V, pág. 351-391, 1988.

[7] Jones, R.; Wykes, C.; "General Parameters for the Design and Optimization of Electronic Speckle Pattern Interferometers", Optica Ata, Vol. 28, nº7, pág. 949-972, 1981.

[8] Klein, M. V.; Furtak, T. E.; "Optics", John Wiley & Sons, Inc., 2ª Edição, Singapore, 1986.

[9] Timoshenko, S. P.; Krieger, S. W.; "Theory of Plates and Shells", 2ª Edição, McGraw-Hill Int. Book Comp., 1981.

[10] Fourdain, M.; Josselin, H.; Haik, R. E.;"Les Courbes Limites de Formage. Application à l'emboutissage des Pièces Automobiles", IDDRG Meeting, Amsterdam, 1972.

[11] Creath, K.; "Phase-Shifting Hologarphic Interferometry", in Holographic Interferometry (Ed. Rastogi, P. K.), Springer-Verlag, Vol. 68, pág. 109-150, 1994.

[12] Vaz, M.A.P.; Lage, A.L.S.V.; Gomes, J.F.S.; "Análise Híbrida de um Componente de um Motor Automóvel", Proc. do 2º Encontro Nacional sobre Análise Experimental de Tensões, Lisboa, 12 a 14 de Março de 1990.

[13] ADINA Theory and Modeling Guide, R&D, Inc.; REPORT ARD 92-8, 1992.

[14] A.Dias Ramos, ADIRA, Relatório interno, ADIRA/GHOT. 0830, Fev. 1991.

[15] Steinbichler Optotechnick GMBH, "Optoelectronic non Destructive Testing Electronic Speckle Pattern Interferometer", catálogo, 1992.

[16] Conspec As, "RETRA- TV-Holography System, REDEF- NDT Software Program. A New Method for Materials Inspection", Catálogo, 1990.

[17] Montgomery, P.C.; Berquist, B.D.; "Contrast Enhancement of ESPI Vibration Patterns by Speckle Averaging in a video Frame Store", Optics in Engineering Measurements,(Fagan, W.F.; Ed.), Proc. Soc. Photo-Opt. Instrumentation., Eng., pág. 201-206, 1985.

[18] Cook, R., Malkus, D., Plesha, M.; "Concepts and Applications of Finite Elemen Analysis", 3rd Ed., New York, John Wiley & Sons, 1989.

[19] Gomes, J. F. S.; Vaz, M.A.P.; Magalhães, A. G.; "Ensaio de Tamponamento de um Vagão", relatório INEGI, 880707/2, 1989.

[20] Bathe, K. J. "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, 1982.

[21] Pimentel, P. M. V. ; "Utilização da Interferometria de Granitado Laser (ESPI) na Determinação dos Modos e Frequências Próprias de Vibração de Placas", Tese de Mestrado, DEMEGI-FEUP, 1987.

[22] Vaz, M.A.P.; de Melo, F.J.M.Q. ; Rodrigues, J.F.D.; Gomes, J. F.; "An Experimental and Numerical Assessement of the Noise Emission from the Cover of the Distribution Chain Drive of an Automobile Engine", Proc. da Conferência Vibration and Noise' 95, Veneza, 25 a 27 Abril 1995 (aceite para publicação).

[23] Almeida, P.S.S.; Trabalho para a Disciplina de Microcomputadores e Microcontroladores sob a orientação do prof. Gomes, A.O.S.; Curso de mestrado em Engenharia Electrotécnica e Microcomputadores, Julho de 1992.

[24] Løkberg, O.J.; "Use of Chopped Laser Light in Electronic Speckle Pattern Interferometry", Applied Optics, Vol. 18, nº 14, pág. 2377-2384, 1979.

[25] Aleksoff, C. C.; "Temporally Modulated Holography", Applied Optics, Vol. 10, nº 6, pág. 1329 - 1341, 1971.

[26] PULNIX America, Inc., "Camera, TM-80/86, Manual", 1993.

[27] BURLEIGH, "Micropositioning Systems", Burleigh Instruments, 1989.

[28] DT 2861- User Manual, DATA TRANSLATION Inc., 1990.

[29] "Acústica- Vocabulário Parte 2: Propagação do Som", NP-3225/2, Direcção Geral da Qualidade, 1986.

[30] Vaz, M.A.P.; Silva Gomes, J.F.; Lage, A.L.S.V.; Gomes, A. O. S.; "Non-Destructive Testing by Optical Interferometric Methods", Proc. da 10th International Conference on Experimental Mechanics , Lisboa 18-22 de Julho de 1994, "Recent Advances on Experimental Mechanics", pág. 367-372, 1994.

[31] Silva, J. F.; Justo, J. M.; Chousal, J. A.; Vaz, M. A. P.; Marques, A. T.; Silva Gomes, J. F:; " Non-destructive Testing of Composite Structures Using Shearography", Proc. da 10th International Conference on Experimental Mechanics , Lisboa 18-22 de Julho de 1994, "Recent Advances on Experimental Mechanics", pág. 373-378, 1994.

CAPÍTULO 8

8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURO DESENVOLVIMENTO

8.1 Nota final

8.2 Perspectivas de trabalho futuro

CAPÍTULO 8

8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURO DESENVOLVIMENTO.

8.1 Nota final.

As técnicas de interferometria holográfica são hoje aplicadas em domínios tão díspares como: a Medicina, a recuperação do património artistístico e arquitectónico e os vários ramos de Engenharia, incluindo a Engenharia Cívil, Mecânica, Aeronáutica e Aeroespacial. O carácter global da medida, a elevada resolução e a ausência de contacto com as superfícies a medir permitem que estas técnicas sejam aplicadas directamente sobre as superfícies dos protótipos, sem que estas tenham necessidade de serem submetidas a qualquer preparação prévia. Associadas com técnicas de modulação de fase e de processamento de imagem, permitem construir sistemas de medida que associam a facilidade de utilização à grande resolução destas técnicas. A utilização conjunta das técnicas de interferometria holográfica com os métodos de cálculo numérico, principalmente o Método dos Elementos Finitos, constituindo as técnicas vulgarmente designadas por híbridas, permite aumentar o rigor das soluções e a versatilidade na aplicação destas técnicas à análise estrutural.

Os principais objectivos deste trabalho consistiram em contribuir para a criação no Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto de um Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental equipado com as técnicas actualmente mais proeminentes de análise experimental, e provar a grande utilidade da sua

aplicação em problemas do âmbito da Engenharia Mecânica. O autor julga ter alcançado ambos os objectivos, dinamizando a aquisição e montagem de um conjunto de equipamentos e instalações que podem ser utilizados para este fim, demonstrando a sua aplicação e provando a vantagem da utilização conjunta das técnicas experimentais e numéricas na análise estrutural.

Com a supervisão do Prof. Joaquim Francisco Silva Gomes e a colaboração dos Doutores Armindo Luís Vilar Soares Lage e Augusto Oliveira Silva Gomes, e recorrendo ao financiamento da medida M do programa Ciência, foi possível estruturar o LOME - Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental com as condições necessárias para poder aplicar as técnicas descritas ao longo deste trabalho. Presentemente estão já em curso alguns trabalhos no sentido de projectar e construir sistemas portáteis que permitam utilizar as técnicas de interferometria holográfica referidas nesta tese fora do ambiente do laboratório.

A possibilidade de dispôr de um sistema de ESPI portátil, incluindo um *laser* de baixa potência, permitirá utilizá-lo nas mais diversas aplicações que envolvam medições de deslocamentos com a resolução de poucas décimas de *micrometro* em áreas de uma dimensão aproximada de 0,5 m^2. De igual forma a crescente utilização da *Shearography* na análise não destrutiva, principalmente em materiais compósitos, justifica o esforço dispendido na concepção e construção de um modelo portátil que permita aplicar esta técnica no local de fabrico ou instalação. Ambas as técnicas referidas foram utilizadas neste trabalho com bons resultados.

A enorme quantidade de informação que estas técnicas permitem obter em cada medição justificam que se desenvolvam métodos para automatizar o processo de medida. Estão actualmente disponíveis sistemas de processamento de imagem que podem ser montados directamente em barramentos de computadores pessoais, pelo que é possível integrá-los em sistemas de medida facilitando a análise dos resultados e a transferência de valores entre os métodos experimentais e os numéricos. O LOME dispõe de um módulo de programas, desenvolvidos no âmbito do programa de doutoramento do Engº José Augusto Gonçalves Chousal, especialmente preparado para esta utilização e com o qual foram obtidas as imagens apresentadas neste trabalho.

A aplicação destas técnicas em problemas de Mecânica Estrutural foi também realizada com sucesso. Provou-se que os valores obtidos experimentalmente na medição dos deslocamentos podem ser utilizados para ajustar convenientemente as condições de fronteira dos modelos numéricos de cálculo ou directamente no cálculo das tensões. Desta forma, pode dispensar-se parte da resolução do

programa de cálculo necessário quando se utiliza o Método dos Elementos Finitos no cálculo das tensões. Foram também desenvolvidas rotinas computacionais que permitem realizar o amaciamento dos valores experimentais quando se pretende obter a distribuição de tensões por derivação da função deslocamento.

A realização de medições em instalações fabris sobre máquinas de grande porte prova que estas técnicas, quando aplicadas com os necessários cuidados que a sua elevada resolução implica, podem ser utilizadas com bons resultados fora do ambiente laboratorial. Trabalhando de noite, a fim de dispôr de um ambiente menos ruidoso, e isolando convenientemente a montagem óptica é possível estabilizar o sistema de medida durante o tempo necessário à exposição do registo holográfico.

A aplicação destas técnicas na análise dinâmica de estruturas foi também realizada com êxito, provando que em determinadas situações podem ter vantagens sobre as técnicas clássicas. Embora neste trabalho elas tenham sido aplicadas apenas na análise modal, com excitação sinusoidal, prevê-se para breve a sua aplicação no LOME para o estudo de fenómenos transitórios com utilização de um *laser* pulsado.

8.2 Perspectivas de trabalho futuro.

O trabalho realizado ao longo desta tese tratou apenas de problemas envolvendo solicitações quasi-estáticas ou sinusoidais. Para as primeiras, a utilização da interferometria em tempo real ou em dupla exposição permite obter padrões de franjas sinusoidais, a partir dos quais é possível calcular numericamente os deslocamentos. No caso de movimentos sinusoidais o registo em tempo médio permite integrar vários ciclos de vibração obtendo um padrão de franjas ralacionadas com a amplitude do movimento, mas cuja intensidade é modulada por uma função de Bessel de primeira ordem. A perda de linearidade entre a amplitude do movimento e a intensidade das franjas só permite o processamento numérico em situações muito particulares, isto é, aproveitando a região linear da função de Bessel de ordem 0.

Quando a montagem se situa em ambientes ruidosos e não é possível isolá-la completamente das perturbações, pode reduzir-se a sua sensibilidade a estas instabilidades recorrendo a sistemas pulsados. Tais sistemas podem ainda

ser utilizados para analisar movimentos sinusoidais em dupla exposição, conduzindo a padrões de interferência com uma variação sinusoidal de amplitude susceptíveis de processamento automático para determinação da distribuição da fase. Esta técnica de análise de fenómenos dinâmicos é designada por modulação de amplitude e foi testada neste trabalho a partir de um *laser* de emissão contínua modulado em amplitude com um cristal acusto-óptico. Contudo, a reduzida energia disponível em cada exposição acarreta algumas limitações, quer na extensão da área a estudar, quer na velocidade de propagação do fenómeno em causa. Como o LOME adquiriu recentemente um *laser* pulsado de Nd:YAG com um energia de 180 mJ por impulso, será de todo conveniente vir a utilizá-lo para esta aplicação. Com a realização deste sistema ficará disponível uma técnica que permitirá também estudar fenómenos transitórios, como é por exemplo a propagação de ondas de tensão.

Dada a grande evolução verificada actualmente na produção deste tipo de *lasers*, conseguindo produzir feixes com igual energia a partir de sistemas cada vez com menores dimensões, será de esperar que num futuro próximo seja possível construir sistemas interferométricos portáteis baseados neste tipo de iluminação. Tal sistema seria menos sensível a instabilidades e poderia vir a ser utilizado em estaleiros durante a sua normal laboração.

Outro domínio que se afigura susceptível de desenvolvimento pelo LOME consiste em desenvolver novas técnicas de gravação de padrões de interferência em suporte electrónico. Entre as vantagens da utilização deste meio de registo conta-se a ausência do processo químico de revelação, a obtenção de resultados sobre a forma de ficheiros numéricos directamente na memória de um computador portátil e a possibilidade de construir sistema interferométricos compactos. Tais vantagens são já evidentes nos sistemas de ESPI convencionais, contudo à custa do aparecimento de ruído de *speckle* nos padrões de franjas obtidos. Trabalhos de investigação recentes, desenvolvidos pelo LOME e incluidos na tese de doutoramento do Eng.º José Augusto Gonçalves Chousal, provam que é possível obter hologramas convencionais com registo electrónico, desde que o processo de reconstrução seja efectuado numéricamente. A utilização desta técnica está ainda condicionada pela resolução dos detectores de CCD actualmente disponíveis, que não permitem efectuar registos em objectos de grandes dimensões. Contudo, a aquisição de detectores de maior resolução e com uma área fotossensível mais extensa, já disponíveis no mercado, permitirá ultrapassar esta limitação. Além da maior qualidade dos registos interferométricos obtidos com esta técnica, quando comparados com os obtidos

pelos sistemas de ESPI, esta permite ainda obter directamente a distribuição espacial de fase a partir de registos de dupla exposição. Tratando-se de hologramas com uma portadora, é possível obter os mapas de fase recorrendo ao cálculo de uma FFT (*Fast Fourier Transform*).

O *laser* de impulsos actualmente disponível é pulsado a 50 Hz e dispõe de dois impulsos por ciclo de *flash*, os quais têm uma separação que pode variar entre 0 e alguns milisegundos. Esta configuração poderá ser aproveitada para sicronizar o *laser* com um sistema de registo electrónico, construindo um sistema interferométrico onde são aproveitadas as vantagens, quer do sistema de iluminação, quer do meio de registo. A inclusão de fibras ópticas poderá ser considerada no sentido de aumentar a versatilidade do sistema e permitir, quando estiver disponível um *laser* de dimensões compatíveis, construir o sistema portátil já referido.

No domínio das técnicas hibridas são múltiplas as aplicações possíveis, podendo referir-se como principais a sua utilização na modulação das condições de fronteira, na substruturação de problemas envolvendo gradientes localizados ou ainda, simplesmente, como comparação para o desenvolvimento de novos modelos de cálculo.

Em conclusão, quer a utilização das técnicas híbridas na análise de problemas de Mecânica Estrutural, quer a utilização das técnicas de interferometria holográfica na análise não destrutiva de estruturas revelam-se com suficientes potencialidade para justificarem a manutenção do interesse que o Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto lhes tem dedicado.

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
0000002248